

BAM!!



**Leefomgeving
gevuld met
houtrook**

De bijdrage van houtrook aan de fijnstofconcentratie in de leefomgeving

Auteur : Dieter Pientka & André van der Wiel
Datum : 17 januari 2024
Versie : 1.0





© 2023 by the authors. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Inhoudsopgave

1	Voorwoord.....	9
2	Samenvatting.....	12
3	Meetlocatie 's-Gravenpolder.....	13
4	De meetopstelling.....	14
5	Vorbereiden van de BAM 1020.....	15
6	Meetprocedure.....	17
6.1	Meetprincipe en berekening.....	18
7	LML Stations Sluiskil & Ossendrecht.....	20
8	Resultaten & Discussie.....	22
8.1	Software.....	22
8.2	Database met uurwaarden en waarnemingen.....	22
8.3	Background meting en alternatieve methode.....	23
8.4	De Resultaten.....	26
8.5	Statistische evaluatie.....	31
8.6	Box-Whisker plots.....	34
8.7	Windroos, pollutieroos en contourplot.....	41
8.8	Intensiteit houtrookgeur en fijnstofconcentratie.....	46
8.9	Visuele inspectie BAM 1020 filter spots.....	55
9	Conclusies & Aanbevelingen.....	56
10	Bijlagen.....	58
10.1	Bijlage Controlekaarten.....	58

Inhoudsopgave van afbeeldingen

Afbeelding 1:	Infographic fijnstof (bron: RIVM).....	9
Afbeelding 2:	De BAM 1020 van Met One.....	10
Afbeelding 3:	André van der Wiel (rechts) en Dieter Pientka (foto: Marleen Pientka).....	11
Afbeelding 4:	Plattegrond met meetlocatie in 's-Gravenpolder. Bron Google Maps.....	13
Afbeelding 5:	De BAM-meetopstelling binnen.....	14
Afbeelding 6:	De BAM-meetopstelling buiten.....	14
Afbeelding 7:	De PM2.5 sharp cut cyclone.....	15

Afbeelding 8: De nozzle (boven) en kruisvormige vane (onder).....	15
Afbeelding 9: Filter spots met aerosol.....	18
Afbeelding 10: Locatie LML-station Sluiskil (bron: Google Maps).....	20
Afbeelding 11: Locatie LML-station Ossendrecht (bron: Google Maps).....	21
Afbeelding 12: De Zero Filter Calibration Kit BX-302 (foto: Met One).....	24
Afbeelding 13: Uurwaarden Blanco metingen inclusief windrichting tijdens de meting.....	24
Afbeelding 14: De BX-302 gemonteerd op de PM2.5 sharp cut cyclone.....	25
Afbeelding 15: Resultaten metingen voor bepalen BKGD volgens procedure Met One.....	25
Afbeelding 16: Aantal uurwaarden per dag van de week.....	27
Afbeelding 17: Aantal uurwaarden per uur van de dag.....	28
Afbeelding 18: Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid van de buitenlucht tijdens de metingen.....	29
Afbeelding 19: Uurwaarden PM2.5 LML-stations Sluiskil en Ossendrecht.....	30
Afbeelding 20: Correlatie uurwaarden PM2.5 LML-station Sluiskil versus Ossendrecht.....	30
Afbeelding 21: Uurwaarden PM2.5 BAM 's-Gravenpolder inclusief LML-stations.....	31
Afbeelding 22: Histogram PM2.5_Lokaal uurwaarden in 's-Gravenpolder.....	33
Afbeelding 23: CAMS-voorspelling PM2.5 16 UTC op 22 februari 2023.....	34
Afbeelding 24: Box-whisker plot PM2.5 uurwaarden over de totale meetperiode.....	35
Afbeelding 25: Box-whisker plot voor PM2.5 van de afzonderlijke maanden.....	36
Afbeelding 26: Box-whisker plot van de PM2.5_lokaal uurwaarden in 's-Gravenpolder en de PM2.5 uurwaarden van de LML-stations.....	37
Afbeelding 27: Box-whisker plot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder per dag van de week waarbij er geen houtrook is waargenomen.....	38
Afbeelding 28: Box-whisker plot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder per uur van de dag waarbij er geen houtrook is waargenomen.....	39
Afbeelding 29: Box-whisker plot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder per dag van de week waarbij er wel houtrook is waargenomen.....	39
Afbeelding 30: Box-whisker plot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder per uur van de dag waarbij er wel houtrook is waargenomen.....	40
Afbeelding 31: Windroos 's-Gravenpolder van de totale meetperiode.....	41
Afbeelding 32: Windroos Wilhelminadorp gebaseerd op de 10 minuten observaties van de totale meetperiode.....	42
Afbeelding 33: PM2.5 pollutieroos 's-Gravenpolder totale meetperiode.....	43

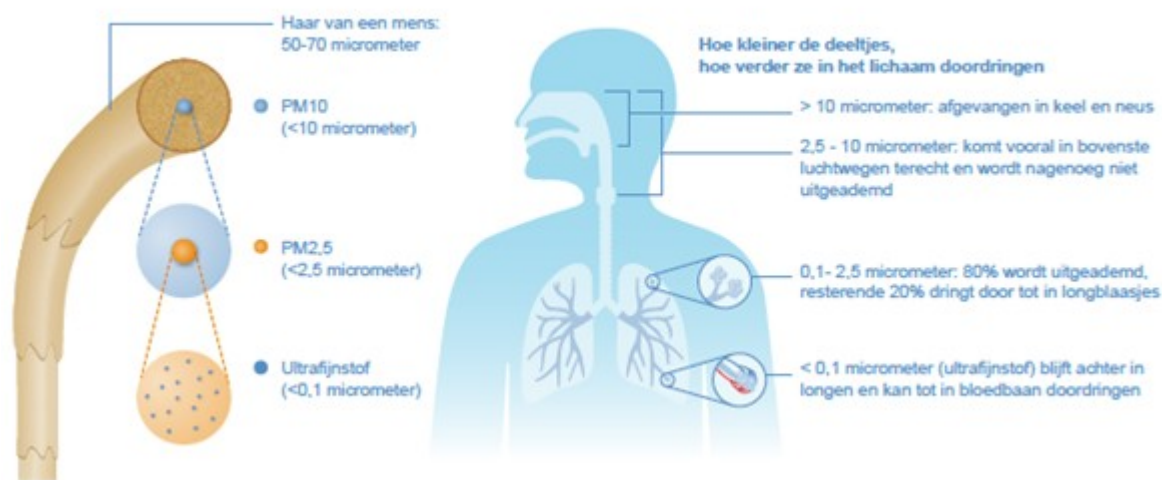
Afbeelding 34: Contour plot PM2.5 's-Gravenpolder van de totale meetperiode.....	44
Afbeelding 35: Pollutieroos PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder totale meetperiode.....	45
Afbeelding 36: Contourplot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder totale meetperiode.....	45
Afbeelding 37: Uurwaarden PM2.5 BAM & LML voor scenario: Houtrook NEE.....	47
Afbeelding 38: Uurwaarden PM2.5 BAM & LML voor scenario: Houtrook JA.....	48
Afbeelding 39: Box-Whisker plot van de metingen waarbij houtrookgeur is waargenomen.....	49
Afbeelding 40: Box-Whisker plot van de metingen waarbij geen houtrookgeur is waargenomen.	50
Afbeelding 41: Box-Whisker plot van de uurwaarden waarbij lichte houtrookgeur is waargenomen.....	52
Afbeelding 42: Box-Whisker plot van de uurwaarden waarbij matige houtrookgeur is waargenomen.....	52
Afbeelding 43: Box-Whisker plot van de uurwaarden waarbij sterke houtrookgeur is waargenomen.....	53
Afbeelding 44: BAM 1020 filter spots van diverse meetsessies.....	55
Afbeelding 45: Controlekaart Count Test van de detector.....	58
Afbeelding 46: Controlekaart interne referentie membraan.....	58

Tabellenregister

Tabel 1: Factory Calibration Settings van de BAM 1020.....	19
Tabel 2: Resultaten bepaling BKGD volgens de alternatieve (Blanco) methode ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	24
Tabel 3: Overzicht resultaten uurwaarden PM2.5 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26
Tabel 4: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met houtrookgeur (Houtrook:JA).....	48
Tabel 5: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met houtrookgeur (Houtrook:NEE).....	49
Tabel 6: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met intensiteit waargenomen lichte houtrookgeur.....	51
Tabel 7: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met intensiteit waargenomen matige houtrookgeur.....	51
Tabel 8: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met intensiteit waargenomen sterke houtrookgeur.....	51

1 Voorwoord

De laatste jaren is er veel media-aandacht voor houtrook. Houtrook kan het woongenot en de gezondheid van burgers aanzienlijke schade toebrengen. Er is vooralsnog beperkt gericht onderzoek verricht naar de emissie van houtrook in de woonomgeving. Het doel van dit onderzoek is te bepalen wat de bijdrage is aan fijnstof PM2.5 in de woonomgeving, afkomstig van particuliere houtstook. Er is gekozen voor fijnstof PM2.5, omdat deze deeltjes kleiner zijn dan PM10 en daardoor verder het lichaam kunnen binnendringen en schade kunnen aanrichten. In de infographic van afbeelding 1 is meer informatie te vinden over fijnstof.



Afbeelding 1: Infographic fijnstof (bron: RIVM)

Volgens Emissieregistratie¹ is particuliere houtstook de belangrijkste uit Nederland afkomstige bron van primair of rechtstreeks uitgestoten PM2.5 en bedraagt 23% in 2021 en 25% in 2022. Deze bijdrage is meer dan verkeer, vervoer of industrie. Als gevolg van de hoge gasprijzen zijn burgers in het stookseizoen 2022-2023 meer hout gaan stoken en is de bijdrage aan fijnstof PM2.5 hoogstwaarschijnlijk nog hoger geworden.

Tallose onderzoeken hebben aangetoond, dat houtrook schadelijk is voor onze gezondheid. Het RIVM informeert de burgers over de schadelijke effecten van houtrook op haar website². Een recent Nederlands onderzoek³, uitgevoerd door de Universiteit Utrecht, TNO, GGD Amsterdam en RIVM, heeft aangetoond, dat er significante gezondheidseffecten bestaan, veroorzaakt door houtrook in de woonomgeving.

De impact van houtkachels op de lokale luchtkwaliteit kan extreem zijn daar er naast fijnstof nog vele andere giftige en kankerverwekkende stoffen worden uitgestoten waaronder de Polycyclische-Aromatische-Koolwaterstoffen (PAK).

Er is gekozen het onderzoek uit te voeren in een woonomgeving waar circa 50% van de bewoners het huis (bij)verwarmt met een houtgestookt toestel, dat kan zijn een open haard, houtkachel of

¹ <https://www.emissieregistratie.nl/onderwerpen/condenseerbaar-fijnstof>

² <https://www.rivm.nl/houtrook>

³ <https://www.rivm.nl/documenten/samenvatting-samenwerking-houtrookonderzoek>

pelletkachel. Een dergelijke situatie is aanwezig in 's-Gravenpolder in de provincie Zeeland. De fijnstof PM2.5 metingen zijn uitgevoerd met een BAM 1020⁴ (Bèta Attenuation Monitor) van Met One. Dit betreft een professionele monitor en is vele jaren in gebruik geweest en gedeeltelijk nog steeds in gebruik bij o.a. RIVM en DCMR.



Afbeelding 2: De BAM 1020 van Met One

Bewustwording

Dit onderzoek is uitgevoerd door burgerwetenschappers. De resultaten van dit onderzoek zijn voornamelijk bedoeld om de bewustwording van burgers, overheid en politiek te vergroten. Veel burgers zijn zich er nog steeds niet van bewust, dat particuliere houtstook een belangrijke bron is van (lokale) luchtvervuiling. Het is belangrijk dat maatregelen die vanuit het Schone Lucht Akkoord genomen worden, teneinde de luchtkwaliteit in Nederland te verbeteren, zich meer richten op particuliere houtstook. Wij hopen dat de resultaten van dit onderzoek daartoe een bijdrage leveren.

Over Scapeler

Scapeler is een particulier initiatief welk zichzelf als doel heeft gesteld om kennis en kunde in te zetten voor een schone leefomgeving met focus op luchtkwaliteit. Onafhankelijkheid is daarbij een belangrijk gegeven. Met passie bewandelen we nieuwe wegen waarbij vele experimenten ons leiden naar nieuwe inzichten welke ons bewust maken van de kwetsbaarheid van het geheel. Die bewustwording proberen we over te dragen aan anderen in verwachting daarmee veranderingen op gang te kunnen brengen die bijdragen aan het doel, schone lucht en gezonde leefomgeving.

⁴ <https://metone.com/products/bam-1020/>



Afbeelding 3: André van der Wiel (rechts) en Dieter Pientka (foto: Marleen Pientka)

Dank je wel!

Wij willen graag onze speciale dank laten uitgaan naar Ed van der Gaag van de Dienst Centraal Milieubeheer Rijmond (DCMR). Ed heeft ons in november 2022 de Met One BAM1020 geschonken en daar zijn we ontzettend blij mee. Daarnaast heeft hij ons voorzien van adviezen en wijze raad. Zonder Ed had dit onderzoek nooit gerealiseerd kunnen worden.

Wij willen graag de afdeling Samenmeten van het RIVM bedanken dat ze in maart 2023 een blog⁵ over ons project op hun website hebben geplaatst. Het is fijn, dat Samenmeten interesse heeft getoond en dat heeft ons gesteund.

Wij willen graag Art van der Pelt van GGD Zeeland bedanken voor de interesse die hij heeft getoond voor het project. Hij heeft ons in de gelegenheid gesteld om in maart 2023 een presentatie te geven van de voorlopige resultaten. Het is fijn, dat GGD Zeeland interesse heeft getoond en dat heeft ons gesteund.

Wij willen graag Jordy Vercauteren en Frans Fierens van de Vlaamse Milieu Maatschappij (VMM) en Inge Everhardus van Stichting Houtrookvrij bedanken voor hun waardevolle bijdrage in de beoordeling van het rapport.

⁵ <https://samenmeten.nl/nieuws/meetlocatie-s-gravenpolder-uitgerust-met-professionele-fijnstofmonitor>

2 Samenvatting

Er is onderzoek verricht naar de bijdrage van fijnstof PM2.5 afkomstig van particuliere houtstook in een woonomgeving. Er is gekozen voor een meetlocatie in 's-Gravenpolder waar de houtkachel nog veel wordt gebruikt voor (bij)verwarming van de woning. Het onderzoek is uitgevoerd in het stookseizoen 2022-2023 in de periode november 2022 tot en met mei 2023. In totaal zijn er 400 metingen verricht in de vorm van uurwaarden. Tijdens de metingen is bepaald of er buiten houtrook was te ruiken en wat hiervan de intensiteit is geweest. Van de 400 uurwaarden zijn er 273 uurwaarden gemeten (68.3%) waarbij er houtrook was te ruiken en zijn er 127 uurwaarden gemeten (31.7%) waarbij er géén houtrook was te ruiken in de omgeving van de meetlocatie. De focus van het onderzoek gaat uit naar de verhoging in de concentratie PM2.5 als er in de omgeving van de meetlocatie hout wordt gestookt.

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van de Met One BAM 1020, een officiële analyzer die PM2.5 of PM10 kan meten in de buitenlucht. De BAM 1020 werd en wordt nog steeds gebruikt op luchtkwaliteit stations van de DCMR, RIVM en omgevingsdienst Midden- en West-Brabant. De BAM 1020 wordt op deze stations gebruikt voor het meten van uurwaarden. Dit onderzoek heeft zich beperkt tot PM2.5, omdat de kleinere deeltjes meer schade kunnen toebrengen aan de gezondheid van de mens. Als achtergrondlocaties zijn de meetstations Sluiskil en Ossendrecht van het Landelijk Meetnetwerk Luchtkwaliteit gebruikt.

Op basis van de 400 uurwaarden blijkt, dat particuliere houtstook een bijdrage levert van 50% aan de totale fijnstofconcentratie PM2.5 in de buitenlucht, wanneer er in de omgeving van de meetlocatie hout werd gestookt en de aanwezigheid van houtrookgeur is waargenomen. De hoogste uurwaarden van $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zijn gemeten op 17 december 2022 en 14 februari 2023, waarbij op 14 februari 2023 een matige tot sterke houtrookgeur is waargenomen. Er was een stookalert van kracht op 16 december 2022 en 14 februari 2023. Het beoogde doel van het stookalert, namelijk het voorkomen van houtrook overlast bij ongunstige atmosferische omstandigheden, lijkt op 14 februari 2023 niet doeltreffend te zijn geweest.

Naast de procentuele bijdrage van particuliere houtstook aan de totale fijnstofconcentratie PM2.5 in de buitenlucht, is onderzocht of er een verband aanwezig is tussen de toename van de fijnstofconcentratie en de waargenomen intensiteit van de houtrookgeur. Op basis van de 400 uurwaarden blijkt er een toename te zijn in de bijdrage van particuliere houtstook van 50% naar 57% van de totale fijnstofconcentratie PM2.5 in de buitenlucht indien de waargenomen houtrookgeur intensiteit toeneemt van licht tot matig of sterk.

Dit onderzoek is uitgevoerd gedurende een relatief zachte winter. De waargenomen impact van houtstook op de fijnstof belasting van de omgevingslucht zal mogelijk voor een koude of strenge winter hoger kunnen zijn.

De resultaten van dit onderzoek benadrukken het belang van bewustwording en beheersing van de impact van particuliere houtstook. In de woonomgeving kan particuliere houtstook, vanwege het lokale karakter, een grote impact veroorzaken op de luchtkwaliteit en dus ook op de gezondheid en welzijn van de burgers. Op basis van landelijke jaargemiddelde concentraties fijnstof PM2.5 is er een reële kans, dat lokale effecten worden onderschat. De resultaten van dit onderzoek hebben dit bevestigd.

3 Meetlocatie 's-Gravenpolder

De meetlocatie is gevestigd in 's-Gravenpolder in de nabijheid van een NNW-ZZO gerichte straat met aan beide zijden bebouwing. Deze straat kan bij bepaalde windrichtingen fungeren als een straat canyon. In deze straat en in de omgeving van deze straat zijn houtkachels actief op alle windrichtingen. Binnen een straal van circa 125 meter zijn 20 houtkachels gesitueerd, waarvan er 11 in gebruik zijn voor de dagelijkse (bij) verwarming van het huis. De meest actieve houtkachels zijn gesitueerd in de windrichting tussen noord en noordoost en tussen zuidoost en zuidwest.

De locatie van 's-Gravenpolder is weergegeven op de kaart van afbeelding 4.



Afbeelding 4: Plattegrond met meetlocatie in 's-Gravenpolder. Bron Google Maps

4 De meetopstelling

De BAM 1020 (serie nummer K1186, fabricage maart 2010, hierna genoemd "BAM") is geïnstalleerd in de garage aan de noordkant van een 2/1-kap woning. De meetopstelling is niet in een professionele setting operationeel. De uurwaarden met deze opstelling zijn verkregen onder gestandaardiseerde procedures en condities. De meetopstelling is echter niet onder controle van een geaccrediteerde organisatie.

De PM2.5 meetkop is 125 cm boven het platte bitumen dak van de garage gemonteerd op de bemonsteringsbuis die door het platte dak heen op de analyzer is aangesloten. De totale hoogte van de meetkop ten opzichte van het maaiveld komt hiermee op 375 cm. De opstelling is geschikt gemaakt voor het meten van PM2.5. Nabij de meetkop is een sensor (Met One BX-592) gemonteerd in een sensorhut voor registratie van de buitentemperatuur. De BAM inclusief meetkop, meetbuis en overige benodigheden zijn in goede staat geschonken door DCMR Rijnmond. De GAST Rotary Vane pump model 0523 is in februari 2020 gereviseerd door DCMR. De gebruikte glass fiber filter tape is afkomstig van Met One met artikelnummer 460130. Om warmteverlies te voorkomen is de smart heater inclusief 0.5 meter van de bemonsteringsbuis geïsoleerd met schuimrubber foam. De complete opstelling is in onderstaande afbeeldingen 5 en 6 weergegeven.



Afbeelding 5: De BAM-meetopstelling binnen



Afbeelding 6: De BAM-meetopstelling buiten

5 Voorbereiden van de BAM 1020

De meetopstelling was geruime tijd niet operationeel geweest waardoor stof en vuil zich heeft kunnen afzetten op de onderdelen in het systeem.

De inlet head (Met One BX-802) is volledig gedemonteerd en grondig gereinigd. De PM2.5 sharp cut cyclone (Met One BX-807, afbeelding 7) is volledig gedemonteerd en grondig gereinigd.

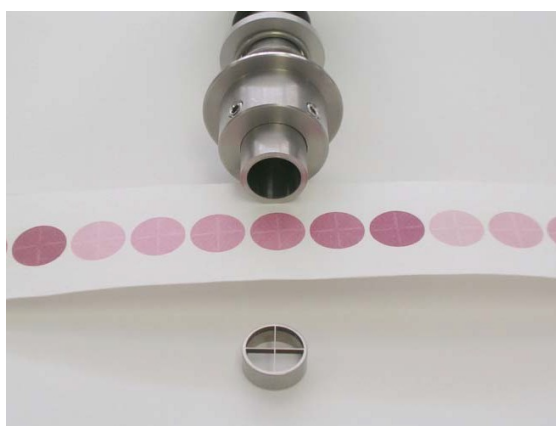


Afbeelding 7: De PM2.5 sharp cut cyclone

De vane chamber van de vacuümpomp is gedemonteerd en de onderdelen zijn gereinigd. De onderdelen van de pomp waren licht vervuild en het was niet nodig om onderdelen te vervangen.

De bemonsteringspijp is aan de binnenzijde gereinigd.

Kritische onderdelen van de analyzer zijn gereinigd zoals de nozzle, vane en geleidingsrollen van het filtertape transportsysteem (afbeelding 8).



Afbeelding 8: De nozzle (boven) en kruisvormige vane (onder)

Het filtertape transportsysteem is gecontroleerd op functionaliteit en goed bevonden.

De gehele meetopstelling is gecontroleerd op lektheid en goed bevonden.

De flow van de analyzer is gecontroleerd of deze voldoet aan de eis van 16.7 l/min +/- 5% en is goed bevonden.

De bèta detector is gecontroleerd op gevoeligheid, deze moet voldoen aan de vier-minuten-telling van minimaal 600K counts en maximaal 1000K counts. De gevoeligheid is goed bevonden.

De inlet heater is gecontroleerd op functionaliteit en is goed bevonden.

De interne filter temperatuursensor van de BAM is gecontroleerd m.b.v. een externe temperatuursensor (Bosch BME 280). De aangegeven temperatuur van de BAM-sensor moet binnen 1°C afwijking liggen t.o.v. de externe sensor. De BAM-temperatuur sensor is goed bevonden.

De nauwkeurigheid van het gehele meetsysteem is gecontroleerd met het interne referentiemonster ("span membrane mass filter") en moet voldoen aan de waarde zoals deze is bepaald door Met One. De fabriekswaarde bedraagt 0.795 mg/cm² en na controle bleek het meetsysteem te voldoen aan de eis (0.795 mg/cm² +/- 5%).

De BAM is voor een week geconditioneerd zodat alle onderdelen goed op temperatuur konden komen. Voordat de uurwaarden zijn gebruikt voor dit onderzoek heeft de BAM meerdere dagen gemeten en is er gewacht totdat de resultaten stabiel bleken te zijn.

6 Meetprocedure

De BAM is geconfigureerd voor het meten van PM2.5 met een meetcyclus van één uur. Aan het einde van de meetcyclus wordt het gehalte aan PM2.5 in de buitenlucht berekend en weergegeven op het beeldscherm (de uurwaarde). De uurwaarde van bijvoorbeeld 12 uur betreft de meetcyclus van 11 tot 12 uur. PM2.5 staat voor "Particulate Matter 2.5" en omvat de concentratie van deeltjes, met een diameter kleiner dan 2.5 µm, in de lucht. De eenheid van PM2.5 is µg/m³. De meetopstelling is uitgerust met een sharp cyclone cutter, geplaatst tussen de inlet head en de monsterbuis en laat uitsluitend deeltjes door met een diameter kleiner dan 2.5 µm.

De meetcyclus omvat de volgende stappen:

1. Minuut 0 : gedurende 8 minuten wordt er een blanco bepaling van een schone filterspot uitgevoerd (I_0 counts).
2. Minuut 8 : gedurende 42 minuten wordt er m.b.v. de vacuümpomp lucht door dezelfde filterspot gezogen met een snelheid van 16.7 L/min.
3. Minuut 50 : de filterspot met deeltjes wordt tussen de (14C) bèta bron en de detector geplaatst. De detector meet gedurende 8 minuten het aantal bètadeeltjes dat door de filterspot met deeltjes gaat (I_1).
4. Minuut 58 : op basis van de waarden voor I_0 en I_1 wordt de massa (µg) aan deeltjes op de filterspot berekend. Op basis van de hoeveelheid luchtmonster (42 min x 16.7 L/min = 701.4 L) en de massa aan deeltjes wordt de concentratie PM2.5 in µg/m³ berekend.
5. Minuut 60 : de meetwaarde wordt bewaard in het geheugen van de BAM en weergegeven op het beeldscherm. Er wordt een nieuwe verse filterspot gereed gemaakt voor de blanco bepaling van de volgende meetcyclus.

Gedurende de 42 minuten periode dat er buitenlucht door het systeem wordt getransporteerd, is de BAM beschikbaar om het interne referentiemonster te analyseren ("span membrane check"). Bij het weergegeven van het PM2.5 meetresultaat wordt tevens het resultaat van het interne referentiemonster gepresenteerd. Het resultaat van het interne referentiemonster is bijgehouden in een controlekaart. Middels deze controlekaart is de nauwkeurigheid van het meetsysteem gedurende de gehele meetperiode gemonitord. Er zijn geen afwijkingen geconstateerd.

Een andere belangrijke parameter is de count-test van de bèta detector. De count-test geeft de gevoeligheid aan van de bèta detector. De count-test is elke week uitgevoerd en de resultaten zijn verwerkt in een controlekaart. Er zijn geen afwijkingen geconstateerd.

De controlekaart voor het interne referentie membraan en de count-test zijn weergegeven in bijlage 1.

6.1 Meetprincipe en berekening

Het principe waarmee de BAM zijn meting uitvoert is gebaseerd op absorptie van bètastraling. De absorptie van bètastraling door materie kan worden beschreven door de volgende vergelijking:

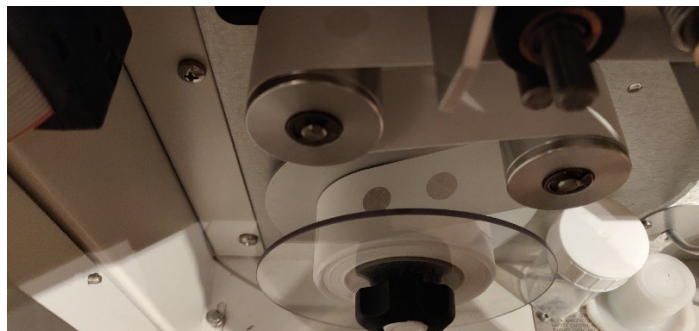
$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\mu M}{S}\right)$$

In deze relatie worden de volgende parameters gebruikt:

- I_0 : bètastralingsflux door de blanco filterspot (counts)
- I : bètastralingsflux door de met aerosol beladen filterspot (counts)
- M : de massa van de aerosol op de beladen filterspot (mg)
- S : het oppervlak van de filterspot (cm²)
- μ : absorptie coëfficiënt (cm²/mg)
- \exp : de macht van het natuurlijke getal e

Het aantal bètadeeltjes dat door materiaal, zoals de aerosol op een filter, wordt geabsorbeerd, neemt exponentieel af met de massa waar de bètadeeltjes doorheen gaan. De absorptie van bètadeeltjes is bij benadering niet afhankelijk van de chemische samenstelling van de deeltjes, maar alleen van de massadichtheid van de deeltjes op de filterspot.

De oppervlakte van de filterspot S is bij benadering ook een constante en is bepaald door de oppervlakte van de nozzle. De absorptie coëfficiënt is een constante (0.304 cm²/g) en is empirisch bepaald op een referentie BAM bij Met One. Middels bovenstaande relatie kan vervolgens de massa van de aerosol op de filterspot berekend worden.



Afbeelding 9: Filter spots met aerosol

Het volume aan doorgeleide lucht is bekend (circa 700 liter). Nu kan de concentratie aan aerosol in de lucht berekend worden volgens onderstaande vergelijking:

$$C = k \frac{m}{V} + BKGD$$

Waarbij geldt:

- C : concentratie aerosol in de lucht (mg/m³)
- V : volume van doorgeleide lucht (m³)
- m : massa aerosol op de filter spot (mg)
- k : correctiefactor (dimensieloos)
- BKGD : background correctie (mg/m³)

Normaal gesproken wordt het gehalte aan PM2.5 uitgedrukt in µg/m³. De BAM gebruikt voor de BKGD de eenheid mg/m³. Het eindresultaat kan worden weergegeven in µg/m³, waarbij geldt:

$$1 \text{ mg/m}^3 = 1000 \text{ µg/m}^3$$

De correctiefactor k is bepaald door Met One en is analyzer specifiek. De waarde voor k is empirisch bepaald door de BAM te vergelijken met een referentie BAM. De background correctie is bepaald door meting van lucht waarbij de aerosol is verwijderd met behulp van een HEPA filter.

De "Factory Calibration Settings", zoals opgegeven door Met One en geldig voor de BAM gebruikt in dit onderzoek zijn weergegeven in tabel 1

Tabel 1: Factory Calibration Settings van de BAM 1020

Parameter	Waarde	Omschrijving
K	0.976	Correctiefactor
BKGD	-0.0020 mg/m ³	Concentratie offset
ABS	0.795 mg/cm ²	Referentie massa dichtheid
µ	0.304 cm ² /mg	Absorptiecoëfficiënt
Cv	1.000	Variatiecoëfficiënt flow sensor
Q0	0.000 L/min	Nul correctie flow sensor

De BAM heeft een detectielimiet van 4 µg/m³ voor de meetcyclus van één uur. Uurwaarden kleiner dan 4 µg/m³ hebben een hogere onzekerheid. De reproduceerbaarheid of tussen-instrument-onzekerheid (R) van de BAM bedraagt 5 µg/m³ voor de meetcyclus van één uur. De reproduceerbaarheid is gebaseerd op sigma $\sigma = 1.8 \text{ µg/m}^3$ voor de meetcyclus van één uur (BAM-1020-9800-Manual-Rev-W). De berekening van de reproduceerbaarheid kan dan uitgevoerd worden met onderstaande vergelijking.

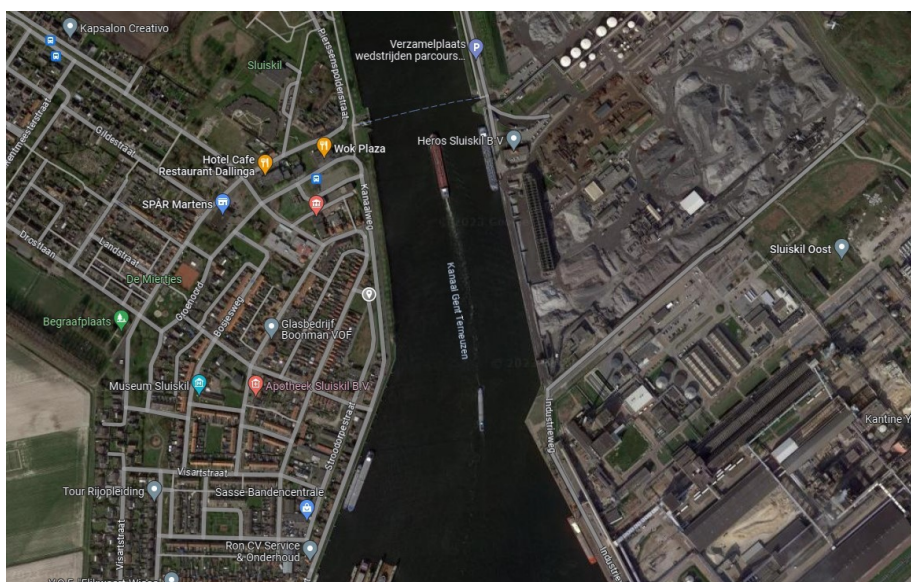
$$R = 1.96 \times \sqrt{2} \times \sigma = 1.96 \times 1.41 \times 1.8 = 5.0 \text{ µg/m}^3$$

Deze vergelijking geldt voor $N = \infty$ en voor het 95% betrouwbaarheidsinterval. Het maximale toegestane verschil in het meetresultaat tussen twee BAM-analysers, met een waarschijnlijkheid van 95%, mag 5.0 µg/m³ bedragen. Er is nog 5% kans, dat het verschil > 5 µg/m³ zal zijn.

7 LML Stations Sluiskil & Ossendrecht

Voor dit onderzoek zijn meetgegevens gebruikt van twee stations uit het Landelijk Meetnetwerk Luchtkwaliteit⁶ (LML). De uurwaarden voor PM2.5 van LML-station Ossendrecht en Sluiskil zijn, net zoals de uurwaarden voor 's-Gravenpolder, gebaseerd op uur gebaseerde metingen. Er zijn geen LML-stations dichterbij 's-Gravenpolder waar PM2.5 wordt gemeten. Sluiskil ligt hemelsbreed 20.5 km ten zuidzuidwesten van 's-Gravenpolder en Ossendrecht ligt hemelsbreed 30.1 km ten oostzuidoosten van 's-Gravenpolder. De uurwaarden van de LML-stations zijn gebruikt om de achtergrondconcentratie te bepalen, waarbij wordt aangenomen dat deze representatief zijn voor 's-Gravenpolder. Hier wordt nader op ingegaan bij de bespreking van de resultaten.

De locatie van het LML-station in Sluiskil is weergegeven op de kaart van afbeelding 10 (grijs rondje met witte druppel).



Afbeelding 10: Locatie LML-station Sluiskil (bron: Google Maps)

Het station is geplaatst nabij de Stroodorpsestraat in een grasveld en wordt beheerd door de DCMR. Het betreft een omgeving met bebouwde kom, maar ook de aanwezigheid van industrie ten oosten van Sluiskil en scheepvaart op het kanaal van Gent naar Terneuzen.

⁶ <https://www.luchtmeetnet.nl/>

De locatie van het LML-station in Ossendrecht is weergegeven op de kaart van afbeelding 11 (grijs rondje met witte druppel).



Afbeelding 11: Locatie LML-station Ossendrecht (bron: Google Maps)

Het station is geplaatst nabij de Burgemeester Voetenstraat en De Looijen in een grasveld en wordt beheerd door de omgevingsdienst midden- en west Brabant. De locatie is aan de rand van het dorp.

Op station Sluiskil wordt de Palas Fidas 200 gebruikt voor de meting van PM_{2.5}. Op station Ossendrecht wordt de BAM 1020 gebruikt. Het meetprincipe van de Palas Fidas 200 is op basis van deeltjes telling en dus afwijkend van de BAM 1020.

8 Resultaten & Discussie

8.1 Software

De statistische analyses en de visualisaties van de meetgegevens zijn uitgevoerd met R studio⁷ (Posit Software, PBC), R (The R Foundation)⁸ en The Unscrambler⁹ versie 10.3 (AspenTech). The Unscrambler 10.3 is van origine uitgegeven door CAMO, Oslo, Noorwegen. AspenTech heeft CAMO overgenomen per november 2020. De Box-Whisker plots zijn gemaakt met behulp van Excel.

8.2 Database met uurwaarden en waarnemingen

Het onderzoek is in het stookseizoen uitgevoerd, daar in deze periode de meeste houtrook aanwezig is afkomstig van particuliere houtstook. De meetperiode is vastgesteld voor de periode 13 november 2022 t/m 23 mei 2023. Een "normaal" stookseizoen in 's-Gravenpolder loopt van circa 15 september t/m 15 mei. Er kon helaas niet eerder worden gestart met meten, omdat de BAM pas in november 2022 operationeel kon worden gemaakt. Er is besloten de BAM niet continu te laten meten, omdat er anders geluidsoverlast (80 dB op één meter afstand) zou ontstaan, veroorzaakt door de vacuümpomp. Er zijn géén metingen uitgevoerd in de nachtelijke uren. De metingen zijn voor zover mogelijk dagelijks uitgevoerd op verschillende tijdstippen en bij voorkeur volgens een meetserie van drie t/m zes aaneengesloten uren. Er zijn meetmomenten gekozen waarbij er in de omgeving hout werd gestookt en momenten waarbij er géén hout werd gestookt. Op de meetlocatie wordt ook fijnstof gemeten met diverse fijnstofsensoren. De gegevens van de fijnstofsensoren zijn niet ondergebracht in de database, maar zijn wel indicatief gebruikt, samen met de geurwaarnemingen, voor het vaststellen van de aanwezigheid van houtrook rondom de meetlocatie. Fijnstofsensoren zijn niet zo nauwkeurig als de BAM, maar kunnen wel worden gebruikt voor het vaststellen van de indicatieve fijnstofconcentratie in de buitenlucht. Een ander groot voordeel is, dat de sensoren met een hoge tijdsresolutie kunnen meten.

Er is een database samengesteld waarin alle uurwaarden van de BAM zijn ondergebracht inclusief de uurwaarden van de LML-stations Sluiskil en Ossendrecht. Daarnaast zijn ook de meteogegevens tijdens de meetcyclus geborgd.

Het gaat hierbij om de volgende gegevens:

1. PM2.5 van de BAM in 's-Gravenpolder
2. Temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en luchtdruk van de buitenlucht tijdens de meetcyclus in 's-Gravenpolder
3. Windrichting en windkracht tijdens de meetcyclus in 's-Gravenpolder
4. PM2.5 van het LML-station Sluiskil en Ossendrecht van dezelfde meetmomenten als de BAM in 's-Gravenpolder

⁷ <https://posit.co/products/open-source/rstudio/>

⁸ <https://www.r-project.org/>

⁹ <https://www.aspentech.com/en/acquisition/camo-analytics>

De genoteerde windrichting geldt per 22.5°, dat betekent dus een richting uit N, NNO, NO, ONO, O, OZO, ZO, ZZO, Z, ZZW, ZW, WZW, W, WNW, NW of NNW. De windkracht is primair genoteerd in Beaufort en voor gebruik in de windroos, pollutieroos en contourplot omgezet in m/s.

De uurwaarden voor PM2.5 van de BAM zijn afgerond op gehele getallen, omdat de uurwaarden van de LML-stations ook op gehele getallen worden gerapporteerd. De meteogegevens voor 's-Gravenpolder zijn overgenomen van de website van het KNMI met de 10-minuten waarnemingen en gelden in principe voor Wilhelminadorp. Wilhelminadorp ligt hemelsbreed 7.8 km ten noorden van 's-Gravenpolder. Er is aangenomen, dat de meteogegevens van Wilhelminadorp representatief zijn voor 's-Gravenpolder.

Naast uurwaarden zijn ook visuele- en geur-waarnemingen bijgehouden in een logboek. Deze waarnemingen zijn uitgevoerd tijdens de meetcyclus van de BAM. Het gaat hier om de volgende waarnemingen:

1. Is de geur van houtrook waargenomen (ja/nee)?
2. Wat was de intensiteit van de waargenomen houtrookgeur (licht/matig/sterk)?
3. Is er visueel houtrook zichtbaar (ja/nee)?
4. Blanco meting (ja/nee; zie uitleg onder 8.3)
5. Overige bijzondere waarnemingen

De geur van houtrook is met de menselijke neus waargenomen in de nabije omgeving van de meetlocatie. Hierbij is gedurende de meetcyclus een aantal keren een geurwaarneming verricht. De beleving van de intensiteit van de geur is subjectief en moet worden gezien als een indicatieve waarneming. In het geval er duidelijk te onderscheiden rook zichtbaar is geweest uit een schoorsteen, in de richting naar de meetlocatie geblazen, is dit geregistreerd. De schoorsteen kan dichtbij zijn, bijvoorbeeld van de naaste burens en dan zal de intensiteit van de geur sterker zijn. Het kunnen ook meerdere schoorstenen zijn geweest waar rook uit kwam geblazen in de richting van de meetlocatie (cumulatief effect). In het geval er overige bijzondere waarnemingen zijn geweest, die een invloed zouden kunnen hebben gehad op de uurwaarden, is dit vermeld in het logboek. Een voorbeeld van een bijzondere waarneming is een afwijkende bron van fijnstof in de omgeving van de meetlocatie zoals bijvoorbeeld het slijpen van tegels.

8.3 Background meting en alternatieve methode

Bij de beschrijving van het meetprincipe is uitgelegd, dat de concentratie aan fijnstof in de lucht wordt berekend met de volgende vergelijking:

$$C = k \frac{m}{V} + BKGD$$

De background (BKGD) is de systematische afwijking van de BAM en de waarde kan positief of negatief zijn. De procedure voor het uitvoeren van de background meting is bepaald door Met One en zal hier beknopt worden besproken. Voor het bepalen van de BKGD moet de PM2.5 inlet head worden verwijderd en worden vervangen door de zogenaamde "Zero Filter Calibration Kit". Deze kit bevat een 0.2 µm HEPA-filter waardoor de lucht wordt aangezogen. Alle deeltjes met een diameter ≥ 0.2µm worden door het HEPA-filter tegengehouden en worden dus niet gemeten. Op

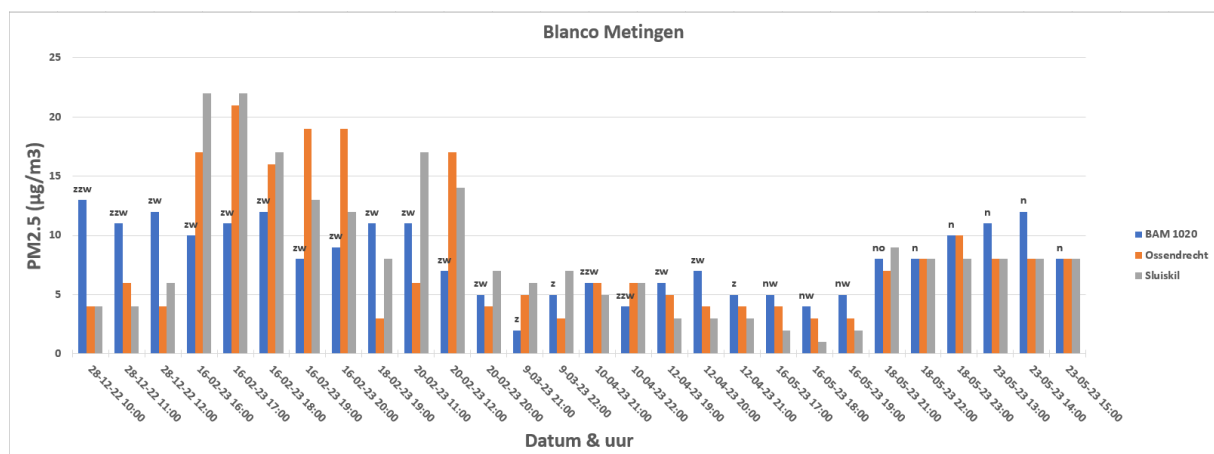
basis van minimaal 72 uurwaarden wordt de BKGD berekend en moet voldoen aan de door Met One gestelde criteria.

Tijdens de meetperiode was er niet de beschikking over de BX-302 en is de waarde voor de BKGD volgens een alternatieve methode bepaald ("Blanco meting"). Op verschillende dagen in verschillende maanden zijn uurwaarden verzameld waarbij met grote zekerheid is vastgesteld, dat er geen sprake was van houtstook in de heersende windrichting naar de meetlocatie gericht en dat tevens de geur van houtrook niet is waargenomen. De aanname is, dat er dan uitsluitend de achtergrondwaarde wordt bepaald.



Afbeelding 12: De Zero Filter Calibration Kit BX-302 (foto: Met One)

De uurwaarden verkregen met de BAM zijn vergeleken met de gemiddelde uurwaarden van de LML-stations Sluiskil en Ossendrecht. In totaal zijn 28 uurwaarden verzameld in de maanden december 2022 en februari, maart, april en mei 2023. In januari 2023 waren er weinig geschikte dagen aanwezig om de alternatieve methode uit te voeren. Op de meeste meetdagen was er een wind uit zuidwestelijke of noordelijke richting. De uurwaarden verkregen met de BAM inclusief de gemiddelde uurwaarden van de LML-stations zijn weergegeven in afbeelding 13, de gemiddelde resultaten zijn verwerkt in tabel 2.



Afbeelding 13: Uurwaarden Blanco metingen inclusief windrichting tijdens de meting.

In zuidwestelijke richting vanaf de meetlocatie zijn weinig dagelijkse stokers gesitueerd waardoor deze windrichting meer geschikt is voor het uitvoeren van blanco-metingen. In mei 2023 zijn de blanco-metingen uitgevoerd bij een noordelijke wind en was er geen sprake meer van houtstook in de omgeving.

Tabel 2: Resultaten bepaling BKGD volgens de alternatieve (Blanco) methode ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Aantal	Gemiddelde	Standaard-deviatie
BAM 1020	28	8.1	3.0
Sluiskil	28	8.3	5.6
Ossendrecht	28	8.1	5.6
LML Gemiddeld	28	8.2	5.3
BAM 1020-LML gemiddeld (BKGD)	28	-0.2	4.9

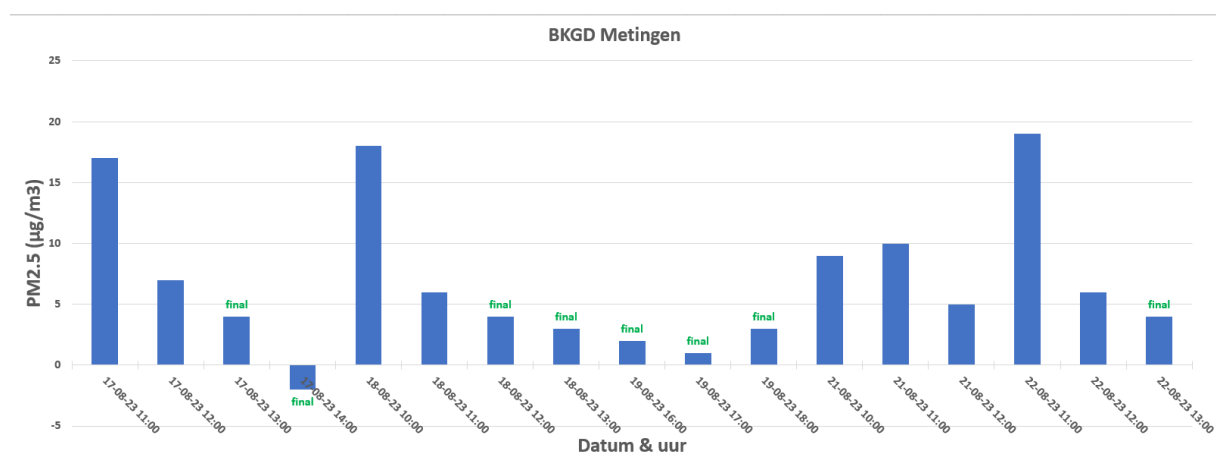
Het gemiddelde van de resultaten verkregen met de BAM, komt goed overeen met de gemiddelde resultaten van de LML-stations. Het gemiddelde verschil tussen de BAM 1020 en de LML-stations is $-0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Op basis van de Student t-test is deze waarde niet significant ($t_{\text{ber}} = 0.22$; $t_{\text{tabel},95\%}$, tweezijdig, 27 vrijheidsgraden = 2.05). Dit betekent, dat het gevonden gemiddelde verschil niet significant afwijkt van nul. De standaarddeviatie is met $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in de BAM-metingen kleiner dan de LML-stations. Dit betekent, dat er minder variatie aanwezig was in de metingen met de BAM. Op basis van deze resultaten mag worden aangenomen, dat de waarde voor de BKGD, bepaald volgens de alternatieve methode, representatief is geweest tijdens de gehele meetperiode. De alternatieve methode is echter niet volledig foutenvrij. Indien er op de LML-stations ook sprake is geweest van invloed van lokale bronnen (houtstook, industrie) dan is de aanname, dat er alleen natuurlijke achtergrondwaarden met elkaar worden vergeleken, niet juist. Beide LML-stations liggen gesitueerd in een woonomgeving en is er kans op de aanwezigheid van houtrook. Ten oosten van station Sluiskil is op een afstand vanaf 500 meter een groot industriecomplex van Yara. Bij het uitvoeren van de blanco metingen was de wind op geen enkele dag uit een oostelijke richting en mag worden aangenomen, dat de invloed van Yara geen rol heeft gespeeld op station Sluiskil.

In augustus 2023 was er wel de beschikking over de BX-302 en is de waarde voor BKGD volgens de voorgeschreven methode bepaald. Een uitzondering hierop was, dat er niet voor minimaal 72 uur achter elkaar is gemeten vanwege geluidsoverlast veroorzaakt door de vacuümpomp. Hiertoe is op verschillende dagen en tijdens drie of vier aaneengesloten uren een meting uitgevoerd waarbij de PM2.5 inlet-head is vervangen door de BX-302. Bij het uitvoeren van de praktijk metingen in de periode november 2022 t/m mei 2023 is meestal ook in reeksen van drie tot maximaal zes aaneengesloten uren gemeten en dat is dus representatief met de werkwijze voor het bepalen van de BKGD.



Afbeelding 14: De BX-302 gemonteerd op de PM2.5 sharp cut cyclone

In de periode 17 t/m 22 augustus 2023 zijn er 17 metingen verricht ten behoeve van de BKGD. Van de 17 metingen zijn er uiteindelijk 8 "final" metingen gebruikt voor de berekening. De resultaten zijn weergegeven in afbeelding 15.



Afbeelding 15: Resultaten metingen voor bepalen BKGD volgens procedure Met One

Er is een afnemende trend zichtbaar in de meetreeksen gedurende de eerste twee of drie BKGD-metingen. Dit heeft te maken met stabilisatie van het meetsysteem. Op basis van de 8 "final" metingen is de gemiddelde concentratie $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.0024 \text{ mg}/\text{m}^3$) en de standaarddeviatie $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De waarde voor de BKGD is dan de negatieve waarde van de gemiddelde concentratie en bedraagt $-0.0024 \text{ mg}/\text{m}^3$. Deze waarde komt goed overeen met de waarde bepaald door Met One volgens tabel 1.

Zowel op basis van de blanco metingen als op basis van de bepaling van de BKGD kan de conclusie worden getrokken, dat de door Met One bepaalde BKGD representatief is geweest voor de gehele meetperiode. De praktijkwaarde voor de toegepaste BKGD is niet gecorrigeerd geweest gedurende de gehele meetperiode.

8.4 De Resultaten

In totaal zijn er 400 uurwaarden gemeten in de periode van 13 november 2022 tot en met 23 mei 2023. Om de data inzichtelijk te houden, zijn de uurwaarden ingedeeld per maand. Van elke maand zijn per station het gemiddelde en de standaarddeviatie berekend. De resultaten zijn weergegeven in tabel 3.

Het aantal uurwaarden is verschillend per maand en afhankelijk geweest van de aanwezigheid van houtrook. Tijdens de periode 28 december 2022 tot en met 8 januari 2023 is er niet gemeten met de BAM.

Tabel 3: Overzicht resultaten uurwaarden PM2.5 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

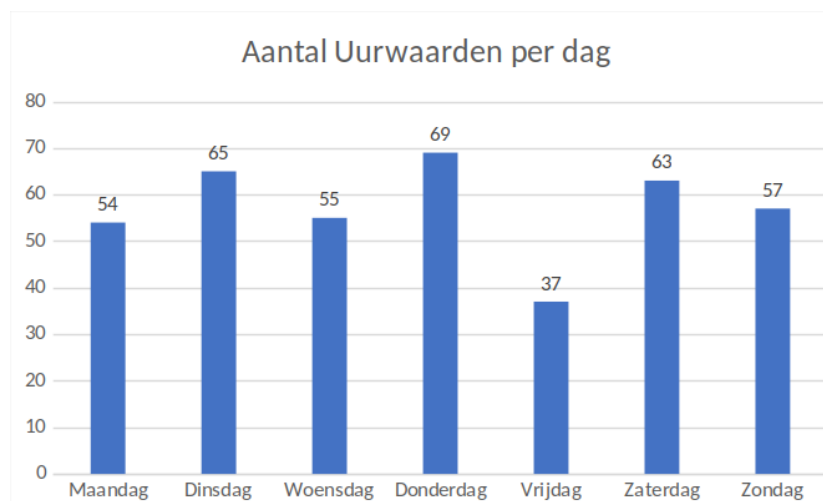
Maand	Dagen	Station	N	Houtrook		Min	Max	Gem	Stdev
				NEE	JA				
Nov'22	13-30	SGP	34	10	24	9	52	22	12
		SLK	34			3	38	14	10
		OSD	33			3	28	12	8
Dec'22	1-28	SGP	89	17	72	6	100	39	19
		SLK	89			4	67	19	11
		OSD	88			1	83	19	16
Jan'23	9-31	SGP	86	18	68	2	85	33	20
		SLK	86			0	58	13	12
		OSD	72			0	73	14	16
Feb'23	1-28	SGP	83	17	66	5	100	28	20
		SLK	83			3	62	17	15
		OSD	82			1	61	18	15
Mrt'23	2-31	SGP	65	32	33	1	41	17	10
		SLK	65			1	23	8	5
		OSD	64			1	27	7	6
Apr'23	1-27	SGP	26	16	10	1	26	11	6
		SLK	26			3	28	11	8

		OSD	26			1	16	7	4
Mei'23	3-23	SGP	17	17	0	4	41	17	12
		SLK	17			1	51	15	15
		OSD	17			3	70	20	22
Totaal	13/11-23/05	SGP	400	127	273	1	100	28	19
		SLK	400			0	67	14	12
		OSD	382			0	83	15	14

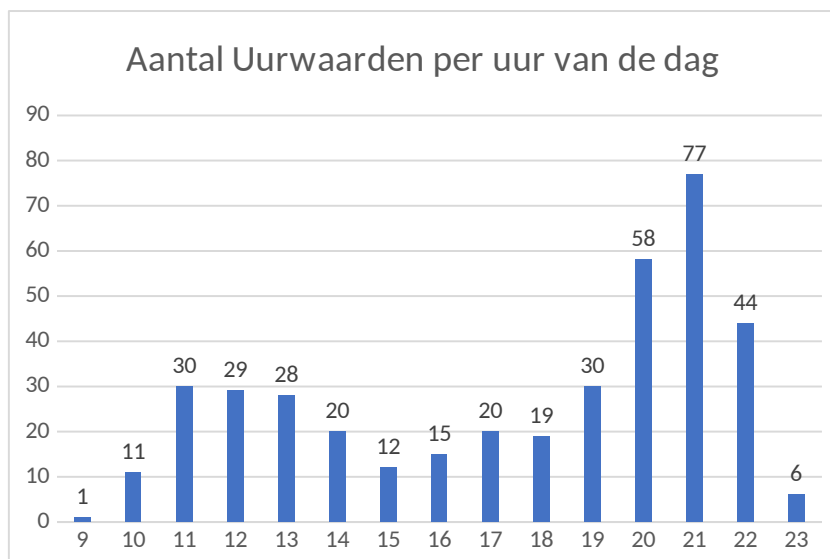
Verklaring bij tabel 3:

- Station : SGP: 's-Gravenpolder; SLK: Sluiskil; OSD: Ossendrecht
- N : Aantal uurwaarden
- Houtrook JA : Aantal uurwaarden waarbij houtrook aanwezig was in de omgeving
- Houtrook NEE: Aantal uurwaarden waarbij er geen houtrook aanwezig was in de omgeving
- Min : Minimum uurwaarde
- Max : Maximum uurwaarde
- Gem : Gemiddelde van de uurwaarden
- Stdev : Standaarddeviatie van de uurwaarden

Om inzichtelijk te maken of er voldoende variatie is geweest in de selectie van de meetmomenten is het aantal uurwaarden per dag van de week en het aantal uurwaarden per uur van de dag in onderstaande grafieken 16 en 17 weergegeven.



Afbeelding 16: Aantal uurwaarden per dag van de week



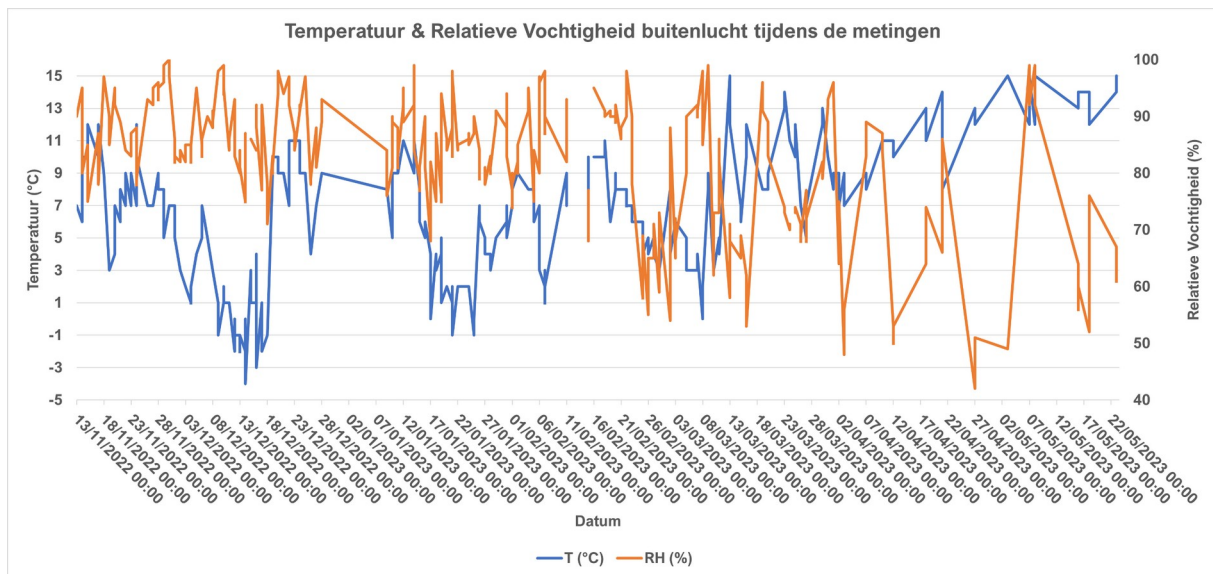
Afbeelding 17: Aantal uurwaarden per uur van de dag

De verdeling van de uurwaarden per dag van de week is vergelijkbaar, echter op de vrijdag zijn er minder uurwaarden gemeten. Gezien het hier om één dag gaat, is de aanname dat het geen significant effect heeft op de resultaten van dit onderzoek. Het aantal uurwaarden per uur van de dag is ongelijk verdeeld. Er zijn geen uurwaarden gemeten na 23u en voor 9u. De reden hiervoor is, dat de vacuümpomp gedurende deze uren geluidsoverlast veroorzaakt. In de nachtelijke uren tussen middernacht en 6u wordt er niet of nauwelijks hout gestookt in de omgeving van de meetlocatie. Dit is op basis van metingen met fijnstofsensoren bevestigd. Tussen 6u en 9u kan er op enkele locaties worden gestookt, deze locaties liggen ten zuiden van de meetlocatie. De aanname is, dat de ontbrekende uurwaarden tussen 6u en 9u geen significante impact hebben op de resultaten van dit onderzoek. Er is een maximum in de uurwaarden gemeten om 20, 21 en 22 uur. De meeste houtstook in de omgeving van de meetlocatie vindt juist plaats gedurende deze uren.

De totale meetperiode van 13 november 2022 tot en met 23 mei 2023 bestaat uit 4608 uren, dat betekent, dat er gedurende 9% van de tijd een uurwaarde is gemeten. De 400 uurwaarden moeten worden gezien als een steekproef voor de totale meetperiode. Op basis van de verdeling van de uurwaarden is de steekproef representatief geweest voor de gehele periode.

December 2022 en januari 2023 laten voor alle stations de hoogste gemiddelde uurwaarden zien. In deze maanden was er een koude periode met vorst. Bij koud winterweer wordt er meer hout gestookt dan bij zacht(er) winterweer. In afbeelding 18 zijn de koudere perioden duidelijk waar te nemen. In december 2022, januari 2023 en februari 2023 zijn de meeste uurwaarden verzameld. In deze maanden is op meer dagen hout gestookt. De winter 2022-2023 is door KNMI geclassificeerd als een zachte winter¹⁰ waarbij alleen december iets kouder was dan normaal. De koudste periode was van 12 tot en met 18 december 2022. De conclusies van dit onderzoek gelden dus voor een relatief zachte winter. De waargenomen impact van houtstook op de fijnstofbelasting van de omgevingslucht zal dus hoogstwaarschijnlijk voor een koude of strenge winter nog (veel) hoger kunnen zijn.

¹⁰ <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/2023/winter>



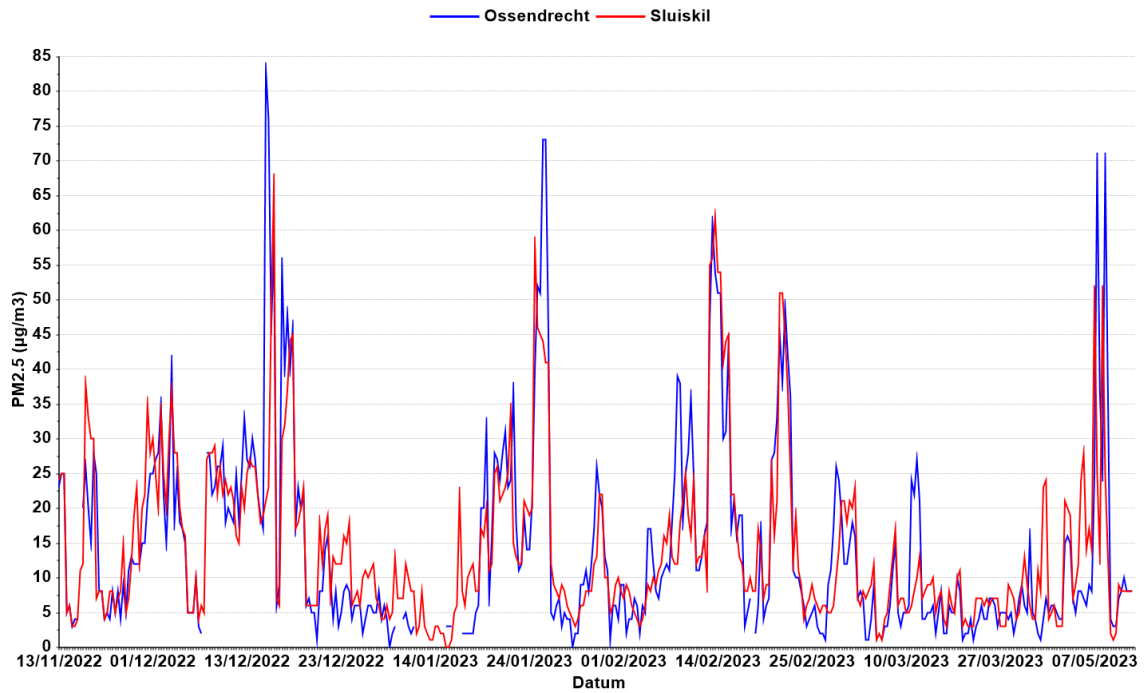
Afbeelding 18: Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid van de buitenlucht tijdens de metingen.

De hoogste uurwaarde in 's-Gravenpolder bedraagt $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en kwam voor op twee dagen, namelijk 17 december 2022 en 14 februari 2023. Op 16 december 2022 en 14 februari 2023 was er een stookalert¹¹ van kracht in Zeeland. Het is opvallend, dat juist op een dag met een stookalert tevens de hoogste uurwaarde is gemeten. Een stookalert wordt afgekondigd bij ongunstige atmosferische condities waarbij de concentratie aan fijnstof PM_{2.5} ook hoog kan zijn. Op 17 december 2022 en 14 februari 2023 stond er een zuid tot zuidoostelijke wind en was er tijdens de metingen een matige tot sterke houtrookgeur waarneembaar. Op beide dagen waren de uurwaarden op de LML-stations ook hoog, respectievelijk gemiddeld $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor Sluiskil en $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor Ossendrecht. De hoogst gemeten uurwaarde op de LML-stations was $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Ossendrecht op 14 december 2022 en $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Sluiskil op 15 december 2022. Het is opvallend, maar niet onlogisch, dat op alle stations de hoogst gemeten uurwaarde juist in de koudste periode van de winter is geweest. Hoe kouder het is, hoe meer hout er wordt verstoekt om het huis te verwarmen. De koudste periode van de afgelopen winter was van 12 tot en met 18 december 2022. De meteorologische winter loopt van 1 december t/m 28 februari.

Over de 400 gemeten uurwaarden in de periode 13 november 2022 tot en met 23 mei 2023 is de gemiddelde uurwaarde gemeten met de BAM in 's-Gravenpolder $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en op de LML-stations respectievelijk $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor Sluiskil en $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor Ossendrecht. De spreiding (standaarddeviatie: Stdev) in de uurwaarden is in 's-Gravenpolder met $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ groter dan op de LML-stations met respectievelijk $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor Sluiskil en $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor Ossendrecht.

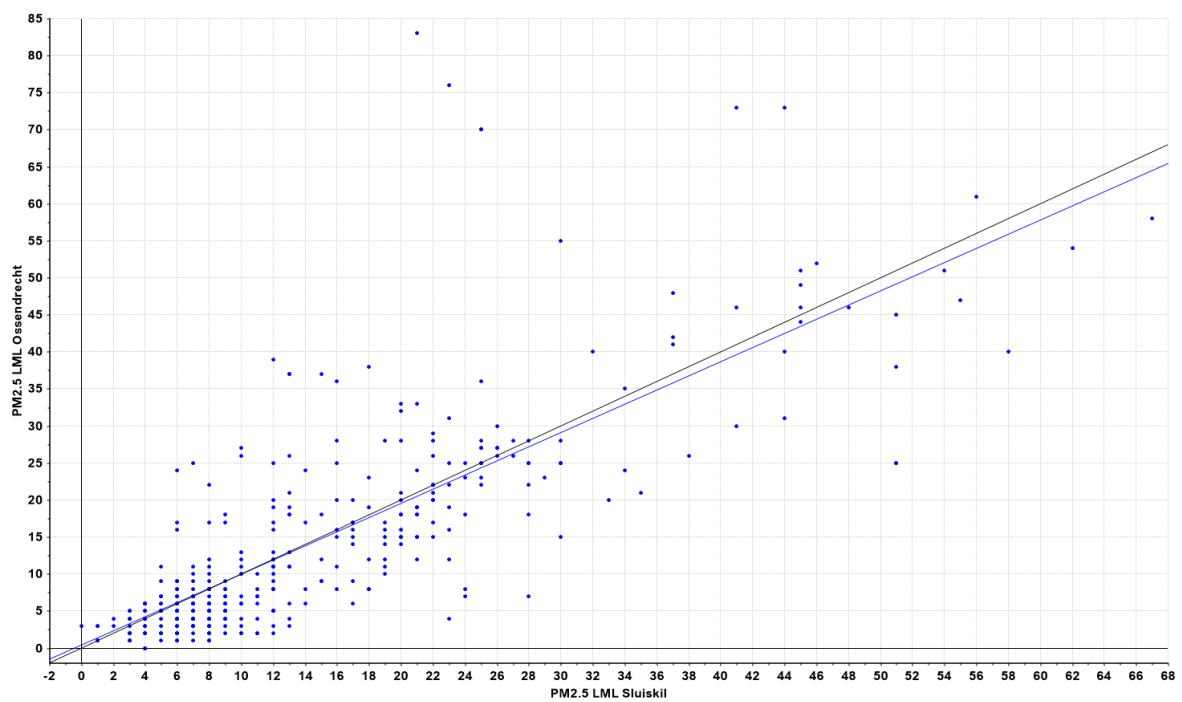
De uurwaarden van de LML-stations in dit onderzoek worden gebruikt om de achtergrondconcentratie te bepalen. Het is daarom interessant te onderzoeken hoe Sluiskil en Ossendrecht zich ten opzichte van elkaar verhouden. In onderstaande afbeelding 19 zijn de uurwaarden van beide stations tijdens de gehele meetperiode weergegeven.

¹¹ <https://www.rivm.nl/houtrook/stookalert#:~:text=Het%20doel%20van%20het%20stookalert,van%20weersverwachtingen%20en%20de%20luchtkwaliteit.>



Afbeelding 19: Uurwaarden PM2.5 LML-stations Sluiskil en Ossendrecht

De uurwaarden volgen eenzelfde patroon en er is gelijkenis in de concentraties. Uit de correlatie in de uurwaarden tussen de twee stations kan meer informatie gewonnen worden. De correlatie tussen de LML-stations is weergegeven in afbeelding 20.



Afbeelding 20: Correlatie uurwaarden PM2.5 LML-station Sluiskil versus Ossendrecht

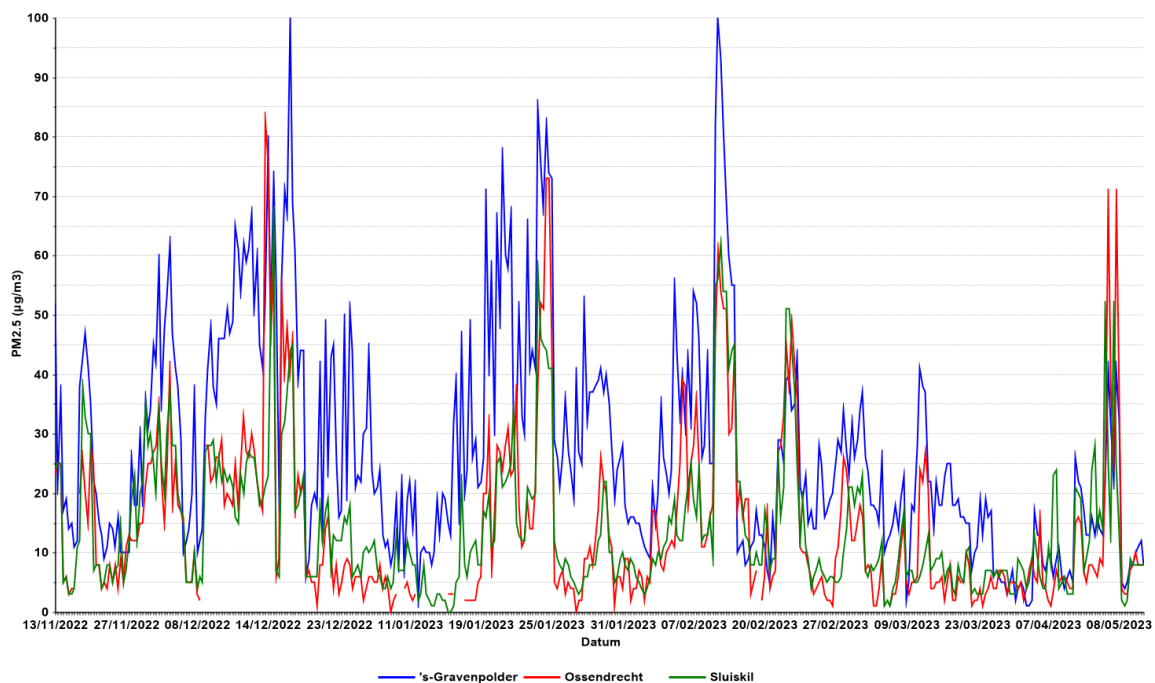
De statistiek van de correlatie in afbeelding 20 is als volgt:

- Aantal uurwaarden : 382
- Richtingscoëfficiënt : 0.956
- Asafsnode : $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Pearson correlatiecoëfficiënt : 0.63
- Standaarddeviatie : $8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Er zijn drie meetmomenten waarbij de uurwaarde voor Ossendrecht veel hoger is dan Sluiskil. Het betreft hier 7 mei 2023 om 12u (OSD: $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SLK: $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 14 december 2022 om 20u (OSD: $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SLK: $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 14 december 2022 om 21u (OSD: $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SLK: $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Deze meetmomenten zijn niet verwijderd, omdat niet bekend is waar deze grote verschillen door zijn ontstaan. Naast deze drie meetmomenten, zijn er nog meerdere meetmomenten waarbij er grote verschillen zijn in de uurwaarden tussen Sluiskil en Ossendrecht. Deze grote verschillen liggen echter aan beide kanten van de correlatielijn. Bij een concentratie $\text{PM}_{2.5} < 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ neigen de uurwaarden voor Ossendrecht lager te zijn dan Sluiskil. Dit effect zou te maken kunnen hebben met het feit, dat op Ossendrecht wordt gemeten met de BAM 1020 en op Sluiskil met de Palas Fidas. Ondanks deze bevindingen is het verband in de uurwaarden lineair getuige de hoge waarde voor de richtingscoëfficiënt. De correlatie in de uurwaarden is matig tot vrij sterk. Eerder is besproken, dat beide LML-stations zijn gekozen om de achtergrondconcentratie $\text{PM}_{2.5}$ te bepalen. Op basis van de statistiek van de correlatie is er geen indicatie dat deze werkwijze niet betrouwbaar zou zijn.

8.5 Statistische evaluatie

De uurwaarden gemeten tijdens de totale meetperiode (N=400) van 's-Gravenpolder en de LML-stations is weergegeven in onderstaande afbeelding 21.



Afbeelding 21: Uurwaarden $\text{PM}_{2.5}$ BAM 's-Gravenpolder inclusief LML-stations

Voor afbeelding 21 geldt, dat de uurwaarden voor 's-Gravenpolder zijn gemeten tijdens de situatie mét of zónder houtrook in de buitenlucht. In eerste instantie wordt het totaalbeeld

onderzocht, in 8.7 wordt een onderscheid gemaakt voor de situatie mét en zónder waargenomen houtrook.

Duidelijk is te zien, dat de uurwaarden in 's-Gravenpolder op een hoger niveau liggen dan op de LML-stations. Voor dit onderzoek worden de uurwaarden van de LML-stations gebruikt om de achtergrondconcentratie PM2.5 te bepalen. De achtergrondconcentratie kan een behoorlijke bijdrage zijn van de totale concentratie PM2.5 gemeten met de BAM in 's-Gravenpolder. Het is daarom interessant de uurwaarden van 's-Gravenpolder te corrigeren met de achtergrondconcentratie om hiermee de lokale bijdrage PM2.5 te bepalen. De lokale bijdrage zal hoofdzakelijk, zo niet volledig zijn veroorzaakt door houtstook in de omgeving van de meetlocatie. De lokale bijdrage kan dan worden gezien als de netto bijdrage aan PM2.5 afkomstig van particuliere houtstook. De lokale bijdrage PM2.5 wordt berekend volgens onderstaande vergelijking (1). De achtergrondconcentratie PM2.5 wordt berekend door het gemiddelde van de LML-stations te nemen volgens vergelijking (2).

$$(1) \text{ PM2.5_lokaal} = (\text{PM2.5_BAM_totaal}) - (\text{PM2.5_LML_gemiddeld})$$

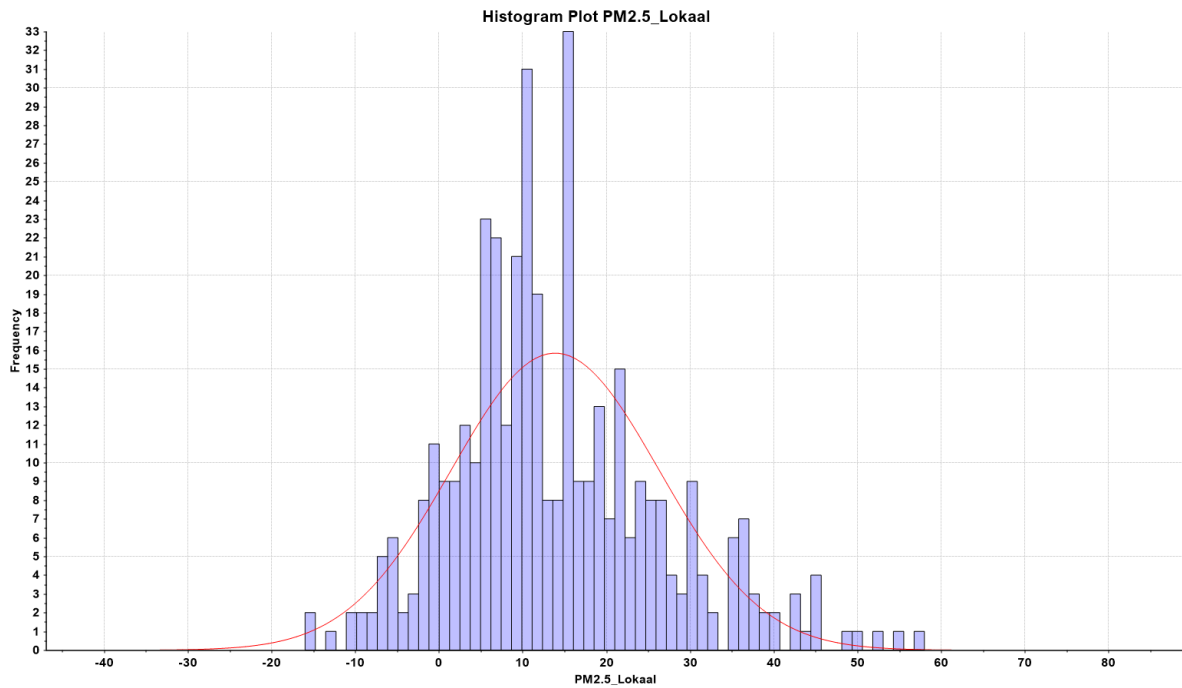
$$(2) \text{ PM2.5_LML_gemiddeld} = (\text{PM2.5_Ossendrecht} + \text{PM2.5_Sluiskil}) / 2$$

Hierbij geldt (alle concentraties in $\mu\text{g}/\text{m}^3$):

- PM2.5_lokaal = Bijdrage PM2.5 door houtstook in 's-Gravenpolder
- PM2.5_BAM_totaal = PM2.5 gemeten met de BAM in 's-Gravenpolder
- PM2.5_LML_gemiddeld = De gemiddelde concentratie PM2.5 van de LML-stations

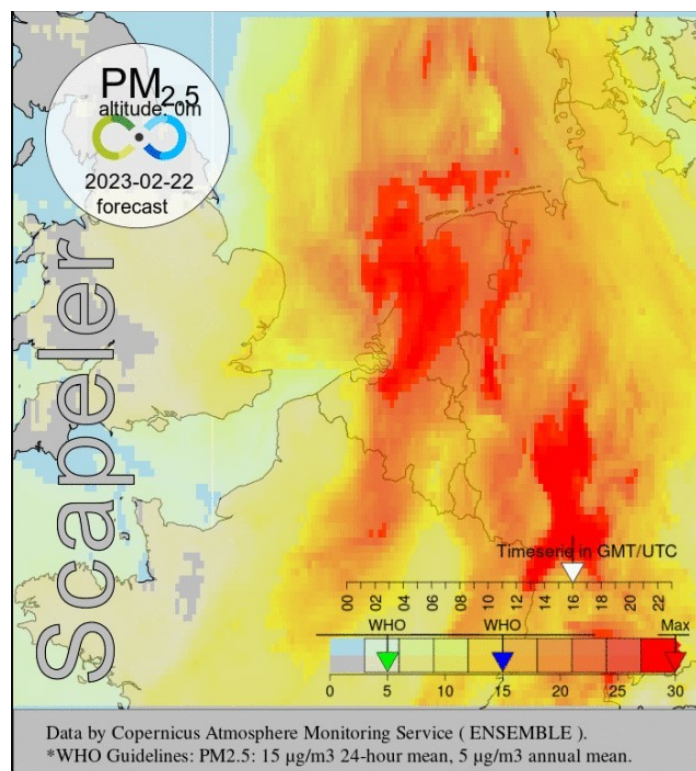
Voor de LML-stations geldt ook, dat lokale bronnen een bijdrage kunnen leveren in de gemeten uurwaarden PM2.5. Een alternatieve methode zou kunnen zijn de laagste uurwaarde van de LML-stations te gebruiken om de uurwaarde van 's-Gravenpolder te corrigeren. Dat zou betekenen, dat de lokale bijdrage PM2.5 in 's-Gravenpolder hoger zal worden.

Voor 8% van de lokale PM2.5 uurwaarden geldt, dat het resultaat negatief is. De meeste negatieve resultaten liggen tussen 0 en $-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In onderstaande histogram in afbeelding 22 zijn de lokale PM2.5 uurwaarden weergegeven.



Afbeelding 22: Histogram PM2.5_Lokaal uurwaarden in 's-Gravenpolder

De lokale PM2.5 uurwaarden $\leq -10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zijn opgetreden tijdens situaties met weinig wind op 16 februari, 22 februari en 8 mei 2023. Bijvoorbeeld op 22 februari 2023, waren er sterke ruimtelijke gradiënten aanwezig in de concentratie PM2.5 boven Zeeland en West-Brabant. In onderstaande visualisatie in afbeelding 23 is dit goed waar te nemen. Om 16 uur UTC is er een sterke gradiënt aanwezig tussen het oosten van Zeeland en West-Brabant.



Afbeelding 23: CAMS-voorspelling PM2.5 16 UTC op 22 februari 2023

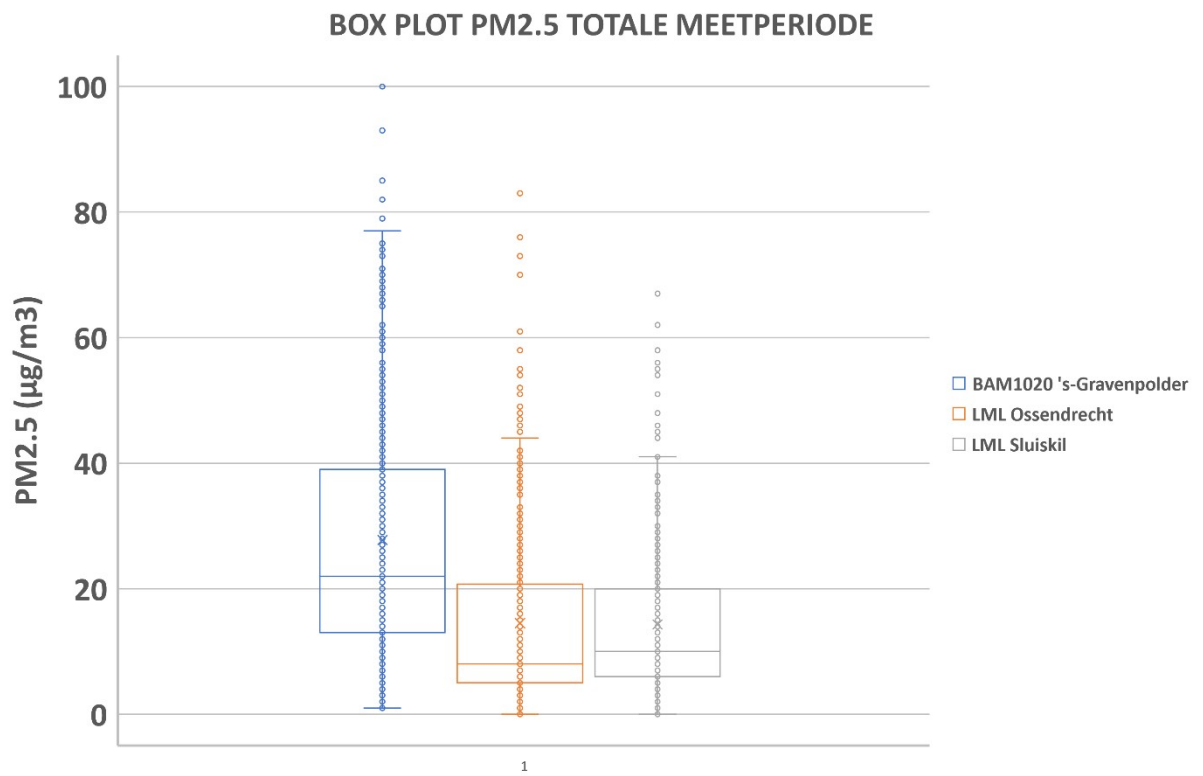
Als gevolg van deze ruimtelijke gradiënten kunnen de uurwaarden op één of twee van de LML-stations (veel) hoger zijn dan in 's-Gravenpolder met als resultaat een onderschatting van de lokale PM2.5 uurwaarde. Het omgekeerde effect kan ook een rol spelen, dan zijn de uurwaarden op één of twee LML-stations (veel) lager en zijn de lokale PM2.5 uurwaarden overschat. Overschatting van de lokale PM2.5 uurwaarde levert daarentegen wel een positief resultaat op en zal het niet te onderscheiden zijn van de overige positieve resultaten.

8.6 Box-Whisker plots

De verdeling van de PM2.5 uurwaarden, gemeten op de verschillende stations, kan gevisualiseerd worden met behulp van box-whisker¹² plots. De box-whisker plot van de totale meetperiode is weergegeven in afbeelding 24. Voor deze box-whisker plot geldt, dat het is berekend op basis van de 400 uurwaarden gemeten in 's-Gravenpolder en de corresponderende uurwaarden voor de LML-stations. Voor LML-station Sluiskil waren er 400 corresponderende uurwaarden beschikbaar en voor LML-station Ossendrecht was dit aantal 382 (zie ook tabel 3).

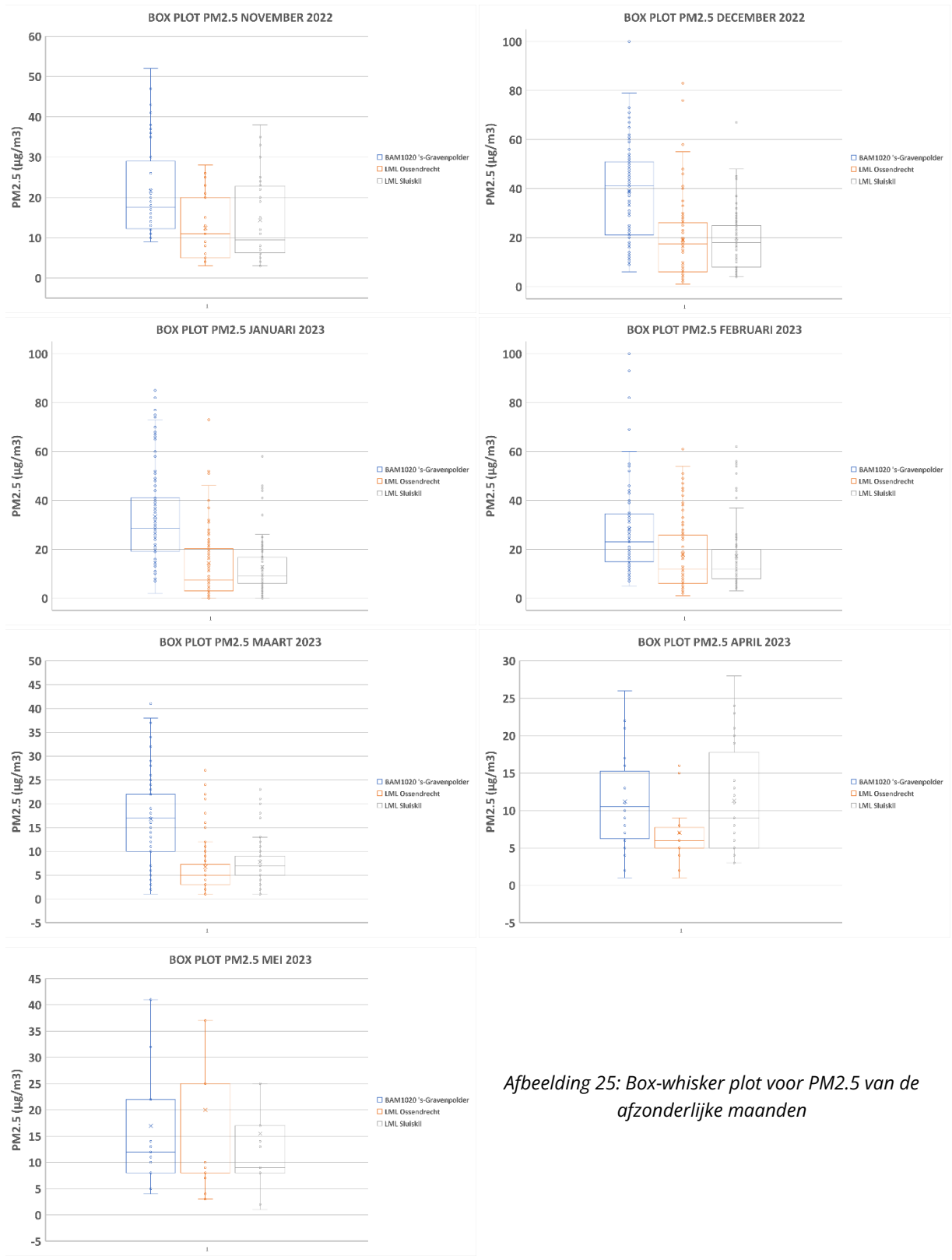
¹²

<https://www.scapeler.com/index.php/winschoten/>



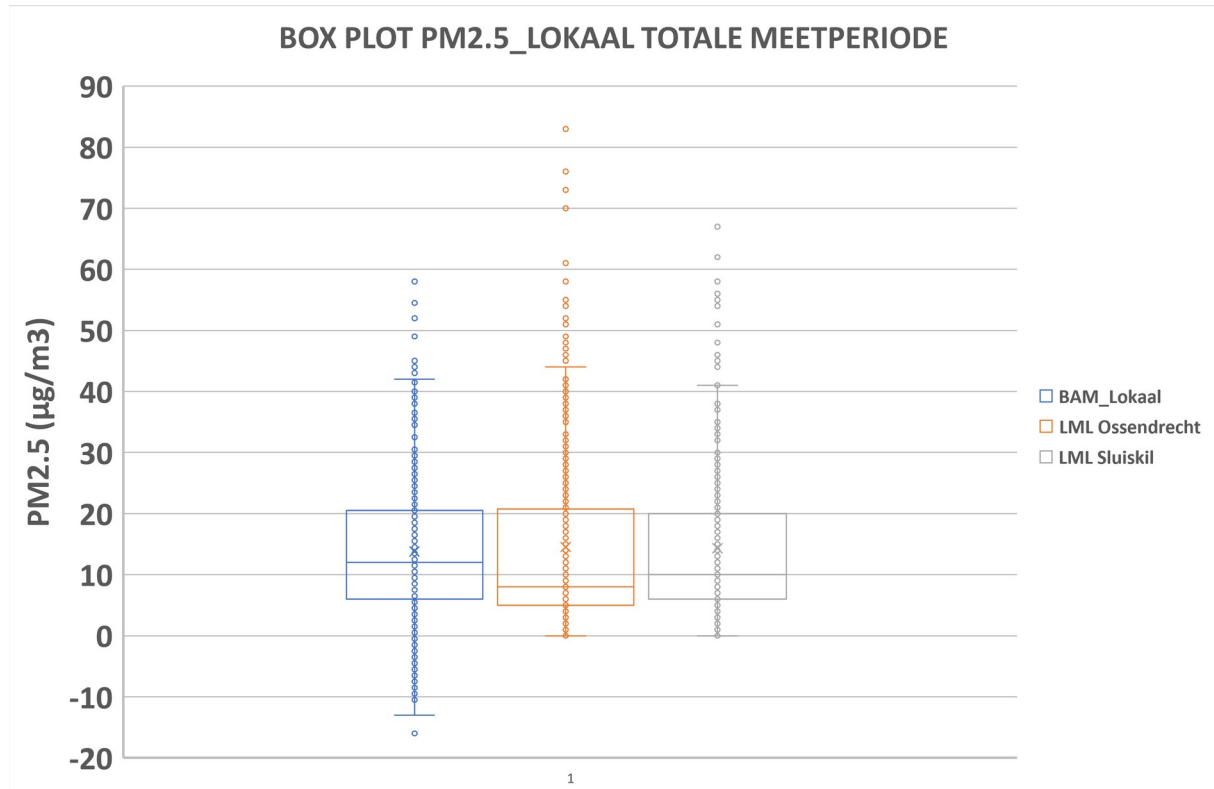
Afbeelding 24: Box-whisker plot PM2.5 uurwaarden over de totale meetperiode

Het (rekenkundig) gemiddelde wordt weergegeven met een 'x' en de mediaan met een horizontale streep in de box. Het gemiddelde van de uurwaarden in 's-Gravenpolder bedraagt $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en de mediaan bedraagt $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Het gemiddelde van de uurwaarden in Sluiskil bedraagt $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en de mediaan bedraagt $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Het gemiddelde van de uurwaarden in Ossendrecht bedraagt $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en de mediaan bedraagt $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De spreiding en de uitschieters in de uurwaarden van 's-Gravenpolder zijn groter en van een hoger niveau dan voor de LML-stations. Als we de box-whisker plots per maand bekijken, dan valt het op, dat voor de maanden november 2022 tot en met maart 2023 de verdeling van de uurwaarden en de uitschieters voor 's-Gravenpolder op een hoger niveau liggen. Voor de maanden april en mei 2023 komen de verdelingen dicht bij elkaar te liggen. In deze twee maanden zijn er minder metingen verricht en is er duidelijk minder houtstook geweest. De box-whisker plots per maand zijn weergegeven in afbeelding 25.



Afbeelding 25: Box-whisker plot voor PM2.5 van de afzonderlijke maanden

De box-whisker plot is ook gemaakt voor de lokale PM2.5 uurwaarden (PM2.5_lokaal) van 's-Gravenpolder en vergeleken met de uurwaarden van de LML-stations. In afbeelding 26 is deze box-whisker plot weergegeven. Middels deze box-whisker plot is de netto bijdrage van particuliere houtstook in de omgeving van de meetlocatie in 's-Gravenpolder te vergelijken met de achtergrond concentratie van de LML-stations.



Afbeelding 26: Box-whisker plot van de PM2.5_lokaal uurwaarden in 's-Gravenpolder en de PM2.5 uurwaarden van de LML-stations

De gemiddelde lokale PM2.5 uurwaarde voor 's-Gravenpolder is $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en is vergelijkbaar met de gemiddelde uurwaarden van de LML-stations. De mediaan ligt voor 's-Gravenpolder op $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en is nog steeds hoger dan de LML-stations.

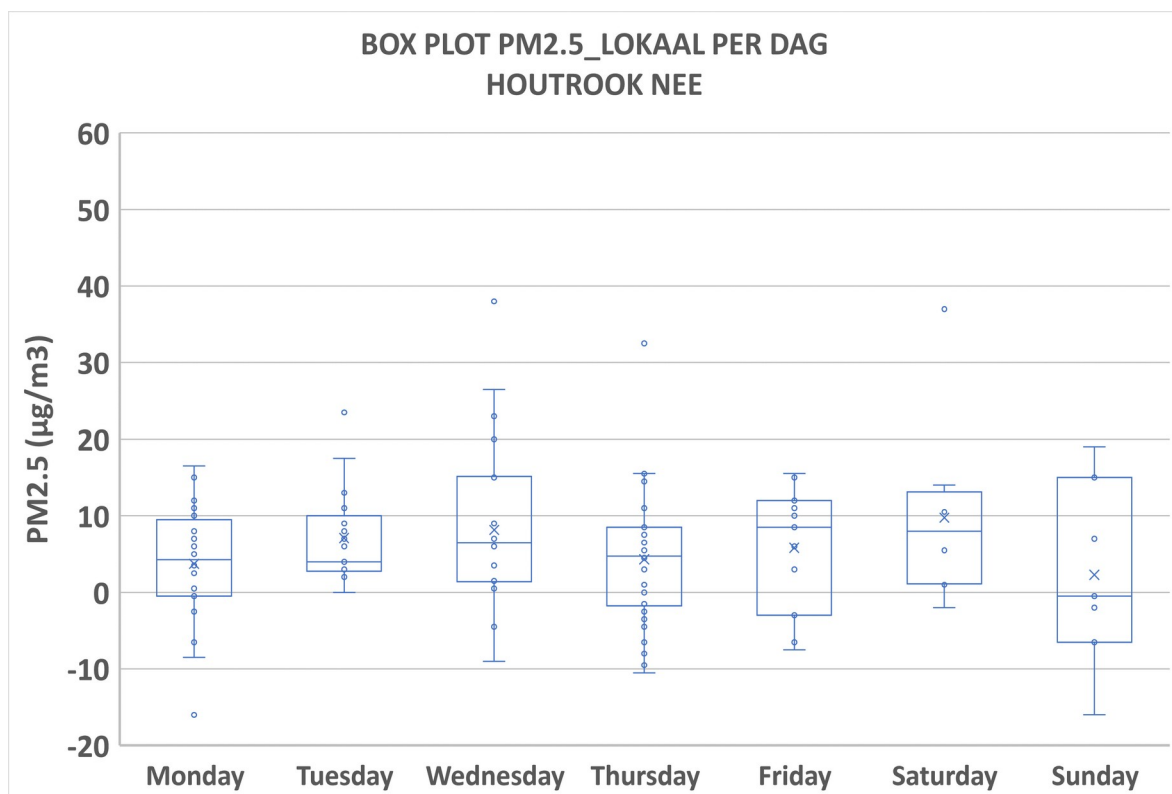
Op basis van de gegevens van de gemiddelde uurwaarden voor 's-Gravenpolder, kan een berekening worden gemaakt voor de bijdrage van particuliere houtstook aan de totale concentratie fijnstof PM2.5 in de buitenlucht als er in de omgeving van de meetlocatie hout wordt gestookt. Deze bijdrage wordt berekend door de gemiddelde waarde van de lokale uurwaarden PM2.5 ($14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) te delen op de gemiddelde uurwaarde van de totale concentratie PM2.5 ($28 \mu\text{g}/\text{m}^3$). De bijdrage van particuliere houtstook aan de totale concentratie fijnstof PM2.5 komt hiermee op 50%. Met andere woorden, de bijdrage van particuliere houtstook veroorzaakt een toename van 100% van de achtergrondconcentratie als er in de omgeving van de meetlocatie hout wordt gestookt. De procentuele bijdragen gelden in principe voor de 400 uurwaarden die gemeten zijn gedurende de totale meetperiode.

Het is interessant te onderzoeken of de bepaling van de lokale bijdrage aan PM2.5 op de meetlocatie in 's-Gravenpolder evenwichtig is verdeeld over de dagen van de week en de uren

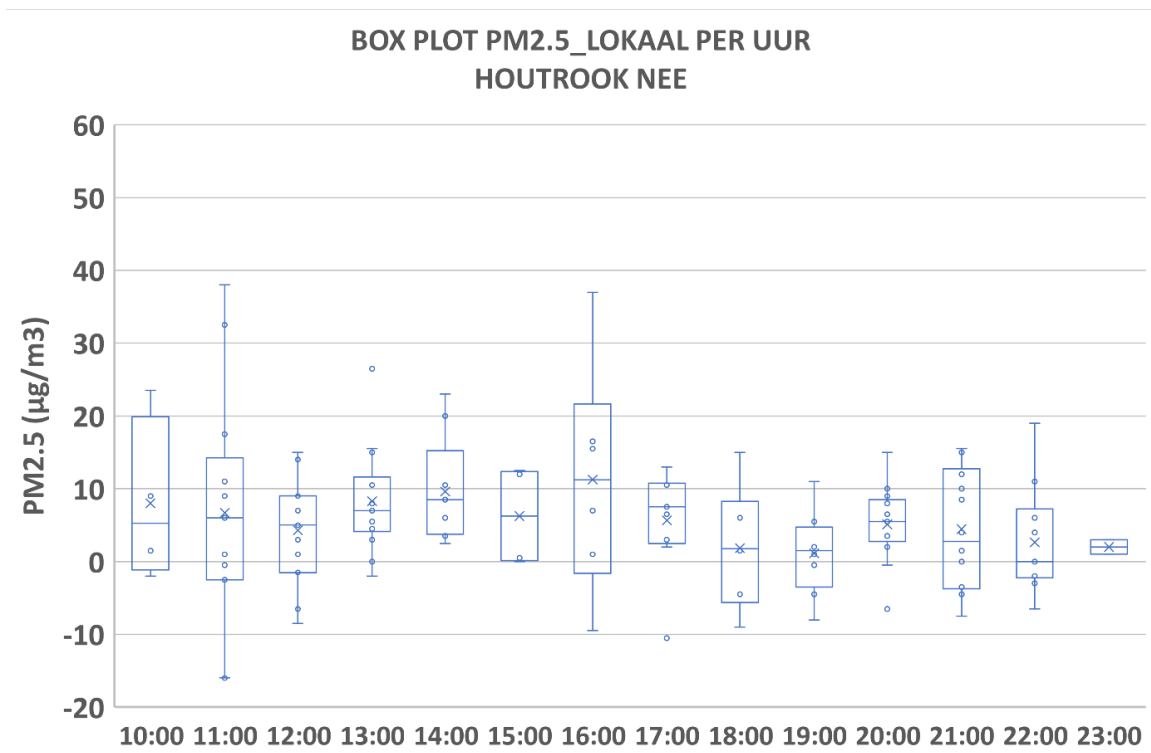
van de dag. Daarnaast is het ook interessant hoe deze verdeling zich uit voor de uurwaarden waarbij er wél en géén houtrook is vastgesteld in de omgeving van de meetlocatie. In onderstaande afbeeldingen 27, 28, 29 en 30, zijn in totaal vier box-whisker plots weergegeven. Het gaat hier om de volgende scenario's:

1. PM2.5_lokaal per dag van de week waarbij er géén houtrook is waargenomen tijdens het meten van de uurwaarde
2. PM2.5_lokaal per uur van de dag waarbij er géén houtrook is waargenomen tijdens het meten van de uurwaarde
3. PM2.5_lokaal per dag van de week waarbij er wél houtrook is waargenomen tijdens het meten van de uurwaarde
4. PM2.5_lokaal per uur van de dag waarbij er wél houtrook is waargenomen tijdens het meten van de uurwaarde

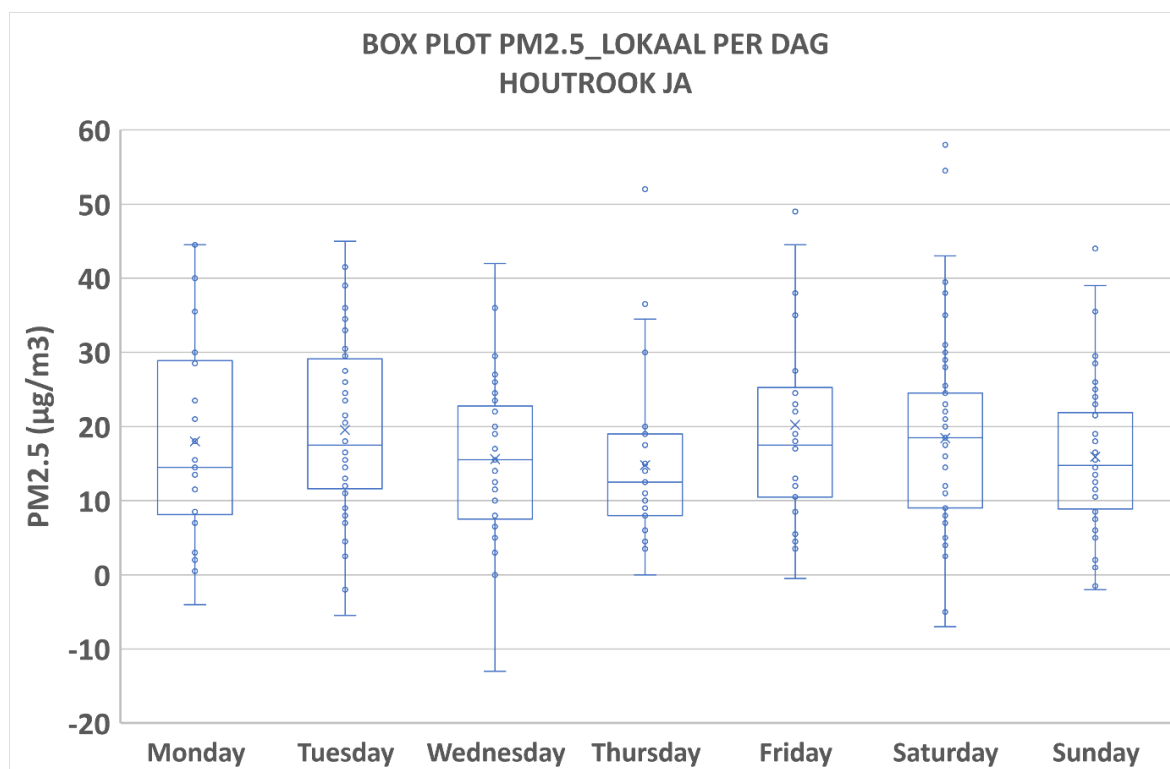
In de box-whisker plots zijn alle uurwaarden opgenomen uit de totale meetperiode die voldoen aan bovengestelde criteria. Het betreft 127 uurwaarden waarbij er géén houtrook is waargenomen en 273 uurwaarden waarbij er wél houtrook is waargenomen.



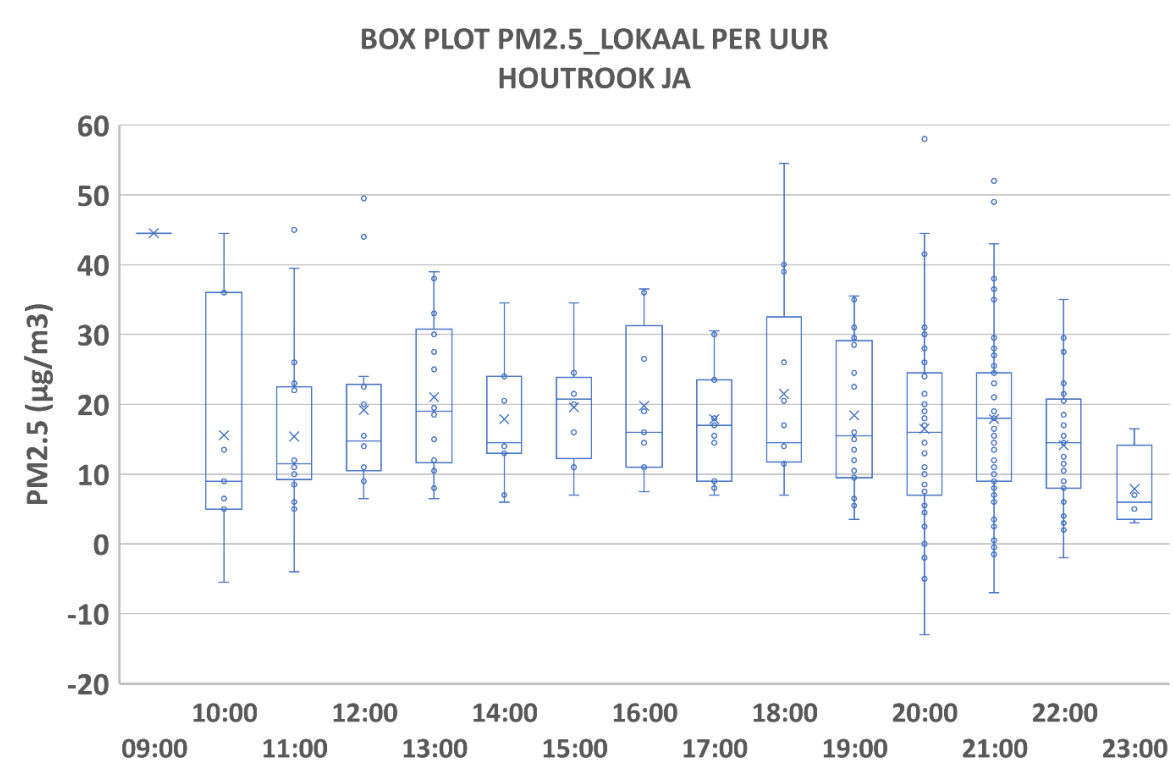
Afbeelding 27: Box-whisker plot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder per dag van de week waarbij er geen houtrook is waargenomen



Afbeelding 28: Box-whisker plot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder per uur van de dag waarbij er geen houtrook is waargenomen



Afbeelding 29: Box-whisker plot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder per dag van de week waarbij er wel houtrook is waargenomen



Afbeelding 30: Box-whisker plot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder per uur van de dag waarbij er wel houtrook is waargenomen

In geval er géén houtrook is waargenomen in de buurt van de meetlocatie geldt, dat het gemiddelde en de mediaan van de PM2.5_lokaal uurwaarden voor zowel de dag van de week als het uur van de dag evenwichtig is verdeeld tussen 0 µg/m³ en 11 µg/m³. De zondag laat van alle dagen de laagste waarden zien, het is niet duidelijk waardoor dit wordt veroorzaakt.

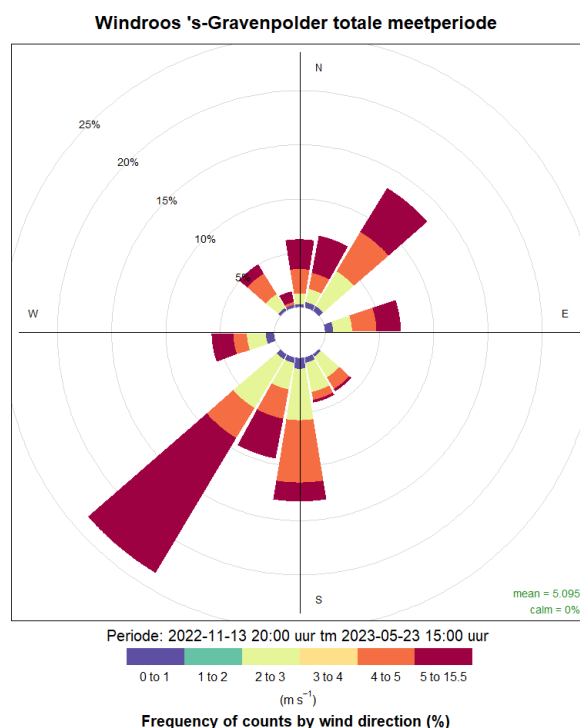
In geval er wél houtrook is waargenomen in de buurt van de meetlocatie geldt, dat het gemiddelde en de mediaan van de PM2.5_lokaal uurwaarden voor zowel de dag van de week als het uur van de dag evenwichtig is verdeeld tussen 10 µg/m³ en 22 µg/m³. De hoogste uurwaarden zijn verkregen om 11u, 12u, 20u en 21u. Om 9u en 23u zijn de minste uurwaarden verzameld en dit heeft een grote invloed op de waarde van het gemiddelde en de mediaan.

Op basis van bovenstaande vier box-plots kan de conclusie worden getrokken, dat de gemiddelde bijdrage aan fijnstof PM2.5, veroorzaakt door particuliere houtstook evenwichtig is verdeeld over de dagen van de week en dat geldt voor de periode 9u tot en met 23u. Op basis van de uitschieters is er een voorkeur voor houtstook in de avonduren vanaf 18u.

8.7 Windroos, pollutieroos en contourplot

De blootstelling aan houtrook is afhankelijk van de concentratie en de duur. De concentratie van houtrook in de lucht is afhankelijk van meerdere factoren zoals windkracht, windrichting, ligging van gebouwen, maar ook de toestand van de luchtlaag aan het aardoppervlak. De windrichting is van belang, omdat deze bepalend is of de houtrook naar je toe zal waaien of juist van je af. De concentratie aan houtrook kan goed geschat worden op basis van fijnstof PM2.5. Houtrook bevat namelijk extreem veel PM2.5 (zie Voorwoord). De relatie tussen windrichting, windkracht en concentratie PM2.5 kan onderzocht worden met behulp van statistische visualisatie tools. Voor dit onderzoek is gekozen voor de windroos, pollutieroos en de contour-plot (of polarplot), beschikbaar via R-script.

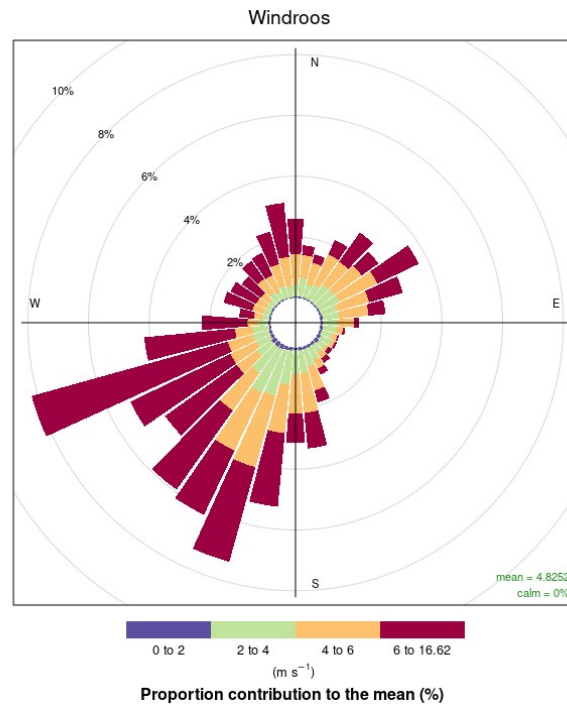
De windroos over de 400 uurwaarden van de totale meetperiode is weergegeven in afbeelding 31.



Afbeelding 31: Windroos 's-Gravenpolder van de totale meetperiode

Deze windroos is gebaseerd op de windrichting per 22.5° die tijdens het meten van de uurwaarde in 's-Gravenpolder is opgetekend. Gedurende bijna 25% van de uurwaarden was de wind afkomstig uit het zuidwesten en voor 13% uit het zuiden en noordoosten. Over het algemeen kwam de wind voornamelijk uit een richting tussen zuidwest en zuid en tussen noord en noordoost. Er zijn geen uurwaarden gemeten waarbij de wind kwam uit het westzuidwesten, westnoordwesten of oostnoordoosten. Dit is toeval, daar er niet bewust rekening is gehouden met de windrichting. De gemiddelde windsnelheid over de totale meetperiode is 5.1 m/s geweest en er waren geen metingen uitgevoerd waarbij het windstil was. De hoogste windsnelheid tijdens een meting was 15.5 m/s en de hoogste windsnelheden zijn voorgekomen bij een wind uit het zuidwesten.

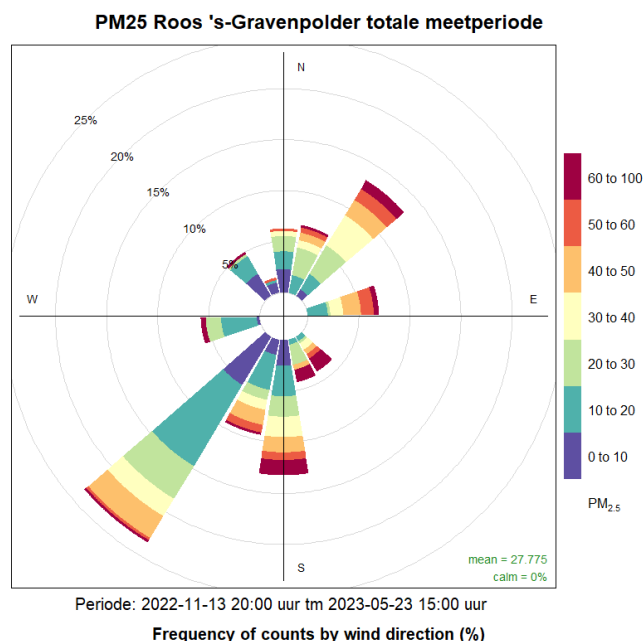
De windroos gebaseerd op de 400 uurwaarden is in principe een steekproef van de windroos gebaseerd op alle 4608 uren die gelden voor de totale meetperiode, dus inclusief de uren dat er niet is gemeten met de BAM. De representativiteit van de windroos gebaseerd op de 400 uurwaarden kan worden gecontroleerd door deze te vergelijken met windroos gebaseerd op de 4608 uren. Hiertoe zijn alle beschikbare 10 minuten data van KNMI-station Wilhelminadorp gebruikt, in totaal zijn dat 27.648 observaties. De windroos is gemaakt op basis van de windrichtingen op 10° nauwkeurig. In afbeelding 32 is deze windroos weergegeven.



Afbeelding 32: Windroos Wilhelminadorp gebaseerd op de 10 minuten observaties van de totale meetperiode

Volgens deze windroos is de gemiddelde windsnelheid 4.8 m/s en komt goed overeen met de windroos gebaseerd op de 400 uurwaarden waarbij de gemiddelde windsnelheid 5.1 m/s is. De verdeling van de windrichtingen is als gevolg van de hogere resolutie met 10° anders dan de windroos gebaseerd op 400 uurwaarden. In grote lijnen zijn er wel overeenkomsten, namelijk de meest voorkomende windrichtingen zijn tussen ZZW en WZW en tussen NO en ONO en de minst voorkomende windrichtingen zijn tussen O en ZZO. De windroos gebaseerd op de 400 uurwaarden is dus een goede steekproef van de werkelijkheid.

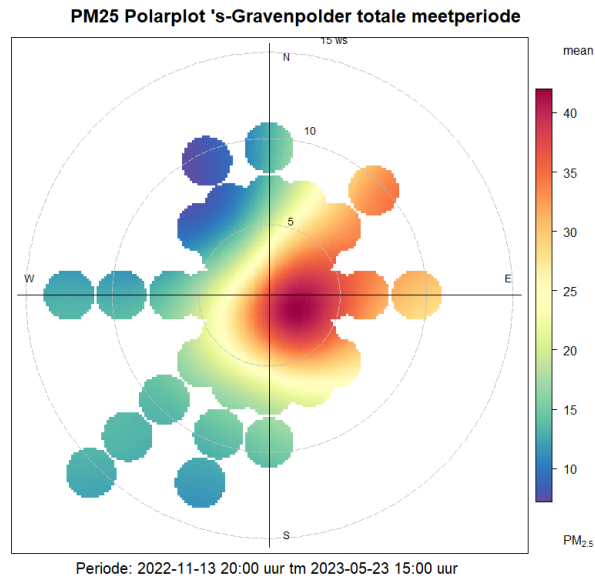
Met behulp van de PM2.5 pollutieroos kan de relatie worden onderzocht tussen de windroos en de concentratie fijnstof PM2.5. De PM2.5 pollutieroos over de totale meetperiode met 400 uurwaarden is weergegeven in afbeelding 33.



Afbeelding 33: PM2.5 pollutieroos 's-Gravenpolder totale meetperiode.

De hoogste uurwaarden zijn gemeten bij een windrichting vanaf noordnoordoost, via oost naar zuid, waarbij de meeste hoge uurwaarden zijn gemeten bij een zuidoosten- tot zuidenwind. Deze resultaten liggen in de lijn der verwachting, omdat de houtkachels met de meeste stookuren en/of de meeste geuroverlast zich bevinden op deze windrichtingen. De gemiddelde uurwaarde is $27.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en dat komt overeen met tabel 3.

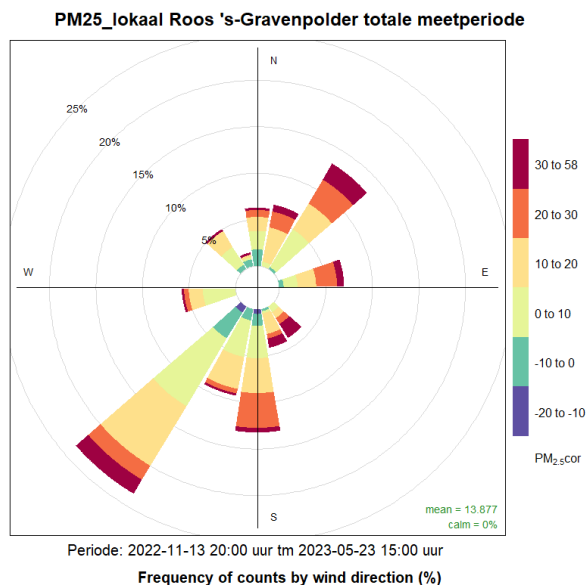
Met behulp van de PM2.5 contourplot (Polarplot) kan de relatie worden onderzocht tussen windrichting, windsnelheid en concentratie PM2.5. De contour plot over de totale meetperiode met 400 uurwaarden is weergegeven in afbeelding 34.



Afbeelding 34: Contour plot PM2.5 's-Gravenpolder van de totale meetperiode.

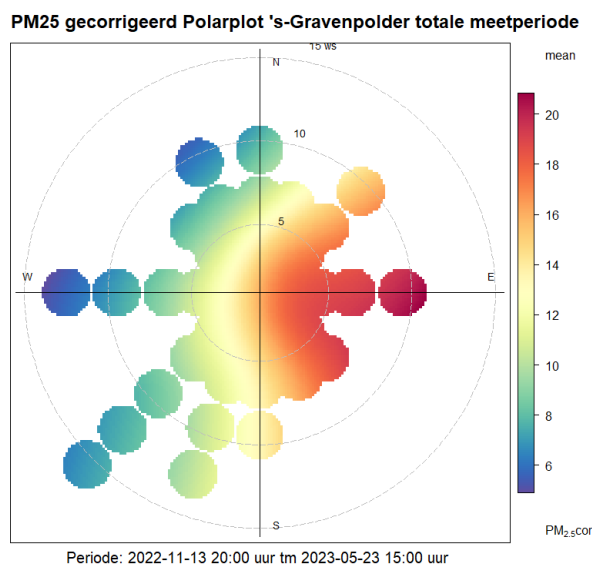
In de contour plot worden de uurwaarden volgens een algoritme uitgemiddeld en als functie van windrichting en windkracht weergegeven. Heel duidelijk is te zien, dat de hoogste uurwaarden zijn verkregen bij een wind tussen noordoost en zuid en vooral bij een windsnelheid kleiner dan 5 m/s. Het is opvallend, dat ook bij een hogere windsnelheid er relatief hoge uurwaarden zijn verkregen bij een windrichting tussen noordoost en zuidoost. Bij een afluende wind is vaak ook de achtergrondconcentratie verhoogd. Ook geldt, dat bij een wind uit het noordnoordoosten tot zuidzuidoosten, de impact van houtkachels verder op het dorp een grotere rol spelen. Dat is namelijk niet of minder het geval bij een wind uit andere windrichtingen. De laagste uurwaarden zijn verkregen bij een windrichting tussen noord en noordwest en voornamelijk bij een windsnelheid hoger dan 5 m/s. Dit is ook volgens de verwachting aangezien er op het noordwesten de minste houtkachels actief zijn en dat de grens van het dorp veel dichterbij is. De invloed van TOP Onions is te verwaarlozen aangezien er vanuit het zuidwesten geen signalen zijn van (sterk) verhoogde uurwaarden.

De pollutieroos en contourplot is ook gemaakt voor de 400 PM2.5_lokaal uurwaarden over de totale meetperiode. In afbeelding 35 is de PM2.5 pollutieroos weergegeven en in afbeelding 36 de PM2.5 contourplot.



Afbeelding 35: Pollutieroos PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder totale meetperiode.

De pollutieroos voor de PM2.5_lokaal uurwaarden laat een vergelijkbaar beeld zien als voor de totale PM2.5 uurwaarden. Er is een kleine verschuiving waar te nemen in de verdeling van de hoogste uurwaarden naar een voorkeur voor een windrichting richting het zuidwesten en een windrichting tussen noord en noordoost. De meeste actieve houtkachels zijn gesitueerd op een windrichting tussen noord, via oost naar het zuidzuidwesten. Indien er gecorrigeerd wordt voor de achtergrondconcentratie lijken deze actieve houtkachels dus beter in beeld te komen.



Afbeelding 36: Contourplot PM2.5_lokaal uurwaarden 's-Gravenpolder totale meetperiode.

De contourplot voor de PM2.5_lokaal uurwaarden laat een vergelijkbaar beeld zien als voor de totale PM2.5 waarden. Er is echter een verschuiving te zien van de hoogste uurwaarden in een oostelijke windrichting bij een hogere windsnelheid. Er is geen duidelijke verklaring te geven voor dit effect. Een mogelijke verklaring zou kunnen zijn, dat de houtrook van oostelijk (dichtbij) gesitueerde houtkachels minder tijd krijgt om te verdunnen met de omgevingslucht als de windsnelheid hoger is. Er is namelijk op het oosten van de meetlocatie op 50 meter afstand een zeer actieve houtkachel gesitueerd. Deze houtkachel produceert vaak veel rook met een zeer sterke onaangename geur. De ruimtelijke indeling van gebouwen in de omgeving van de meetlocatie kan ook een rol spelen (turbulentie, straat canyons).

8.8 Intensiteit houtrookgeur en fijnstofconcentratie

In totaal zijn er 400 uurwaarden gemeten met de BAM 1020 in 's-Gravenpolder. Tijdens de metingen is bepaald of er buiten houtrook was te ruiken en wat hiervan de intensiteit is geweest. Van de 400 uurwaarden zijn er 273 uurwaarden gemeten (68.3%) waarbij er houtrook was te ruiken en zijn er 127 uurwaarden gemeten (31.7%) waarbij er géén houtrook was te ruiken in de omgeving van de meetlocatie.

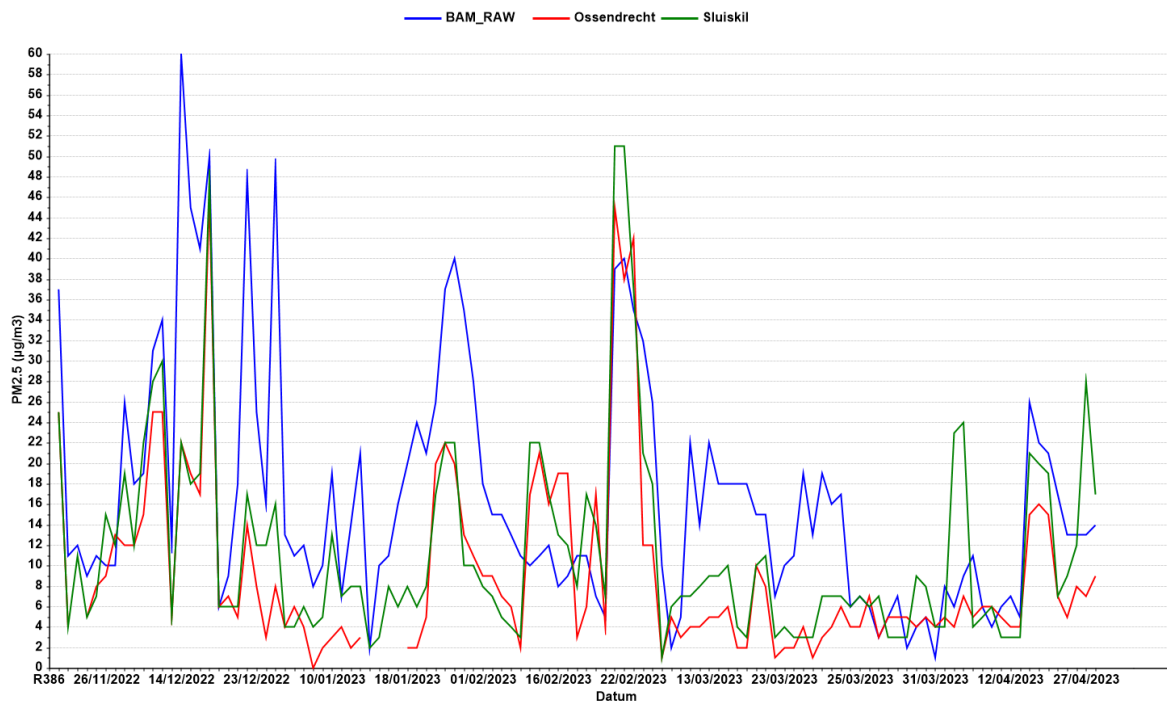
De 273 uurwaarden, waarbij houtrook is waargenomen, zijn nog verder op te delen met betrekking tot de intensiteit van de houtrookgeur in de buitenlucht:

- 200 metingen (50.0% van het totaal) waarbij lichte houtrookgeur is waargenomen
- 66 metingen (16.5% van het totaal) waarbij matige houtrookgeur is waargenomen
- 7 metingen (1.8% van het totaal) waarbij sterke houtrookgeur is waargenomen

Het bepalen van de intensiteit van de houtrookgeur is subjectief en afhankelijk van de gevoeligheid van de neus. De waargenomen intensiteit moet dan ook gezien worden als indicatief. De intensiteit van de houtrookgeur is meestal positief gecorreleerd met de fijnstofconcentratie. Dat is echter niet altijd het geval, vooral als de geurcomponenten voornamelijk bestaan uit vluchtige organische componenten die niet geadsorbeerd zijn aan de fijnstofdeeltjes.

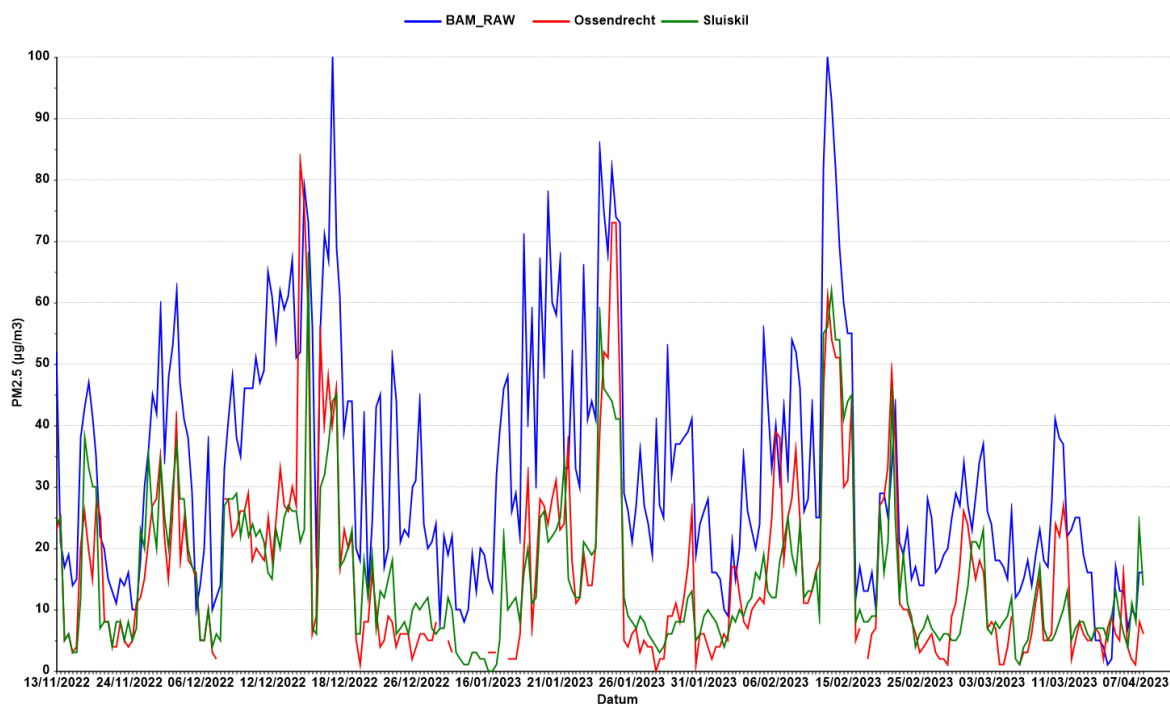
Het is interessant te onderzoeken hoe het verband is tussen de uurwaarden en de waargenomen intensiteit van de houtrookgeur in de buitenlucht tijdens de meting met de BAM. Op basis van de resultaten besproken in 8.6 is gebleken, geldend voor de totale meetperiode van 400 uurwaarden, dat particuliere houtstook gemiddeld een verdubbeling van de concentratie PM2.5 veroorzaakt in de buitenlucht. Deze bijdrage geldt voor de algemene situatie dat er houtrookgeur is waargenomen, dat kan een situatie zijn waarbij de intensiteit van de waargenomen houtrookgeur licht, matig of sterk is geweest. De vraag is of de bijdrage toeneemt indien de houtrookgeur sterker wordt. In eerste instantie zijn de uurwaarden gesplitst in twee scenario's waarvoor geldt, dat er wél (Houtrook JA) of géén houtrookgeur (Houtrook NEE) is waargenomen tijdens de meting in de omgeving van de meetlocatie. Daarna wordt het scenario, waarvoor geldt dat er wél houtrookgeur is waargenomen, verder opgesplitst met betrekking tot lichte, matige of sterke houtrookgeur.

De uurwaarden van de BAM in 's-Gravenpolder en de LML-stations zijn voor beide scenario's weergegeven in afbeelding 37 (Houtrook:NEE) en afbeelding 38 (Houtrook:JA)



Afbeelding 37: Uurwaarden PM2.5 BAM & LML voor scenario: Houtrook NEE

Over het algemeen liggen de uurwaarden van alle stations in lijn met elkaar, maar er zijn een paar dagen, dat de uurwaarden in 's-Gravenpolder veel hoger zijn geweest dan op de LML-stations. Dat is het geval op 14, 22 en 24 december 2022 en in mindere mate op 19 en 29 januari 2023. Op deze dagen was er een sterke gradiënt aanwezig in de fijnstof concentraties boven Zeeland en West-Brabant. De kans is dan groot, dat er grote verschillen kunnen ontstaan tussen de stations. Vanwege de kans op "cherry-picking" zijn deze dagen niet buiten beschouwing gelaten in de statistische analyses.



Afbeelding 38: Uurwaarden PM2.5 BAM & LML voor scenario: Houtrook JA

Over het algemeen liggen de uurwaarden van 's-Gravenpolder (ver) boven de LML-stations.

De statistische evaluatie van de uurwaarden is weergegeven in tabel 4 en tabel 5. Naast de uurwaarden van de BAM 1020 te 's-Gravenpolder (SGP) zijn tevens de LML-stations (OSD en SLK) en de PM2.5_lokaal uurwaarden (SGP_Lok) toegevoegd. De PM2.5_lokaal uurwaarden van 's-Gravenpolder zijn gecorrigeerd voor de gemiddelde achtergrondconcentratie PM2.5 van de LML-stations (zie uitleg onder 8.5).

Tabel 4: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met houtrookgeur (Houtrook:JA)

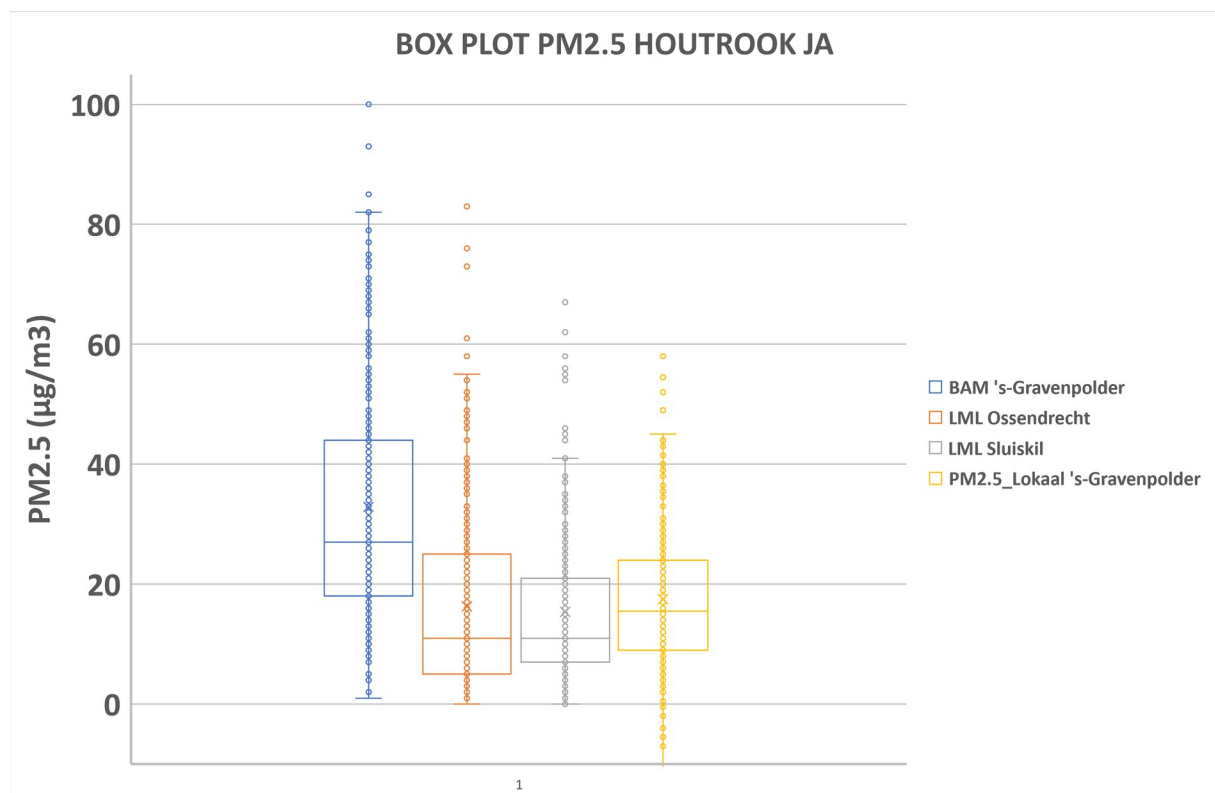
Houtrook = JA	Eenheid	SGP	SGP_Lok	OSD	SLK
Aantal		273	273	259	273
Gemiddelde	µg/m ³	33	17	16	15
Mediaan	µg/m ³	27	16	11	11
Standaarddeviatie	µg/m ³	20	12	15	12
Minimum	µg/m ³	1	-13	0	0
Maximum	µg/m ³	100	58	83	67

Tabel 5: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met houtrookgeur (Houtrook:NEE)

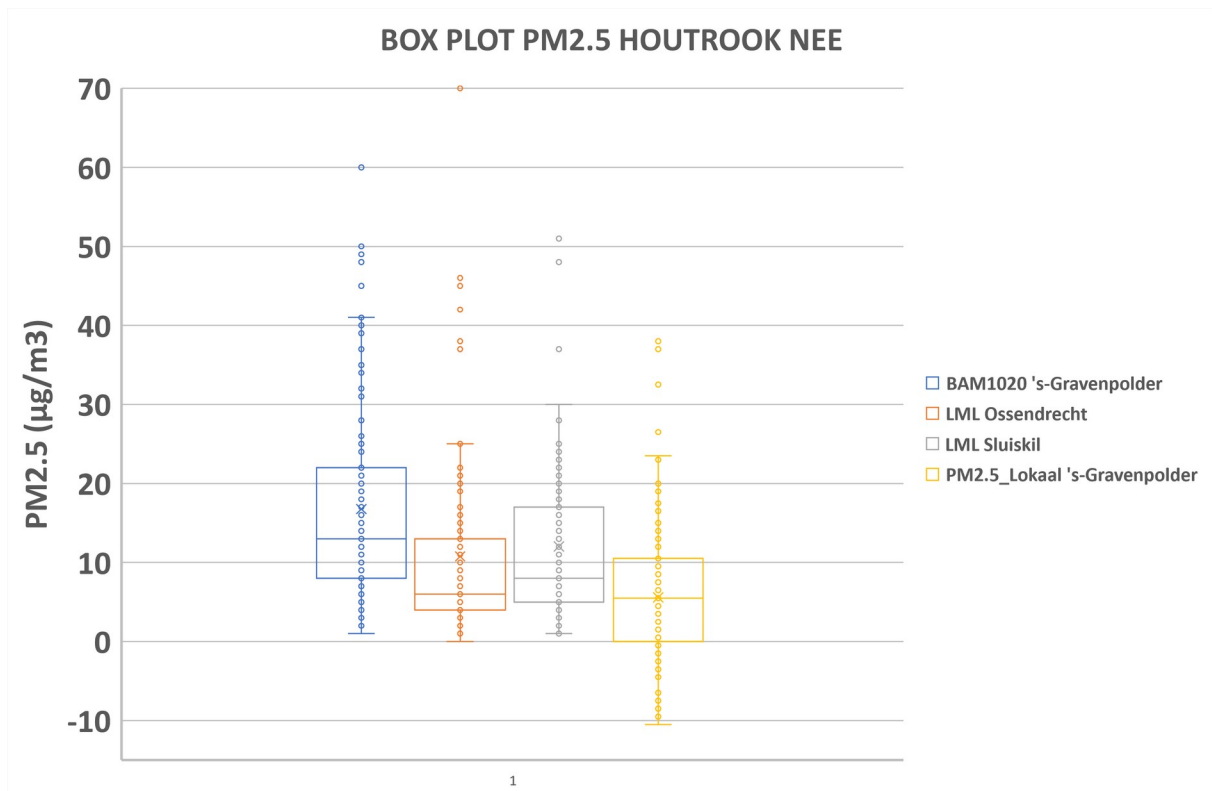
Houtrook = NEE	Eenheid	SGP	SGP_Lok	OSD	SLK
Aantal		127	127	123	127
Gemiddelde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	17	6	11	12
Mediaan	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	13	6	6	8
Standaarddeviatie	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	12	9	12	11
Minimum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1	-16	0	1
Maximum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	60	38	70	51

Het gemiddelde en de mediaan voor de uurwaarden van de LML-stations liggen per scenario dicht bij elkaar. Dit bevestigt, dat de keuze om beide LML-stations als achtergrond station te gebruiken is gerechtvaardigd.

De verdeling van de uurwaarden is voor beide scenario's weergegeven in een Box-Whisker plot in respectievelijk afbeelding 39 en 40.



Afbeelding 39: Box-Whisker plot van de metingen waarbij houtrookgeur is waargenomen



Afbeelding 40: Box-Whisker plot van de metingen waarbij geen houtrookgeur is waargenomen

Eerst wordt voor station 's-Gravenpolder de situatie mét houtrookgeur (scenario 1) vergeleken met de situatie zónder houtrookgeur (scenario 2). Voor scenario 1 geldt, dat de gemiddelde uurwaarde ($33 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en de mediaan ($27 \mu\text{g}/\text{m}^3$) circa tweemaal het niveau bedraagt van scenario 2. Voor de PM2.5_lokaal uurwaarden geldt, dat het gemiddelde ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en de mediaan ($16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) van scenario 1 circa driemaal het niveau bedraagt van scenario 2. Hier blijkt uit, dat houtrook een belangrijke bijdrage levert aan de totale fijnstofconcentratie in de buitenlucht als er in de buurt van de meetlocatie hout wordt gestookt.

Voor de LML-stations geldt, dat voor scenario 1 de gemiddelde uurwaarde ($16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor OSD en $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor SLK) en de mediaan ($11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor OSD en $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor SLK) circa $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hoger liggen dan scenario 2. Het is aannemelijk, dat op de LML-stations een gedeelte van het gemeten fijnstof ook afkomstig is van particuliere houtstook, omdat de stations in de bebouwde kom liggen. Een dergelijke observatie is ook gedaan door de Vlaamse Milieu Maatschappij tijdens een onderzoek in Dessel¹³. Voor de werkelijke achtergrondwaarde geldt, dat particuliere houtstook geen bijdrage zou mogen leveren. Dit zou gerealiseerd kunnen worden als een LML-station ver buiten de bebouwde kom is gevestigd. Op basis van de 400 uurwaarden is aangetoond, dat particuliere houtstook voor 50% bijdraagt in de totale concentratie fijnstof PM2.5 in de buitenlucht indien er in de buurt van de meetlocatie hout wordt gestookt. Het is aannemelijk, dat deze bijdrage van particuliere houtstook in 's-Gravenpolder hoger dan 50% zou kunnen zijn indien er vergeleken zou kunnen worden met de werkelijke achtergrondconcentratie.

Nu worden de uurwaarden besproken waarbij géén houtrook is waargenomen. Voor 's-Gravenpolder is de gemiddelde uurwaarde $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en de mediaan $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Voor de LML-

¹³ <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/23853>

stations is de gemiddelde uurwaarde 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voor OSD en 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voor SLK en is de mediaan 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voor OSD en 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voor SKL. De niveaus in 's-Gravenpolder liggen circa 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hoger dan de LML-stations. Het verschil zou verklaard kunnen worden door fijnstof afkomstig van lokale bronnen in 's-Gravenpolder, maar niet waargenomen op basis van geur tijdens de metingen met de BAM. Een realistische mogelijkheid is de bijdrage van fijnstof afkomstig van houtstook op grote(re) afstand. De geur van de houtrook is dan zoveel verdund, dat deze niet meer goed met de neus waargenomen kon worden.

De uurwaarden waarbij een houtrookgeur is waargenomen worden nu verder opgesplitst voor de situatie waarvoor geldt, dat er respectievelijk een lichte-, matige- of sterke houtrookgeur is waargenomen. De statistische evaluatie van de uurwaarden is weergegeven in tabel 6, 7 en 8. Naast de uurwaarden van de BAM 1020 te 's-Gravenpolder (SGP) zijn tevens de LML-stations (OSD en SLK) en de PM2.5_lokaal uurwaarden (SGP_Lok) toegevoegd.

Tabel 6: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met intensiteit waargenomen lichte houtrookgeur

Lichte houtrookgeur	Eenheid	SGP	SGP_Lok	OSD	SLK
Aantal		200	200	187	200
Gemiddelde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	28	14	14	14
Mediaan	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	23	12	8	10
Standaarddeviatie	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	17	11	14	12
Minimum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1	-13	0	0
Maximum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	85	55	73	67

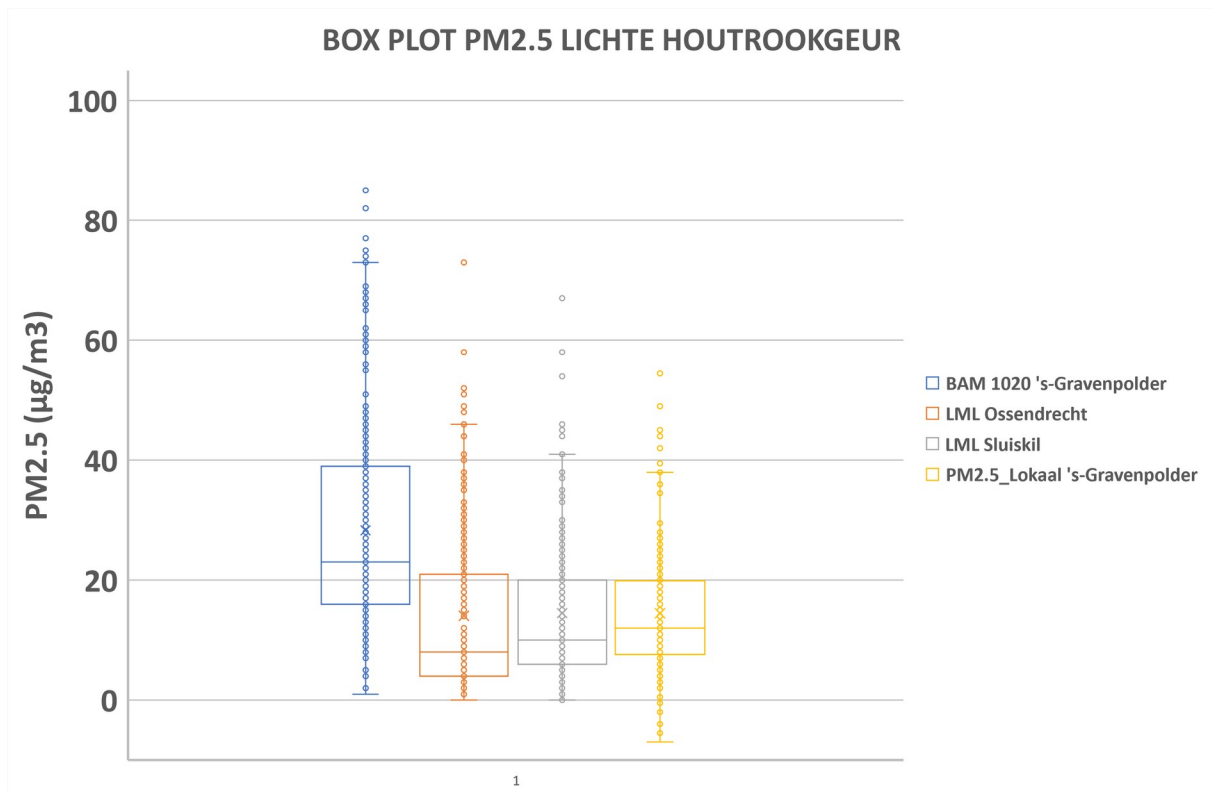
Tabel 7: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met intensiteit waargenomen matige houtrookgeur

Matige houtrookgeur	Eenheid	SGP	SGP_Lok	OSD	SLK
Aantal		66	66	65	66
Gemiddelde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	44	25	21	17
Mediaan	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	41	25	20	15
Standaarddeviatie	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	18	11	16	11
Minimum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	18	0	3	1
Maximum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	58	83	55

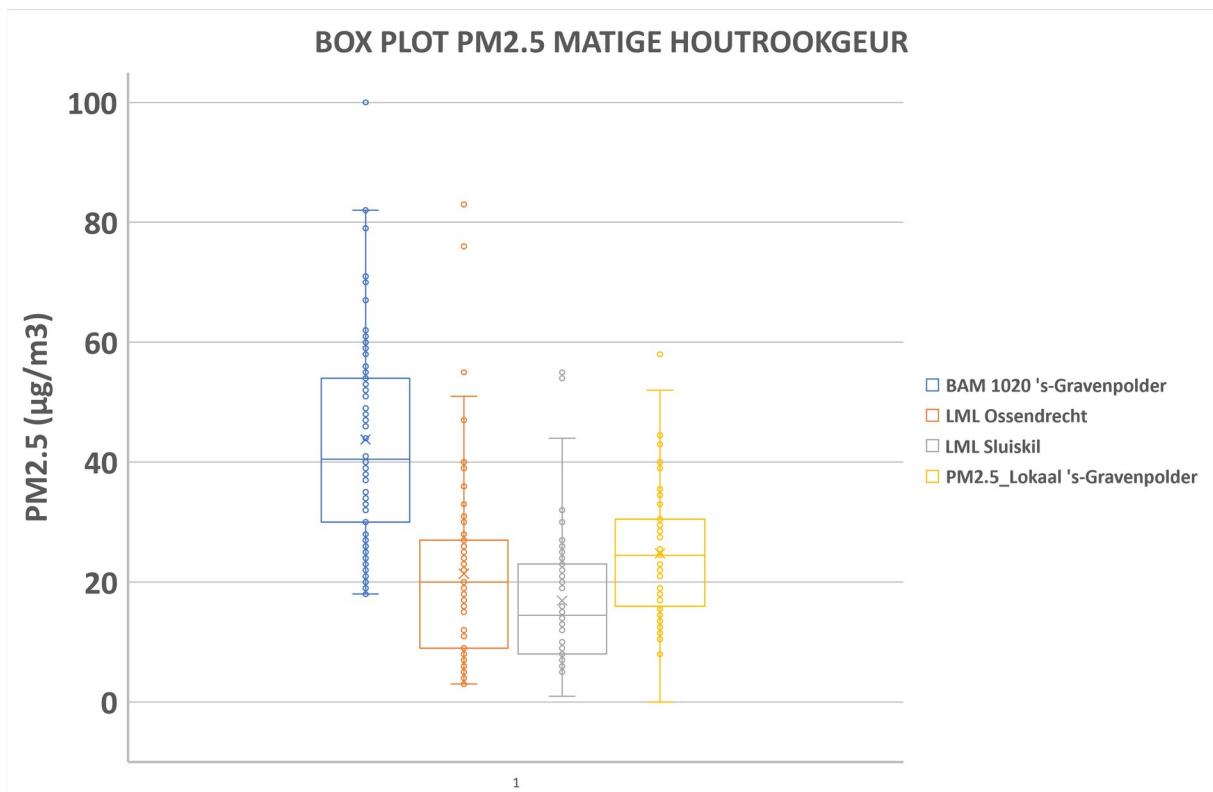
Tabel 8: Statistische evaluatie uurwaarden in relatie met intensiteit waargenomen sterke houtrookgeur

Sterke houtrookgeur	Eenheid	SGP	SGP_Lok	OSD	SLK
Aantal		7	7	7	7
Gemiddelde	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	62	35	28	26
Mediaan	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	61	36	18	15
Standaarddeviatie	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	28	11	21	23
Minimum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	12	8	8
Maximum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	45	61	62

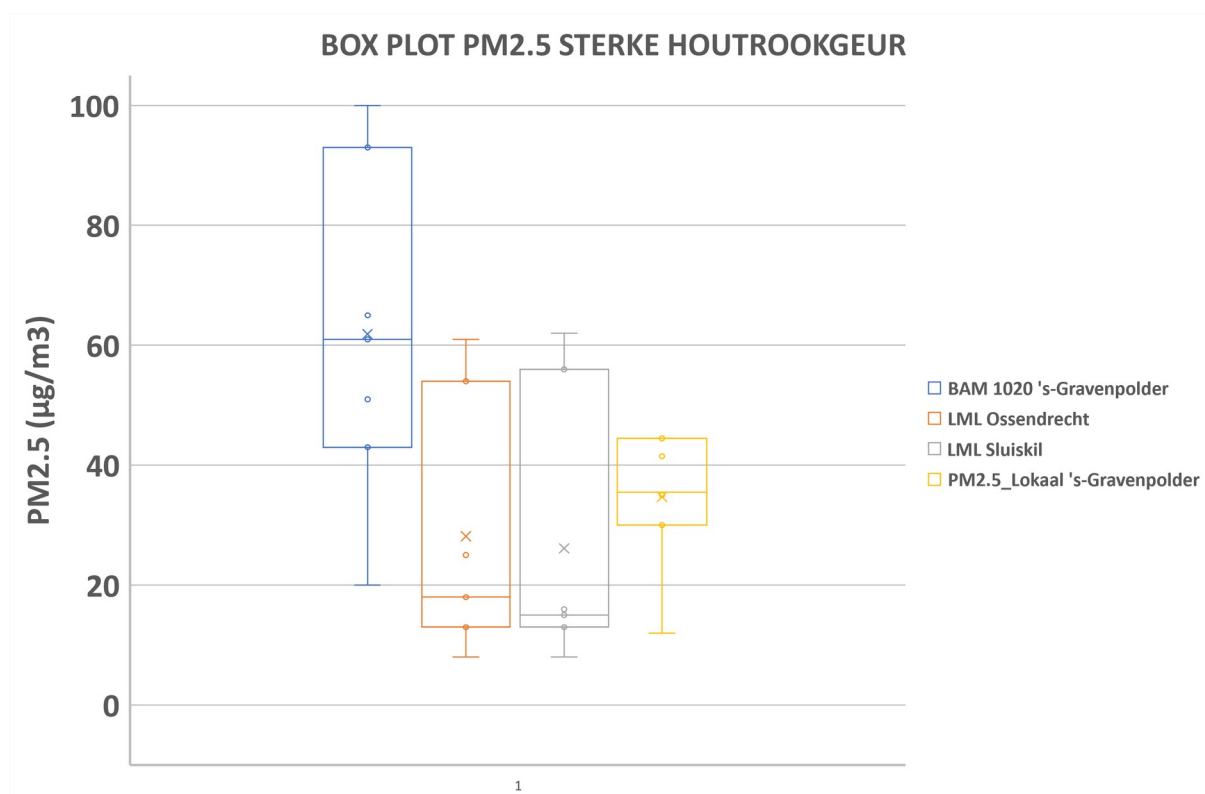
In afbeelding 41, 42 en 43 is de Box-Whisker plot weergegeven van de uurwaarden verkregen waarvoor geldt, dat er een lichte, matige of sterke houtrookgeur is waargenomen.



Afbeelding 41: Box-Whisker plot van de uurwaarden waarbij lichte houtrookgeur is waargenomen.



Afbeelding 42: Box-Whisker plot van de uurwaarden waarbij matige houtrookgeur is waargenomen.



Afbeelding 43: Box-Whisker plot van de uurwaarden waarbij sterke houtrookgeur is waargenomen.

De statistische evaluatie in tabel 6, 7 en 8 en de Box-Whisker plots in afbeelding 41, 42 en 43 laten duidelijk zien, dat zowel de gemiddelde uurwaarde als de mediaan in 's-Gravenpolder toenemen bij een hogere intensiteit van de waargenomen houtrookgeur. Op basis van de 400 uurwaarden is aangetoond, dat particuliere houtstook voor 50% bijdraagt in de totale concentratie fijnstof PM2.5 in de buitenlucht indien er in de buurt van de meetlocatie hout wordt gestookt. Op basis van de statistische evaluatie volgens tabel 6, 7 en 8 kan deze bijdrage ook worden berekend voor de situatie waarbij lichte, matige of sterke houtrook is waargenomen. De bijdrage is dan respectievelijk 50%, 57% en 56% en geldt als gemiddelde voor respectievelijk 200, 66 en 7 uurwaarden. De procentuele bijdrage in de fijnstofconcentratie stijgt minder snel met toenemende intensiteit van de houtrookgeur dan men mogelijk zou verwachten. Een oorzaak zou kunnen zijn, dat er geen sterke correlatie aanwezig is tussen de fijnstofconcentratie en de concentratie geurcomponenten. Er zijn slechts zeven uurwaarden gemeten waarbij er een sterke houtrookgeur is waargenomen. De statistiek voor deze groep uurwaarden is daarom minder betrouwbaar dan de andere twee groepen. Voor de LML-stations geldt ook, dat de gemiddelde uurwaarde en de mediaan toenemen bij een toenemende intensiteit van de waargenomen houtrookgeur in 's-Gravenpolder. Dit effect is al eerder waargenomen bij de statistische evaluatie van de totale set van 400 uurwaarden en de eerder besproken mogelijke oorzaken spelen nu ook een rol.

In het algemeen geldt, dat het niet mogelijk is om op basis van fijnstofmetingen uitsluitend te geven welk gedeelte van de totaal gemeten hoeveelheid fijnstof PM2.5 specifiek afkomstig is van particuliere houtstook. Dit geldt niet alleen voor de locatie 's-Gravenpolder, maar ook voor de LML-stations. Een meer specifieke methode om de bijdrage van particuliere houtstook te onderscheiden van andere bronnen is op basis van het meten van roet (black carbon) met de

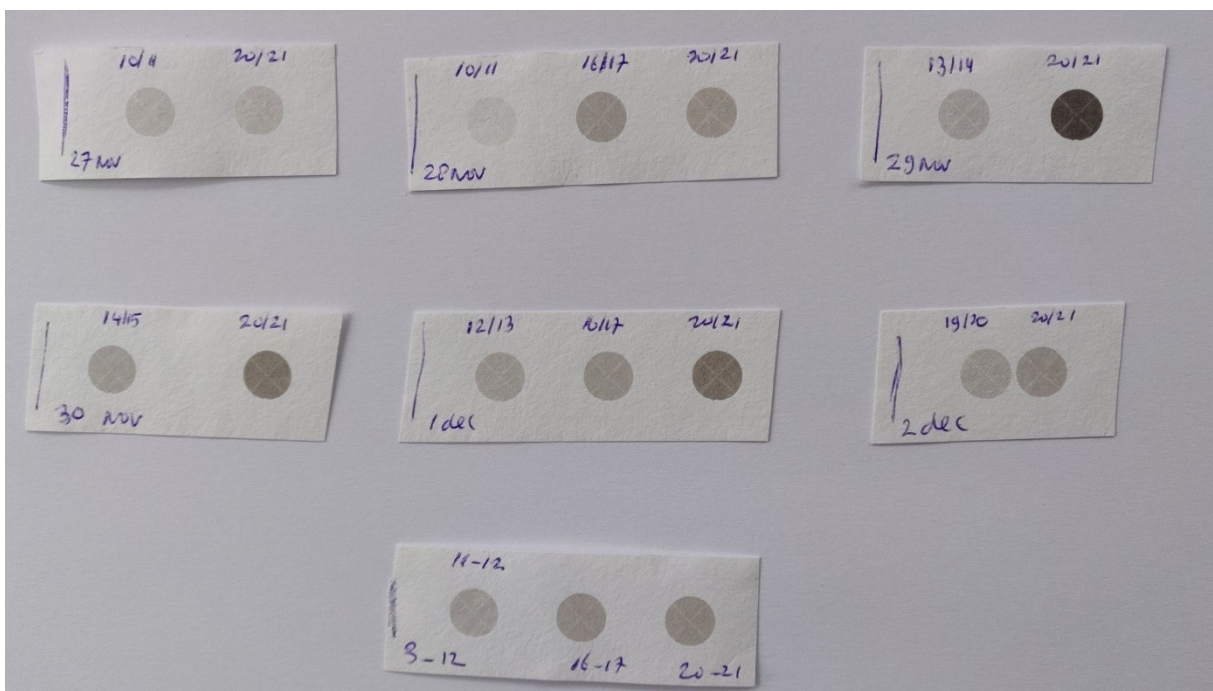
AE33 Aethalometer¹⁴ van Magee Scientific. Het beschikbare budget voor dit onderzoek was helaas ontoereikend om deze roetmeter in te zetten.

¹⁴ <https://www.aerosolmageesci.com/products/aerosol-magee-scientific-aethalometer/>

8.9 Visuele inspectie BAM 1020 filter spots

De BAM 1020 zuigt tijdens de meetcyclus circa 700 liter buitenlucht door de filtertape heen. Alle deeltjes kleiner dan $2.5 \mu\text{m}$ blijven achter op de filter tape en vormen een zogenaamde "spot". De spot vertoont een kleur waarvan, afhankelijk van het type deeltjes en de concentratie van de deeltjes in de buitenlucht, de intensiteit kan variëren. Houtrook bevat naast fijnstof ook veel roet en de kleur van roet is donkerbruin tot zwart. Als er tijdens de meetcyclus veel houtrook in de buitenlucht aanwezig is, zal de zwart- en bruinkleuring van de spot intenser zijn, dan de situatie waarbij er géén houtrook aanwezig is geweest.

In de foto van afbeelding 44 zijn diverse filter spots van verschillende dagen weergegeven. De spots zijn gerangschikt op datum en tijd. Het betreft een willekeurige steekproef uit de totale meetperiode.



Afbeelding 44: BAM 1020 filter spots van diverse meetsessies

Op 29 november 2022 van 20-21 uur en op 3 december is er matige houtrookgeur waargenomen. Voor de overige dagen geldt, dat er voor de meetcyclus van 20-21 uur lichte houtrookgeur is waargenomen. Het is opvallend, dat voor elke dag (m.u.v. 28 november) de spot van 20-21 uur de donkerste kleur vertoont. Over het algemeen is in de avond tussen 19 uur en 23 uur de houtrookgeur het sterkst.

9 Conclusies & Aanbevelingen

Het doel van dit onderzoek was het bepalen van de bijdrage van particuliere houtstook aan de totale concentratie fijnstof PM2.5 in de buitenlucht in een woonomgeving waar de houtkachel voor een substantieel deel wordt gebruikt voor verwarming van de woning. Om dit te kunnen onderzoeken zijn er 400 uurwaarden gemeten met de Met-One BAM1020 in de periode november 2022 tot en met mei 2023. De uurwaarden zijn gemeten tussen 8 uur en middernacht en de meetmomenten zijn dusdanig gekozen, dat er een evenwichtige balans is geweest in de dagen van de week en de uren van de dag. Voor dit onderzoek zijn de locaties Sluiskil en Ossendrecht van het Landelijk Meetnetwerk Luchtkwaliteit gekozen om de achtergrondconcentratie fijnstof PM2.5 te kunnen bepalen.

Op basis van de 400 uurwaarden is aangetoond, dat particuliere houtstook voor 50% bijdraagt in de totale concentratie fijnstof PM2.5 in de buitenlucht indien er in de buurt van de meetlocatie hout wordt gestookt. Met andere woorden, particuliere houtstook veroorzaakt een verdubbeling van de achtergrondconcentratie fijnstof PM2.5. Naast de bijdrage van particuliere houtstook aan de totale fijnstofconcentratie PM2.5 in de buitenlucht, is onderzocht of er een verband is tussen de toename van de fijnstofconcentratie PM2.5 en de waargenomen intensiteit van de houtrookgeur. Er blijkt een lichte toename te zijn indien de waargenomen houtrookgeur matig tot sterk is.

Er zijn redelijk sterke aanwijzingen, dat er op de achtergrondstations Ossendrecht en Sluiskil ook sprake is van fijnstof PM2.5 afkomstig van particuliere houtstook. Dat zou betekenen, dat de berekende bijdrage van particuliere houtstook aan de totale concentratie fijnstof PM2.5 in 's-Gravenpolder een onderschatting zou kunnen zijn.

Dit onderzoek is uitgevoerd gedurende een relatief zachte winter. De waargenomen impact van houtstook op de fijnstof belasting van de omgevingslucht, zal mogelijk voor een koude of strenge winter hoger kunnen zijn.

Er is een duidelijk verband aangetoond tussen de windrichting, windkracht en fijnstofconcentratie PM2.5. Dit verband komt goed overeen met de windrichtingen waarin de meest actieve houtkachels zijn gesitueerd. Verhoging van de fijnstofconcentratie, als gevolg van houtstook in de omgeving, kan zowel bij lagere als hogere windsnelheid plaatsvinden. De verhoging is afhankelijk van de afstand tot de houtkachel(s), maar ook van de ruimtelijke indeling van gebouwen in de omgeving.

Fijnstof PM2.5 is een zeer belangrijke component van houtrook. Fijnstof is echter geen specifieke houtrook marker. Het dient de aanbeveling dit onderzoek te herhalen waarbij tevens de aan biomassa toegeschreven fractie van roet wordt gemeten met de Aethalometer. Gezien de gezondheid schadelijke effecten van houtrook dient het tevens de aanbeveling de meting van Poly Aromatische Koolwaterstoffen te betrekken bij het onderzoek. Hierbij is Benzo-a-Pyreen de belangrijkste, omdat deze stof een hoog kankerverwekkend potentieel heeft en er een grenswaarde beschikbaar is.

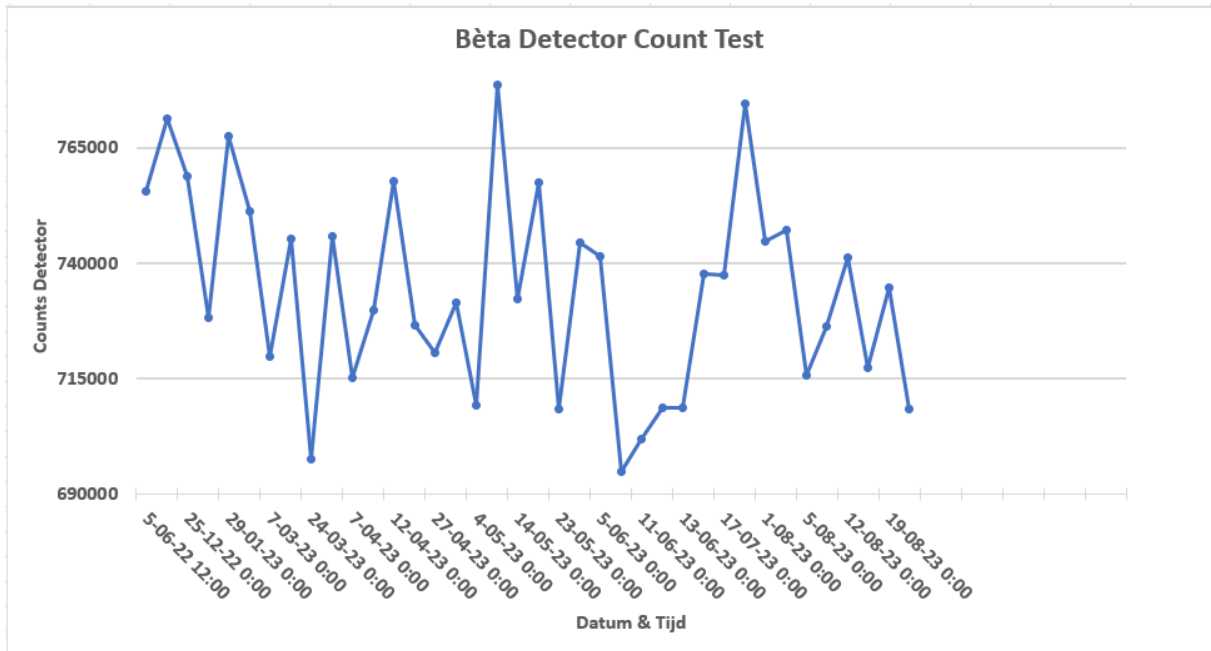
Op 14 februari 2023 was er een stookalert van kracht en op die dag is een hoogste uurwaarde van 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fijnstof PM2.5 gemeten. Tijdens de metingen op die dag was er in de buitenlucht sprake van matige tot sterke houtrookgeur. Het beoogde doel van het stookalert, namelijk het

voorkomen van houtrook overlast bij ongunstige atmosferische omstandigheden, lijkt op 14 februari 2023 niet doeltreffend te zijn geweest.

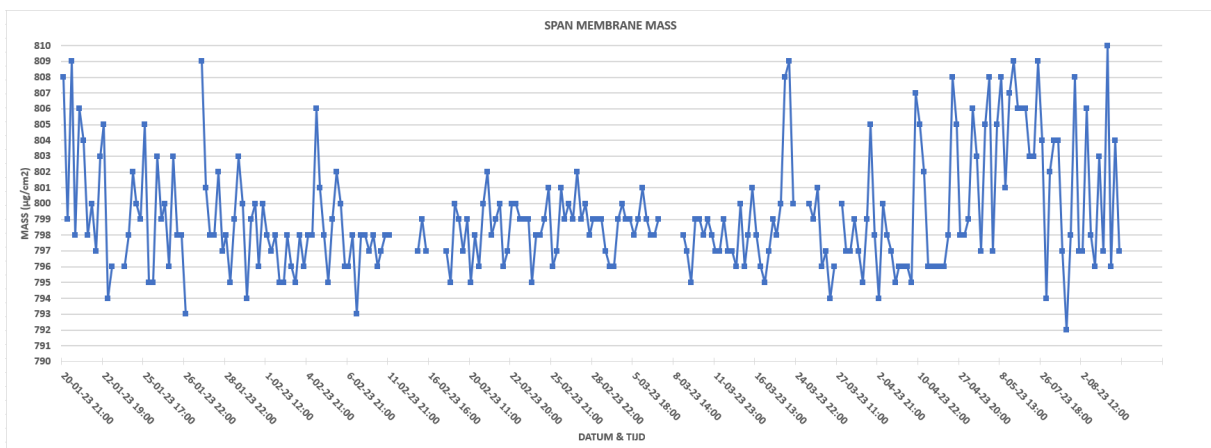
Dit onderzoek is uitgevoerd door burgerwetenschappers. De behaalde resultaten van dit onderzoek zijn bedoeld om de bewustwording van onze woonomgeving te vergroten. Schone en gezonde lucht is van levensbelang, het is een drijfveer van het Schone Lucht Akkoord. Burgers moeten zich ervan bewust zijn, dat particuliere houtstook een zeer belangrijke, zo niet de belangrijkste bron van lokale luchtvervuiling in een woonomgeving kan zijn. Dit onderzoek heeft aangetoond, dat particuliere houtstook een grote impact heeft op de luchtkwaliteit in een woonomgeving waar mensen dicht op elkaar wonen en waar de blootstelling aan houtrook hoog is.

10 Bijlagen

10.1 Bijlage Controlekaarten



Afbeelding 45: Controlekaart Count Test van de detector



Afbeelding 46: Controlekaart interne referentie membraan