

Een meetaanpak voor het bepalen van de
verspreiding van houtrook in gemeenten

Houtrookpilot IJmond 2023-2024



TNO 2024 R12308 – 25 september 2025

Houtrookpilot IJmond 2023-2024

Een meetaanpak voor het bepalen van de verspreiding van houtrook in gemeenten

Auteurs	Paula Bronsveld, Daniëlle van Dinther, Marcus Blom, Harmen van Mansom, Gerrit Jan de Bruin-Hoegee, Sjaak Kaandorp, Joyce Fabriek
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Bijlagen	TNO Public
Aantal pagina's	83 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Programmanaam	IenW Milieuprogramma
Projectnaam	IenW Milieuonderzoek 2024
Projectnummer	060.58907

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2025 TNO

Samenvatting

Houtrookoverlast is een beladen onderwerp waarbij de behoefte aan een kwantitatieve aanpak bij de verschillende belanghebbenden steeds groter wordt. Om hier meer grip op te krijgen, heeft TNO in het winterseizoen van 2023-2024 een pilotstudie uitgevoerd in de IJmondregio, met een centraal meetpunt in Heemskerk.

Het doel van de pilot was om een meetaanpak te testen, waarmee gemeenten de aanwezigheid, verspreiding en intensiteit van houtrook van uur tot uur op wijkniveau kunnen volgen aan de hand van fijnstof- en roetmetingen¹. De pilot is uitgevoerd in samenwerking met de Omgevingsdienst IJmond, Waag Future Lab en enthousiaste burgers uit het burgermeetnetwerk Hollandse Luchten (HL).

De conclusie is dat de meetaanpak werkt: in totaal zijn 39 houtrookmomenten geïdentificeerd aan de hand van fijnstof- en roetmetingen, waarvan het grootste deel gecheckt is door middel van levoglucosanmetingen. Levoglucosan is de belangrijkste marker voor de aanwezigheid van houtrook in de lucht, deze stof kan niet met relatief goedkope sensoren gemeten worden. Voor roet en fijnstof is dit wel mogelijk, wat handvatten geeft voor lokaal beleid en voor meer betrokkenheid en inzicht voor burgers.

De 39 houtrookmomenten komen overeen met 598 uren (eq. 25 dagen), waarvan 352 uren (eq. 15 dagen) met een PM_{2.5}-concentratiewaarde boven de WHO-normwaarde van 15 µg/m³. Deze norm geeft aan welk concentratieniveau van fijnstof als veilig wordt beschouwd voor de gezondheid. Houtrook levert een meetbare bijdrage aan het aantal gemeten daggemiddelde WHO-norm overschrijdingsdagen. Van de 27 dagen in de meetperiode waarop de daggemiddelde PM_{2.5}-concentratie de WHO-norm 15 µg/m³ overschrijdt, zou deze overschrijding er op 9 dagen (33%) niet zijn geweest zonder de bijdrage van houtrook. Tijdens houtrookmomenten was de bijdrage van houtrook aan de PM_{2.5}-concentratie² gemiddeld 40%, met een gemiddelde concentratie PM_{2.5} door houtrook van 7,6 µg/m³ en een piekconcentratie van 13,3 µg/m³. Gemiddeld over alle wintermaanden was de bijdrage van houtrook aan de totale PM_{2.5}-concentratie 12,1%.

De selectie van houtrookmomenten is gebaseerd op drempelwaarden voor roet (>2 µg/m³) en fijnstof (>5 µg/m³), waarna aanvullende criteria worden gebruikt om het hele houtrookmoment in beeld te krijgen. Het aantal gevonden houtrookmomenten blijkt met name afhankelijk van de drempelwaarde voor roet en minder van de fijnstofdrempelwaarde. Daarnaast is de verhouding PM_{2.5}/roet geïdentificeerd als een mogelijk nog krachtiger selectiecriterium. Dit zal in een vervolgstudie nader onderzocht worden.

Door inzet van de Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) voor snelle bepaling van levoglucosan, met korte tijdsintervallen van 10 minuten, konden houtrookpieken bij de campagne nauwkeurig gevolgd worden. Zo werd goed zichtbaar wanneer en hoe snel de concentraties veranderden. Het verloop van de levoglucosanmetingen kwam goed overeen met dat van de roetmetingen, in het bijzonder voor lage windsnelheden en koude omstandigheden. Hiermee is aangetoond dat ook roet een goede indicator is voor houtrook, zelfs bij metingen in korte tijdsintervallen³.

¹ Met roet wordt hier verwezen naar aethalometer metingen van "black carbon" (BC), waarbij gekeken wordt naar de absorptie van fijnstof op een filter bij een golflengte van 470 nm (kanaal BC1, met name organisch roet).

² PM_{2.5} is de fractie van fijnstof (Particulate Matter) in de lucht waarvan de deeltjes een diameter van 2,5 micrometer of minder hebben.

³ Een goede correlatie tussen roet en levoglucosan werd al eerder aangetoond op basis van 24-uurs filtermetingen.

De fijnstofsensoren uit het Hollandse Luchten-netwerk bleken, ondanks ruis, goed in staat de fijnstofmetingen te volgen⁴. Door het verloop van de fijnstofdata van de sensoren dynamisch op de kaart weer te geven kon onderscheid gemaakt worden tussen houtrookmomenten waarop fijnstof wordt gedomineerd door “overwaaiend” fijnstof, en fijnstof door lokale houtrook in specifieke wijken. Deze classificatie is belangrijk om de resultaten goed te duiden. Fijnstofmetingen met waarden boven de 25 µg/m³ zijn doorgaans niet uitsluitend toe te kennen aan lokale houtrook. Hierbij spelen ook andere fijnstofbronnen, met daarin mogelijk ook houtrook van verder weg, een grote rol.

De TNO-roetsensorkastjes toonden potentie in de pilot en leverden bruikbare data op. Herontwerp van de kastjes om de stabiliteit te verbeteren is echter nodig voor langdurige inzet in de toekomst. Het streven is om begin 2026 een verbeterde versie van de roetsensoren opnieuw in de praktijk te testen.

Naast roet en levoglucosan zijn ook CO, NO₂ en UFP onderzocht als aanvullende indicatoren. CO en NO₂ vertonen vaak verhoogde concentraties tijdens houtrookmomenten, maar deze stoffen worden ook beïnvloed door andere bronnen zoals verkeer. Het opstellen van drempelwaarden voor houtrookselectie aan de hand van de combinatie van UFP (deeltjesconcentraties voor houtrook 10.000 - 30.000/cm³) en roet lijkt mogelijk nog krachtigere selectiecriteria te bieden dan PM_{2,5} en roet, met de kanttekening dat UFP sensoren op het moment nog veel duurder zijn dan fijnstofsensoren. Toch zijn deze stoffen minder specifiek dan roet en levoglucosan, en vooral geschikt als ondersteunende indicatoren bij de duiding van meetdata.

In het vervolgtraject (2024–2025) wordt gewerkt aan het verbeteren van de roetsensortechnologie, validatie van de ACSM-metingen via filteranalyses en verdere verfijning van de selectiecriteria, waaronder de verhouding tussen roet en fijnstof.

Ook is een duidelijke volgende stap om te testen of door de inzet van meerdere roetsensoren met grotere zekerheid onderscheid gemaakt kan worden tussen houtrook in verschillende wijken. Met één centraal meetpunt worden mogelijk nog lokale pieken op wat grotere afstand gemist.

⁴ Wel meten de sensoren vaak te hoge fijnstofwaarden (tot bijna een factor 2 hoger), het is dus raadzaam om de sensoren opnieuw te kalibreren.

Samenvatting	3
1 Inleiding	6
2 Opzet van de houtrookpilot in Heemskerk	9
2.1 De meetopzet	9
2.2 Het centrale meetpunt in Heemskerk	10
2.3 Citizen Science fijnstofmetingen	12
2.4 TNO roetsensorkastjes	13
3 Houtrookdetectie met roet- en levoglucosan metingen	15
3.1 De ACSM voor metingen van levoglucosan	16
3.1.1 Metingen van zuiver levoglucosan	16
3.1.2 Atmosferische metingen van levoglucosan	17
3.2 Vergelijking van de ACSM en aethalometer metingen	19
3.3 Conclusies hoofdstuk 3	24
4 Selectie houtrookmomenten in fijnstof op basis van roet en levoglucosan	25
4.1 Bepaling drempelwaarden voor de selectie van houtrookmomenten	25
4.1.1 Identificatie van houtrook in lokaal fijnstof en achtergrondfijnstof	26
4.1.2 Van thresholdwaarde naar volledige selectie van het houtrookmoment	28
4.1.3 Achtergrondbijdrage op houtrookmomenten	30
4.2 Onzekerheden bij bepaling houtrookmomenten	32
4.2.1 Algemene checks	32
4.2.2 Kwantitatief effect van gekozen waarden	35
4.3 Kengetallen voor houtrook in de IJmond	37
4.4 Conclusies hoofdstuk 4	38
5 Fijnstof en roet sensoren voor de verspreiding van houtrook	40
5.1 Ontwikkeling van de TNO roetsensoren	40
5.2 Datakwaliteit van de roetsensoren	41
5.3 Gebruik van de fijnstofsensoren uit het Hollandse Luchten meetnetwerk	43
5.4 Verspreiding houtrook over IJmondgemeenten	44
5.5 Conclusies hoofdstuk 5	46
6 Andere stoffen in houtrook	47
6.1 Correlatie met andere gemeten stoffen	47
6.2 Selectie op basis van UFP en roet	48
6.3 Drempelwaarden op basis van CO en NO ₂	49
6.4 Conclusies hoofdstuk 6	50
7 Conclusies en vervolg	51
7.1 Vervolg	52
8 Dankwoord	53
9 Referenties	54
Bijlagen	
Bijlage A: Potentiele houtrookmomenten (false negatives ACSM > 0.015)	57
Bijlage B: Potentiele houtrookmomenten (false negatives ACSM > 0.015)	57
Bijlage C: Geselecteerde houtrookmomenten	63

1 Inleiding

Houtstook roept vaak beelden op van gezelligheid: warm en knus bij een knapperend haardvuur zitten wanneer het buiten koud is. Toch blijkt steeds duidelijker dat houtstook ook nadelen met zich meebrengt. De rook die uit de schoorsteen komt, verspreidt zich in stedelijke gebieden, wat leidt tot ruikbare luchtvervuiling en soms zelfs tot luchtwegklachten bij omwonenden die eraan worden blootgesteld [1].

Discussies over houtrook zijn vaak sterk gepolariseerd; je bent 'voor' of 'tegen' het stoken van hout. Aan de ene kant is er de positieve associatie van veel mensen met een knapperend vuurtje, of beschouwen mensen houtstook als een alternatief voor de hoge gasprijzen. Aan de andere kant zijn er ook veel klachten van burgers die overlast van houtrook ervaren en houtrook heeft een meetbaar negatief effect op de luchtkwaliteit.

In houtrook zit, naast andere schadelijke stoffen, ook veel fijnstof. Wel 23% van de Nederlandse fijnstofuitstoot is het gevolg van het verbranden van hout en andere biomassa [2]. In de EU is er regelgeving die een wettelijke norm stelt aan de maximale blootstelling van burgers aan fijnstof. De emissies van houtstook zijn echter lastig te beperken.

Daar komt bij dat de aanwezigheid en intensiteit van houtrook lastig te lokaliseren en te kwantificeren is. Het is een emissiebron die wijd verspreid is en de installatie van een houtkachel hoeft niet gemeld of gekeurd te worden. Voor kwantificering worden emissiemodellen gebruikt op basis van statistische gegevens, zoals het aantal schoorstenen in een wijk en de verkoopcijfers van hout en kachels. Het blijft echter lastig om een correcte schatting te maken van bijvoorbeeld de vorming van secundaire deeltjes in rookgassen en om in te schatten wat het effect is van variaties in de wijze van stoken. Deze onzekerheden zijn echter klein genoeg om de algemene conclusies over de bijdrage van houtrook aan de luchtvervuiling niet te beïnvloeden. De precisie van deze modellen is echter nog niet toereikend voor individuele gemeenten en omgevingsdiensten om de blootstelling van burgers aan houtrook effectief te beperken en hierop te handhaven.

Eerder geteste methoden voor de bepaling van houtrookblootstelling

In de afgelopen decennia zijn diverse methoden ontwikkeld en toegepast om de concentraties van fijnstof en andere componenten in houtrook te meten, om daarmee voor gemeenten de mate van blootstelling van bewoners beter in beeld te brengen. Ook TNO is hier al langer mee bezig (bijv. bij metingen aan de schoorsteen in 2020 [3]). Een goed begrip van het verbrandingsproces en de bijbehorende emissies is hierbij essentieel.

Bij houtverbranding worden verschillende stoffen gevormd als gevolg van processen zoals dehydratie, pyrolyse, oxidatie en vergassing. Tijdens de vlamfase ontstaan vluchtige organische verbindingen, teerachtige stoffen en koolstofrijke deeltjes (char), vooral uit biopolymeren zoals cellulose en lignine. Deze stoffen dragen bij aan de vorming van fijnstofdeeltjes, voornamelijk via condensatie. In de daaropvolgende smeulfase worden de resterende koolstofdeeltjes verder geoxideerd [4].

De samenstelling van de emissies hangt sterk af van het type verbrandingstoestel: automatische ketels produceren relatief meer anorganische zouten zoals kaliumchloride en kaliumsulfaat (KCl en K_2SO_4), terwijl houtkachels onder minder efficiënte omstandigheden juist meer organisch materiaal uitstoten [5].

Een veelgebruikte benadering voor de detectie van particuliere houtrook is daarom het gebruik van organische tracers, waarvan levoglucosan de bekendste is. Deze stof ontstaat bij verbranding van cellulose en is specifiek voor biomassaverbranding, waardoor het een robuuste indicator is voor houtrook [6], [7]. Levoglucosan wordt doorgaans gemeten via filterbemonstering, gevolgd door laboratoriumanalyse met technieken zoals GC-MS of HPLC-MS⁵. Deze methode is zeer specifiek, maar kent beperkingen in tijdsresolutie (daggemiddelden) en is relatief kostbaar en arbeidsintensief [8].

Bovendien is de stabiliteit van levoglucosan in de atmosfeer onderwerp van discussie: hoewel het in veel studies als stabiel wordt beschouwd, zijn er aanwijzingen dat het onder invloed van oxidatieve processen kan degraderen [8], [9].

Naast detectie van levoglucosan zijn er ook alternatieve methoden voor detectie van houtrook ontwikkeld, zoals optische technieken gebaseerd op lichtabsorptie van verzamelde roetdeeltjes. De AE33 aethalometer [10] is een voorbeeld van een instrument dat via absorptiemetingen op meerdere golflengten tegelijk, onderscheid kan maken tussen roet van fossiele brandstoffen (BC_{ff}) en roet van houtverbranding (BC_{wb}), waarbij BC staat voor Black Carbon. De methode maakt gebruik van verschillen in de spectrale absorptie-eigenschappen van deeltjes [11], [12]. Verschillende studies, waaronder ook enkele in Nederland [13] en Vlaanderen [14], hebben aangetoond dat AE33 metingen goed correleren met levoglucosanmetingen. Daarmee bieden AE33 metingen een alternatief voor levoglucosan, dat mogelijk beter geschikt is voor continue houtrookmonitoring met hoge tijdsresolutie.

Zoals eerder genoemd, worden, naast chemische en optische meetmethoden, ook modellen gebruikt om blootstelling aan houtrook te berekenen. Hierbij worden emissies geschat op basis van statistische gegevens over houtverbruik, kacheltypes en meteorologische omstandigheden en omgerekend naar lokale concentraties. Deze modellen worden al gebruikt voor beleidsdoeleinden, maar missen helaas nu nog de ruimtelijke en temporele resolutie om zeer lokale blootstelling betrouwbaar te kwantificeren. Gedetailleerde en houtrook-specifieke meetdata kan er aan bijdragen om de resolutie van deze modellen te verbeteren en hier wordt ook hard aan gewerkt. Zo wordt bijvoorbeeld in het project van de Nordic Council (2025) [15] gebruik gemaakt van metingen, modellering, gezondheidsimpactanalyse en beleidsscenario's om de bijdrage van houtverbranding aan sterfte en ziektelast in kaart te brengen.

Aanpak in dit onderzoek: meer grip op houtrookoverlast op wijkniveau

Dit rapport beschrijft een nieuwe aanpak voor het in kaart brengen van houtrookoverlast, waarvoor een eerste pilot is uitgevoerd in de IJmondgemeenten in het stookseizoen 2023-2024⁶.

De beoogde aanpak maakt gebruik van een combinatie van snelle, met een veel hogere frequentie dan daggemiddelde, roet- en fijnstofmetingen. Over wijken verspreide sensoren voor deze metingen worden beheerd door bewoners of de gemeente, om de, in de tijd sterk variërende, bijdrage van houtrook aan de lokale $PM_{2.5}$ ⁷ concentratie op

⁵ GC-MS (gaschromatografie-massaspectrometrie) is een veelgebruikte methode voor het meten van levoglucosan in aerosolen, waarbij na extractie en chemische omzetting de isomeren met hoge resolutie en gevoeligheid worden gescheiden. HPLC-MS (high-performance vloeistofchromatografie gekoppeld aan massaspectrometrie) maakt snelle en gevoelige detectie van levoglucosan mogelijk zonder chemische omzetting, en is geschikt voor zeer lage concentraties in onder andere luchtmonsters.

⁶ Een stookseizoen loopt van oktober tot mei.

⁷ $PM_{2.5}$ staat voor de fractie van het fijnstof (Particulate Matter) met een deeltjesgrootte kleiner dan 2,5 micrometer. Daarnaast worden vaak ook PM_{10} gebruikt voor de fracties met een deeltjesgrootte kleiner dan 10 micrometer, respectievelijk. PM_{10} is bijvoorbeeld dus een deel van $PM_{2.5}$.

wijkniveau te onderscheiden van de bijdrage van andere bronnen. Bij de pilot is gebruik gemaakt van een centraal meetpunt waar, ter referentie, ook roet- en fijnstofmetingen en levoglucosanmetingen zijn uitgevoerd. Het is echter de bedoeling dat dit bij verdere uitrol van de methode, na goede kalibratie van de sensoren, niet meer nodig is.

De, op basis van deze metingen bepaalde, totale bijdrage van houtrook aan de fijnstofconcentratie over een langere periode kan vervolgens worden vergeleken met bestaande normen voor fijnstof, zoals bijvoorbeeld de door de World Health Organisation (WHO) geadviseerde waarde voor daggemiddelde concentraties (uit 2021) van $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Houtrookpieken in een wijk duren vaak maar enkele uren, maar het is de verwachting dat in zwaar belaste wijken het aantal uren dat deze fijnstofnorm wordt overschreden als gevolg van houtrook optelt tot ruimschoots meer dan 3 dagen, de limiet die is voorgeschreven door de WHO.

Meer inzicht in dit soort kengetallen van houtrook biedt gemeenten meer inzicht in de grootte van het probleem en kwantitatieve handvatten om gericht met houtrook om te gaan. Door de houtrookbijdrage aan de luchtvervuiling per wijk te bepalen, kunnen bijvoorbeeld probleemlocaties voor gemeenten beter in beeld gebracht worden of kunnen bewoners samen een oplossing bedenken om houtrookconcentraties **verifieerbaar** laag genoeg te houden om de lokale fijnstofconcentratie onder de WHO-norm te houden.

Daarnaast kan op basis van betere gegevens over de verspreiding van houtrook in stedelijk gebied een slag gemaakt worden in de verbetering en verificatie van de huidige emissie- en verspreidingsmodellen van houtrook en in de herkenning van houtrook in meetdata van bijvoorbeeld het landelijke meetnet luchtkwaliteit (LML).

2 Opzet van de houtrookpilot in Heemskerk

Sinds het in 2022 verschijnen van het rapport van de Samenwerking Houtrookonderzoek [17] werkt TNO, binnen het IenW Milieuonderzoeksprogramma, verder aan de ontwikkeling van een betrouwbare meetmethode voor houtrook in wijken. Een belangrijk onderdeel van deze ontwikkeling is het testen van nieuwe methoden in de praktijk, bijvoorbeeld op één of meerdere locaties in een gemeente tijdens de winterperiode. Op die manier kunnen snel concrete stappen worden gezet en kan waardevolle praktijkkennis en input van burgers, de gemeente en de omgevingsdienst direct worden benut.

In 2023 heeft TNO de krachten gebundeld met de Omgevingsdienst IJmond en het Public Research project Hollandse Luchten (HL), dat wordt gecoördineerd door Waag Future Lab in Amsterdam. Samen met deze partners is in november 2023 de houtrookmeetpilot in de IJmond gestart, welke doorliep tot eind mei 2024⁸. Door tegenslagen in de ontwikkeling van de roetsensoren, is er een vervolg op de pilot in stookseizoen 2024-2025 uitgevoerd, om nog een seizoen aan data te verzamelen met daarbij ook meer informatie over de verspreiding van roet in de wijken. De uitwerking van deze data volgt in een aanvullend rapport.

2.1 De meetopzet

Het doel van de meetpilot is om een methode te ontwikkelen, waarmee gemeenten meer inzicht kunnen krijgen in de houtrookblootstelling. Kwantitatieve informatie over de intensiteit en verspreiding van houtrook in gemeenten, biedt handvatten waar en hoeveel maatregelen nodig zijn. Een beter begrip van het probleem maakt maatwerk en discussie op inhoud mogelijk.

Door de grote variatie en korte duur van stookoverlast situaties is het echter lastig om een eenduidig protocol op te stellen voor toetsing van een houtrookmeting aan een normwaarde bij een individuele gehinderde of stoker. Ook is er meestal sprake van meerdere stookbronnen in een wijk die houtrookoverlast veroorzaken en werken rekenmodellen voor brontoekenning niet goed op de schaal van één huishouden.

In de Houtrookpilot 2023-2024 is daarom getest of de bijdrage van houtrook aan de lokale fijnstofconcentratie per wijk gekwantificeerd en in kaart gebracht kan worden op basis van data van een combinatie van roet- en fijnstofsensoren, verdeeld over een (aantal) gemeente(n).

Hiervoor is gekozen, omdat bij een eerdere studie van TNO in 2020-2021 [17], in samenwerking met andere partners, roet een goed bruikbare indicator voor de daggemiddelde aanwezigheid van houtrook bleek (in vergelijking met levoglucosan). Ook bleek de TNO roetsensor een mogelijk betaalbaar alternatief voor een veel duurder roetmeetinstrument. De aanwezigheid van houtrook in een wijk bleek goed aantoonbaar en het aandeel van houtrook in de totale luchtverontreiniging op basis van fingerprinting en achtergrondcorrecties kon vrij goed bepaald worden.

⁸ De precieze looptijd was 16 november 2023 – 30 mei 2024, in totaal 196 dagen

Aangezien roet ook andere bronnen heeft dan houtstook, bijvoorbeeld verkeer en industrie, is in deze pilot uitgezocht in hoeverre roetmetingen, mogelijk in combinatie met extra criteria zoals een drempelwaarde, een combinatie met fijnstofmetingen of herkenning van emissietrends, inzetbaar zijn voor de identificatie van houtrook. Als eerste stap is daarbij gekeken naar het gebruik van roetmetingen voor het selecteren van houtrookmomenten, waarop houtrook voor een aantal opeenvolgende uren meetbaar is. De identificatie als “houtrookmoment” is dan vervolgens geverifieerd op basis van metingen van levoglucosan. Deze aanpak wordt in detail toegelicht in hoofdstuk 4.

De lengte van een houtrookmoment is vaak te kort om deze verificatie te doen op basis van dagwaarden van levoglucosan, gemeten op filters. Daarom is er bij de pilot ook gebruik gemaakt van een Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM), waarmee de aanwezigheid van levoglucosan met een veel hogere frequentie (elke 10 minuten) gemeten kan worden. Het gebruik van de ACSM voor dit doel is ook relatief nieuw en wordt daarom, ook in vergelijking met de resultaten van de AE33 aethalometer, in meer detail besproken in hoofdstuk 3.

Daarnaast zijn er bij de pilot aanvullende high-end metingen van andere stoffen in de lucht, zoals koolmonoxide (CO), stikstofoxiden (NO_x) en ultrafijnstof (UFP), uitgevoerd op het centrale meetpunt. Deze stoffen kunnen mogelijk dienen als aanvullende indicatorstoffen voor houtrook. Bovendien kunnen de geobserveerde tijdtrends van al deze stoffen meer informatie geven over de gehele ‘fingerprint’ van houtrook en dragen ze bij aan de onderbouwing voor de toekenning van metingen aan houtrook of andere bronnen. De bevindingen met betrekking tot deze aanvullende stoffen wordt in meer detail besproken in hoofdstuk 6.

Het instrumentarium voor de ontwikkeling van de meetmethode in deze pilotstudie, bestaande uit het centrale meetpunt en de roet- en fijnstofsensoren, worden hieronder in meer detail beschreven.

2.2 Het centrale meetpunt in Heemskerk

Het centrale meetpunt is meer dan een half jaar operationeel geweest. De eerste maand, vanaf half november, was de trailer geplaatst op het parkeerterrein aan de Maerten van Heemskerckstraat in Heemskerk. Begin december werd de trailer echter beklad met graffiti. Met het oog op de feestdagen en het risico op verdergaande schade door vandalisme, is de trailer daarom op 18 december verplaatst naar het naastgelegen bewaakte parkeerterrein van de politie (Maerten van Heemskerckstraat 41).



Figuur 2.1: De TNO trailer op de eerste (links) en tweede (rechts) locatie. Rechts ook de vuurkorf die is gebruikt bij een test van de houtrookmetingen op 18 januari 2024.

Op het centrale meetpunt zijn continu near-real-time high-end metingen uitgevoerd van verschillende aan houtrook gerelateerde stoffen: PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10} , UFP, roet, chemische samenstelling fijnstof met de ACSM (o.a. levoglucosan), NO_x en CO. Ook zijn er iedere dag filters beladen met $PM_{2.5}$ voor latere analyse, die voor en na belading gewogen werden [18]. Om alles draaiend te houden waren gemiddeld twee mandagen per week nodig. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de gebruikte instrumenten.

Tabel 2.1: De TNO meetinstrumenten aanwezig op het centrale meetpunt. PM = fijnstof (getal erachter is de maximale diameter van het deeltje in micrometer), BC = roet, CO = koolmonoxide, UFP = ultrafijnstof, EC/OC = verhouding elementair koolstof en organisch koolstof (zie paragraaf 3.2), W_s = windsnelheid, W_D = windrichting, T = temperatuur, R_H = relatieve luchtvochtigheid, P = luchtdruk, Regen in mm/u.

Instrument	Component	Hoogte inlaat	Tijdsresolutie
Leckel/KFG sampler met quartz filters	PM filtermetingen	110 cm	24 uur
Palas FIDAS 200	PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10}	167 cm	10 seconden
Magee Scientific Aethalometer AE33	BC	140 cm	10 seconden
Teledyne T300U CO monitor	CO	113 cm	1 minuut
Teledyne T200 UP NO en NO_2 monitor	NO , NO_2	113 cm	1 minuut
TSI Environmental Particle Counter (EPC) 3783	UFP	167 cm	1 seconde
Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) Aerodyne	Levoglucosan (naast de reguliere kanalen)	116 cm	10 minuten
Filteranalyse (niet in dit rapport, volgt later)	Levoglucosan, EC/OC	NVT	24 uur
Weerstation Vaisala WXT 520	W_s , W_D , T, R_H , P, regen	Op de trailer	1 minuut

Het centrale meetpunt had meerdere functies binnen de pilot:

1. Een referentiepunt voor de bepaling van houtrookmomenten op basis van high-end roet- en fijnstofmetingen. Dit om houtrookconcentraties op deze momenten goed te kunnen kwantificeren en om de waarnemingen van fijnstof- en roetsensoren in de omgeving te kunnen koppelen aan houtrook.
2. Het verifiëren van de aanwezigheid van houtrook op basis van levoglucosan metingen. Dit is gedaan op basis van near-real-time metingen met de ACSM, waarbij voor een eventuele latere bevestiging van de ACSM resultaten ook filters zijn bemonsterd.
3. Het kalibreren van de PM_{2.5} sensoren (van SODAQ) uit het Hollandse Luchten netwerk en de te ontwikkelen zelfstandige TNO roetsensorkastjes tegen de high-end metingen bovenop de meetwagen.
4. Het bepalen van de fingerprint van houtrook en typische kenmerken van houtrookemissies (vorm, duur) om (roet)pieken door houtrook goed te kunnen onderscheiden van signalen van andere bronnen.

2.3 Citizen Science fijnstofmetingen



Figuur 2.2: Plaatsing van de SODAQ sensoren op de TNO trailer bij de politie (vanaf 18 januari 2024). Naast de SODAQ sensoren is ook het weerstation te zien, meer naar rechts de 2 inlaten voor de “snelle” meetsystemen in de trailer en (meest rechts) de inlaat voor het filterverzamelinstrument (Leckel).

In de IJmond gemeenten (Heemskerk, Beverwijk, Velsen en Wijk aan Zee), is een zeer dicht netwerk van citizen science sensoren aanwezig. Tijdens de meetperiode waren er circa 72 PM_{2.5} sensoren actief (zie Figuur 2.3). Dit maakt dit gebied bij uitstek geschikt voor de pilot. De fijnstofmetingen van het Citizen Science netwerk Hollandse luchten, uitgevoerd met sensoren van voornamelijk SODAQ Air [19], beslaan een groot deel van het netwerk in de IJmond gemeenten.

Het beheer van deze sensoren wordt gedaan door de Hollandse Luchten deelnemers zelf, die deze meestal direct bij hun woning geplaatst hebben. De meetdata wordt direct doorgestuurd naar SODAQ, het RIVM en Waag. De 5 minuten meetwaarden van deze sensoren zijn near-realtime terug te vinden op de websites van Hollandse Luchten [20] en het Samen Meten portaal van RIVM [21] waardoor de HL deelnemers ook snel de data

van hun sensoren in kunnen zien. Door het RIVM wordt voor de data op het Samen Meten portaal ook nog een extra kalibratie uitgevoerd.

Op de website van het RIVM is de data van de fijnstofsensoren tot enkele weken terug te vinden. Voor inzicht in de houtrookmomenten in de fijnstofsensor data en het maken van de filmpjes op houtrookmomenten is gebruik gemaakt van een volledige dataset over de meetperiode met 1 minuut tijdsresolutie, die aan TNO ter beschikking is gesteld door het RIVM.

Meer informatie over de resultaten van de fijnstofsensoren is te vinden in hoofdstuk 5.



Figuur 2.3: Het meetnetwerk van Hollandse Luchten in de omgeving van Heemskerk. Van de Hollandse Luchten website: [Hollandse Luchten | Kaart](#).

2.4 TNO roetsensorkastjes

Een belangrijk onderdeel van de pilot was om bij burgers van het Hollandse Luchten meetnetwerk in Heemskerk en omgeving roetsensorkastjes te plaatsen om te testen of de combinatie van een roetsensor (van TNO) en fijnstofsensor (van HL) voldoende is voor het schatten van de bijdrage van houtrook aan de $PM_{2.5}$ concentratie in een wijk.

De TNO roetsensor onderscheidt zich door zijn beperkte onderhoudsbehoefte en relatief hoge sensitiviteit voor organisch roet [17]. Door gebruik te maken van de behuizing van de TNO Cairebox [23], waarin ruimte is voor een modem, pomp en extra afscherming, konden drie prototypes van dit sensortype worden ontwikkeld (kastjes 2-4) op basis van de oude versie in de meettrailer (kastje 1). Deze werden begin januari op de meettrailer geplaatst.



Figuur 2.4 TNO roetsensorkastje ter kalibratie op de meetwagen.

De eerste resultaten waren veelbelovend: elk kastje gaf een signaal dat goed overeenkwam met die van de referentie-aethalometer (AE33). Hierdoor werd eind januari al het eerste kastje uitgeplaatst bij een deelnemer van het Hollandse Luchten meetnetwerk. In juli 2024 werd begonnen met de bouw van nog eens drie prototype kastjes (nummer 5-7), met de bedoeling dat bij aanvang van de vervolgcampagne in november 2024 in totaal 6 zelfstandige roetsensorkastjes ter beschikking zouden zijn.

Echter binnen enkele maanden na plaatsing begonnen de kastjes mankementen te vertonen, gerelateerd aan het nieuwe ontwerp. Bij de nieuwe set kastjes (nummer 5-7) werd direct een mogelijke oplossing hiervoor geïmplementeerd, maar deze bleek helaas de ondergrens voor detectie te verhogen, waardoor de data niet bruikbaar was.

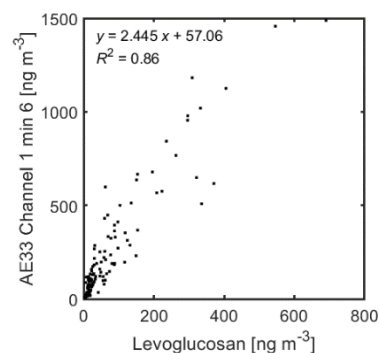
Eén werkend kastje draait d.d. al meer dan een jaar bij een Hollandse Luchten deelnemer, maar het is duidelijk dat het ontwerp robuuster moet. Momenteel wordt bij TNO gewerkt aan een verbeterd ontwerp, dat waarschijnlijk in Q1 2026 opnieuw in een campagne getest zal worden. In hoofdstuk 5 wordt de ontwikkeling van de roetsensorkastjes en de resultaten tot nu toe in meer detail besproken.

3 Houtrookdetectie met roet- en levoglucosan metingen

Droog hout bestaat voor het grootste deel uit cellulose, hemicellulose en lignine. Bij verbranding van deze stoffen komen een aantal andere koolwaterstoffen vrij. De meest voorkomende hiervan is levoglucosan. Levoglucosan is relatief stabiel in de atmosfeer⁹ en kan, met massaspectroscopie in een laboratorium [16], nauwkeurig worden gemeten op 24-uurs filtermonsters van fijnstof uit de lucht. Het is daarom een goede marker voor de aanwezigheid van houtrook in de atmosfeer.

Bij de eerdere houtrookmeetcampagne in Bergen in 2020-2021 [17] is een goede correlatie gezien tussen 24-uurs filterwaarden van levoglucosan en daggemiddelden van roet¹⁰, gemeten met een aethalometer (zie ook Figuur 3.1). Roet was dus mogelijk een goede alternatieve houtrookindicator, die eenvoudiger en met een korter tijdsinterval te bepalen is. Omdat houtrookpieken doorgaans korter duren dan 24 uur, biedt roet dus mogelijk handvatten om deze pieken in meer detail te bestuderen.

Roet in de lucht heeft echter naast houtstook ook andere bronnen. Ook verkeer is bijvoorbeeld een bron van roet. De roetbijdrage van deze andere bronnen ten opzichte van houtstook is in een daggemiddelde meting waarschijnlijk verwaarloosbaar. Het is echter niet zeker of ook voor korter durende verhogingen in roet er goed onderscheid gemaakt kan worden tussen roet van houtrook en van andere bronnen.



Figuur 3.1: Duidelijke correlatie tussen filterwaarden van levoglucosan en "houtstookroet" waarden, gemeten bij de eerdere campagne in Bergen 2020-2021 [17].

Voor de ontwikkeling van de meetaanpak in deze pilot is daarom specifiek onderzocht of een goede duiding van korte roet- en fijnstofpieken van houtrook op minuut- tot uurbasis mogelijk is. Levoglucosan kan gebruikt worden voor verificatie, maar dan zijn er dus ook veel snellere levoglucosanmetingen nodig.

Om die reden is op het centrale meetpunt getest of de Aerosol Chemical Speciation monitor (ACSM), die TNO sinds 2020 in haar bezit heeft, ingezet kan worden voor snelle metingen van levoglucosan¹¹. Het is niet gelukt deze metingen vanaf het begin van de meetcampagne op 16 november 2023 uit te voeren, maar vanaf 29 januari 2024 waren de ACSM data voor dit doel beschikbaar.

⁹ Er is wel discussie over de stabiliteit van levoglucosan, zie [8], [9], desalniettemin lijkt het in de praktijk een goede indicator.

¹⁰ Op basis van eerdere studies is daarbij voor roet uit houtrook het verschil tussen de waarde van het optische kanaal 1 en kanaal 6 gebruikt. Deze verschilwaarde wordt vaker aangeduid als "houtstookroet", hierover meer later in dit hoofdstuk.

¹¹ Tijdens de meetcampagne 2023-2024 zijn ook iedere dag filtermonsters genomen, waarop ook levoglucosan analyse gedaan zal worden. Deze vergelijking volgt later in een aanvullend rapport.

3.1 De ACSM voor metingen van levoglucosan

De ACSM van Aerodyne [18] is een instrument dat met behulp van massaspectrometrie de chemische samenstelling van fijnstofdeeltjes (aerosolen) in de atmosfeer¹² bijna-real-time kan meten. Anders dan massaspectrometers in laboratoria, is het instrument relatief compact en verplaatsbaar, wat het geschikt maakt voor veldstudies en stedelijke monitoring van luchtkwaliteit. Het apparaat is ontworpen voor continue monitoring van fijnstof en biedt inzicht in de concentraties van o.a. organische stoffen, sulfaat, nitraat, ammonium en chloride. Het instrument is niet standaard uitgerust voor metingen van levoglucosan, daarom wordt daar in dit onderzoek specifiek aandacht aan besteed.

De werking van de ACSM begint met de aanvoer van aerosolen via een vacuüminlaat. De deeltjes worden naar een verwarmd oppervlak geleid, waar ze bij ongeveer 600 °C verdampen en (deels) fragmenteren. De verdampte fragmenten worden vervolgens geïoniseerd met een elektronenbundel, waarna de geïoniseerde deeltjes worden geanalyseerd met een quadrupool-massaspectrometer, die de ionen scheidt en detecteert op basis van hun massa/ladingsverhouding (m/z)¹³. De resulterende spectra worden met behulp van kalibratie en chemische modellen omgerekend naar concentraties van specifieke chemische componenten.

3.1.1 Metingen van zuiver levoglucosan



Figuur 3.2: Het massaspectrum van levoglucosan. De hoogste signalen worden verwacht op kanaal 60, 57 en 73. Bron: <https://webbook.nist.gov>.

Ten opzichte van een massaspectrometer in een analyse-lab heeft de ACSM een lage tot middelhoge massa-resolutie. Hierdoor zullen fragmenten met bijna dezelfde massa vaker op hetzelfde kanaal gedetecteerd worden. Ook kunnen de ionisatie en detectie efficiënties voor de ACSM anders zijn dan voor een laboratorium massaspectrometer en zelfs van ACSM tot ACSM. Voor toepassing van het instrument bij veldstudies, en in het bijzonder bij deze meetcampagne, is dit echter voldoende, mits de respons van lage naar hoge concentraties min of meer lineair is en er een duidelijk verschil te zien is tussen het wel of niet aanwezig zijn van de te detecteren stof (in dit geval levoglucosan). Om hier zeker van te zijn is een goede kalibratie van het instrument voor de te detecteren stof essentieel.

De ACSM schrijft eens per 10 minuten een volledig m/z spectrum weg voor honderd kanalen. Doordat levoglucosan een groter molecuul is dat in verschillende fragmenten breekt, geeft het een signaal op meerdere van deze kanalen. De meest prominente pieken

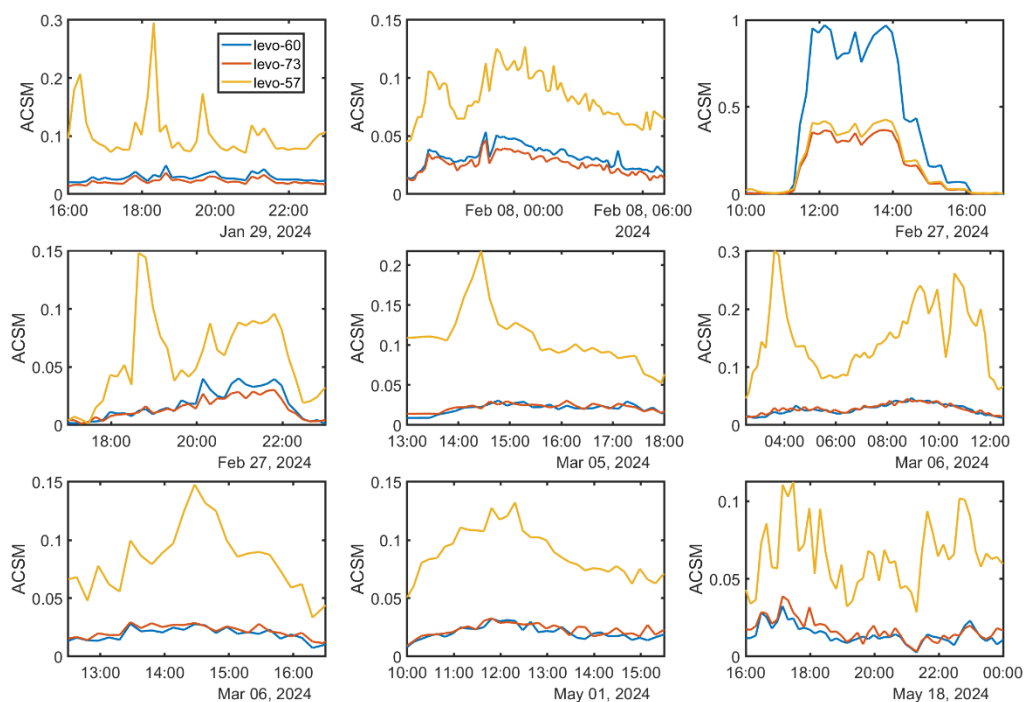
¹² Ten minste de stoffen in de fijnstofdeeltjes waarvan de moleculaire massa van fragmenten (na opbreken van de moleculen aan het filament van de ACSM) binnen de meetrange valt.

¹³ m is hierbij de massa van het ion in atomaire massa-eenheden. z is de netto lading van het ion, uitgedrukt in het aantal elementaire ladingseenheden (protonen). Voor de meeste ionen in massaspectrometrie is z gelijk aan 1, waardoor m/z over het algemeen gelijk is aan de massa van het ion in atomaire massa-eenheden.

worden verwacht op kanaal 57, 60 en 73 (Figuur 3.2). Op 27 februari 2024 zijn er levoglucosan deeltjes met 4 verschillende, gecontroleerde concentraties aan het instrument aangeboden (plaatje rechtsboven in Figuur 3.3¹⁴). Het resultaat is zoals verwacht: de respons op kanaal 60 is ongeveer 2,5x zo hoog als op kanalen 57 en 73, waarbij de respons op kanaal 57 nog iets hoger is dan op kanaal 73. De tijdens de campagne gebruikte ACSM is dus in principe geschikt voor de detectie van levoglucosan, met kanaal 60 als meest prominente marker.

Kalibratie van de gemeten concentratiewaarde van de metingen is mogelijk voor een test waarbij alleen levoglucosan wordt aangeboden, maar is niet direct toepasbaar in de context van atmosferische metingen. Bij praktijkmetingen kunnen fragmenten van verschillende stoffen op hetzelfde kanaal, en zelfs met een verschillende gevoeligheid, een signaal geven. Voor de analyse van de metingen wordt dan ook gebruik gemaakt van een eenheidsloze, maar lineaire en reproduceerbare waarde voor de kanalen van de ACSM.

3.1.2 Atmosferische metingen van levoglucosan



Figuur 3.3: Negen momenten met verhoogde levoglucosan waarden, bepaald aan de hand van de kanalen 57, 60 en 73 van de ACSM. Elke 10 minuten wordt er een spectrum genomen. De meting op 27 februari 2024 (rechtsboven) is de kalibratiemeting.

Om een indruk te krijgen hoe eenduidig de detectie van levoglucosan van houtrook is bij atmosferische metingen, zijn er uit de gehele periode waarbij de ACSM operationeel was 8 verschillende momenten geselecteerd waarop de drie levoglucosan kanalen een duidelijk signaal gaven (andere figuren in Figuur 3.3) maar er ook duidelijke verhogingen in roet te zien waren (zie voor de roetmetingen op deze momenten Bijlage B). Dit geeft

¹⁴ Er zijn 4 verschillende deeltjesaantallen per cm³ in de flow getest bij de kalibratie, wat is bijgehouden met een CPC (Condensation Particle Counter). Bij de eerste 2 waarden was het deeltjesaantal nog enigszins instabiel, wat ook terug te zien is in de meetwaarden. De kalibratie is verder correct uitgevoerd.

vertrouwen dat het hier om houtrookmomenten gaat. De filter analyse die nog volgt zal hier definitief uitsluitsel over geven.

Op al deze momenten laten de drie kanalen een verhoging zien in ongeveer dezelfde onderlinge verhoudingen, maar anders dan de verhoudingen bij de kalibratie. Kanalen 57 en 73 zijn in de praktijkmetingen verhoogd ten opzichte van kanaal 60, in vergelijking met het levoglucosan spectrum. Tenminste op deze twee kanalen lijken dus duidelijk ook veel andere stoffen mee gemeten te worden. De trend van kanaal 57 verschilt vaak sterk van die van de andere twee kanalen, die wel beter overeen komen.

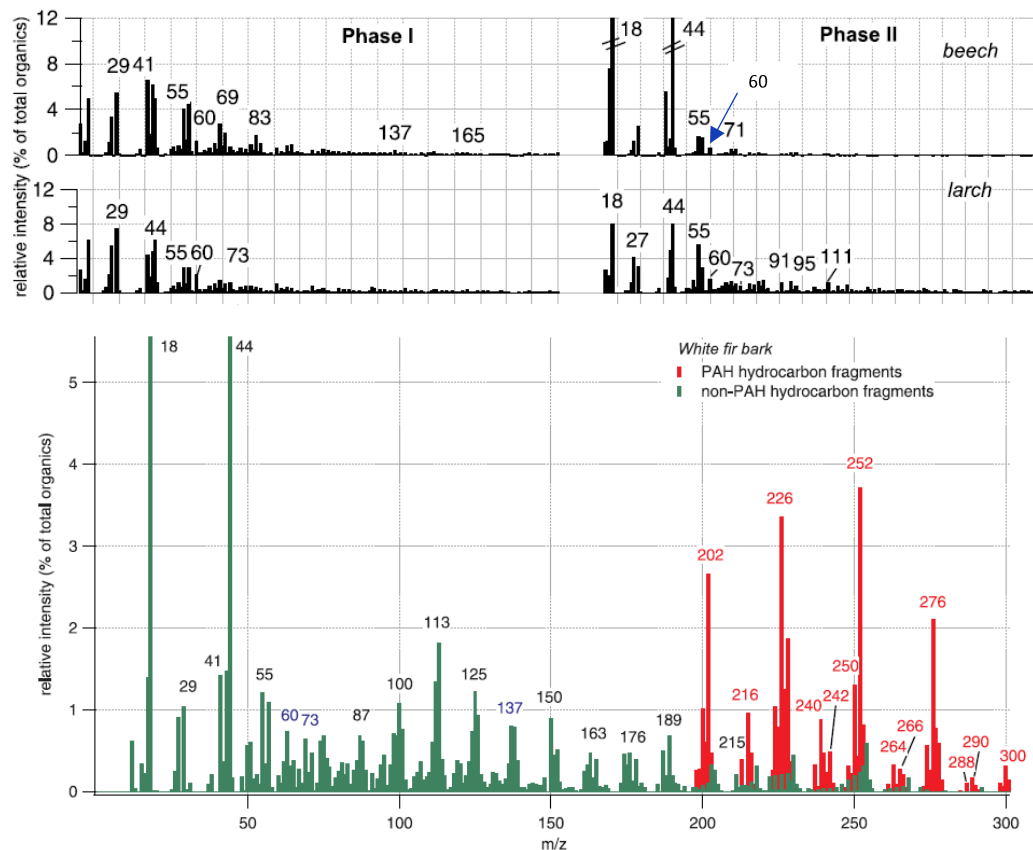
Het m/z 57-sigitaal correspondeert met een van de dominante fragmenten ($C_4H_9^+$) in de C_xH_y familie, ofwel koolwaterstoffen. Dit fragment is een bekende marker voor primaire organische aerosolen (POA) en wordt geassocieerd met diverse verbrandingsprocessen, waaronder ook verkeer en houtverbranding [24]. Dit verklaart dat dit kanaal altijd uitslaat op houtrookmomenten, maar daarnaast ook op andere momenten verhogingen laat zien. Dit kanaal is dus geen goede indicator om zonder aanvullende metingen de aanwezigheid van houtrook aan te tonen [12].

Het m/z -kanaal 60 wordt in atmosferisch onderzoek vaak gebruikt als een specifieke marker voor bepaalde soorten organische aerosolen, met name afkomstig van biomassaverbranding [5][12][24][25]. Dit kanaal detecteert $C_2H_4O_2^+$ en is daarmee relatief uniek voor houtverbrandingsproducten (anhydrosuikers) zoals levoglucosan. $C_2H_4O_2^+$ is ook een fragment van mannosan en galactosan, isomeren van levoglucosan die ook voortkomen uit de verbranding van cellulose en hemicellulose. Ook bij andere natuurlijke processen kunnen suikers of geoxideerde koolwaterstoffen gevormd worden die een uitslag geven op $m/z = 60$, maar detectie van deze stoffen heeft een zeer lage waarschijnlijkheid bij atmosferische metingen.

Het m/z -kanaal 73 wordt vaak gezien als aanvullende marker voor biomassaverbranding, als fragment van levoglucosan [5][12]. Buiten levoglucosan is het ook gevoelig voor geoxideerde organische aerosolen (SOA). Het signaal kan worden gekoppeld aan reacties van biogene vluchtige organische stoffen (VOS) afkomstig uit planten, zoals isopreen en terpenen, met atmosferische oxidanten zoals ozon, hydroxylradicalen (OH), of nitraatradicalen (NO_3). Deze bijdragen aan de respons op kanaal 73 bij atmosferische metingen zijn echter naar verhouding klein.

Figuur 3.4 toont de massaspectra van de gecontroleerde verbranding van verschillende soorten hout (en bast). De bijdragen van kanaal 60 en 73 zijn altijd in deze spectra aanwezig, maar relatief laag ten opzichte van kanaal 57, welke voor alleen houtverbranding dus een factor 1,5 tot 4 hoger is dan kanaal 60.

Hoewel dus met name kanaal 60 van de ACSM gebruikt wordt voor het herkennen van levoglucosan (en daarmee houtrook) in atmosferische metingen, met kanaal 73 als tweede marker, betekent dit niet dat deze markers in dezelfde verhoudingen in de massaspectra van houtrook aanwezig moeten zijn als bij de kalibratie. Er komen namelijk nog veel meer organische componenten vrij bij houtstook, alleen vele daarvan zijn niet houtstook specifiek en worden daarom niet als marker gezien. Figuur 3.4 bevestigt bovendien dat de verhoudingen tussen de markers van levoglucosan op houtrookmomenten ongeveer zijn zoals verwacht, dat geeft vertrouwen.



Figuur 3.4: Massaspectra bij gecontroleerde verbranding van verschillende typen hout, uit Weimer et al. 2008 [5]. **Boven:** de spectra tijdens het vlammen (Phase I) en smeulen (Phase II) van beuken- en larikshout (“beech” en “larch”, respectievelijk). **Onder:** Het massaspectrum bij verbranding van de bast van zilverspar.

3.2 Vergelijking van de ACSM en aethalometer metingen

Bij de eerdere houtrookmeetcampagne in 2020-2021 werd gevonden dat dagwaarden van de concentratie levoglucosan correleren met dagwaarden van “houtstookroet” (Figuur 3.1).

De “houtstookroet” waarde volgt niet de officiële berekening van het houtrookaandeel [26], maar is gelijk aan het verschil tussen de meetwaarden op kanaal 1 en kanaal 6 van de aethalometer. Deze waarde is eerder gebruikt door Allen et al. in 2020 [29] onder de naam “Delta-C indicator” en correleert meestal goed met levoglucosan. Het verschil tussen de twee waarden geeft bij benadering een correctie van het totaal aan roet voor de fossiele bijdrage (BC).

De officiële methode voor de bepaling van het aandeel van biomassaverbranding in de door de AE33 aethalometer gemeten hoeveelheid roet, bestaat uit het berekenen van de BB% parameter (zie voor meer uitleg het kader hieronder). Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de hoogste absorptie van roet uit biomassaverbranding wordt gezien in het blauw (kanaal 1) en bijna niet in de infrarood-range (kanaal 6). Roet uit fossiele brandstoffen laat naar verwachting echter geen groot verloop in absorptie zien over de aethalometer golflengten ($AAE \approx 1$). De Delta-C indicator en BB% zijn dus op hetzelfde principe gebaseerd.

Bepaling van het aandeel van biomassaverbranding uit AE33 aethalometer data

De AE33 aethalometer meet de absorptie van 7 verschillende golflengten (370, 470, 520, 590, 660, 880, en 950 nm) bij lichtval door een fijnstofsamplie op een wit filter. Deze golflengten corresponderen in oplopende volgorde met de datakanalen BC1 t/m BC7 van de aethalometer. In het instrument wordt een filterlint over een gecontroleerd oppervlak bemonsterd met fijnstof door de luchtstroom door het lint te voeren. Vervolgens wordt het verlies van licht (de absorptie van de 7 verschillende golflengten) door dit oppervlak continu gemeten (de “zwarting” van het filterlint wordt bepaald), waarbij het meetinterval gevarieerd kan worden van 1 seconde (tijdens de campagne in Heemskerk) tot 60 minuten. Als het lint te “zwart” wordt, wordt het doorgedraaid.

Het meetprincipe van de aethalometer is gebaseerd op de Wet van Lambert-Beer en een aantal kalibratie parameters. Op basis van het sample-oppervlak op het filter en het volume lucht dat per tijdseenheid door het filterslot stroomt wordt de massaconcentratie van BC (black carbon) deeltjes, ofwel roet, per kubieke meter lucht berekend. Bij lage filterbelading (lage absorptie) is de absorptie evenredig met de BC-massa die op het filter is afgezet, waardoor een BC-massaconcentratie kan worden bepaald. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met meervoudige verstrooiingseffecten die afhankelijk zijn van het gekozen filtertype. Deze effecten worden gecorrigeerd met een empirisch bepaalde constante (C_{ref}).

Het gebruik van 7 verschillende kanalen is bedoeld om verschillende bronnen van roet te kunnen onderscheiden, gebaseerd op het “Aethalometer model” [12]. Het model vergelijkt metingen bij specifieke korte golflengten (meestal UV of blauw) en nabij-infrarood (“IR”) om de BC (black carbon) concentraties afkomstig van houtverbranding te schatten ten opzichte van de BC concentraties afkomstig van fossiele brandstofbronnen. Houtrook-aerosolen zijn namelijk rijk aan organische verbindingen die licht sterker absorberen bij kortere golflengten (zoals UV en blauw) [26], aerosolen en roet van verkeer bevatten daarentegen veel kleinere fracties organische verbindingen. Ze hebben een zuiverdere BC-samenstelling, waardoor ze over het hele UV-IR-bereik licht absorberen met een sterkte evenredig aan λ^{-1} (de meetgolflengte). Dus hoe groter de golflengte, hoe kleiner de absorptie [27] [28].

De golflengteafhankelijkheid van de absorptie in het UV-IR-bereik wordt bij een aethalometer geclassificeerd aan de hand van de Ångström-exponent (AAE). $AAE = 1$ voor aerosolen met een $1/\lambda$ -spectrale afhankelijkheid in absorptie, dus bij zuiver BC. $AAE > 1$ wanneer lichtabsorptie sterker is bij kortere golflengten (t.o.v. $1/\lambda$ -afhankelijkheid). $AAE < 1$ wanneer lichtabsorptie sterker is bij langere golflengten (t.o.v. $1/\lambda$ -afhankelijkheid). Voor houtrook varieert de AAE ongeveer tussen de 1 en 5, terwijl deze voor fossiele brandstoffen verbranding bijna gelijk is aan 1.

De AAE waarde wordt berekend op basis van de golflengte specifieke aerosolabsorptiecoëfficiënten ($b_{abs,\lambda}$) van 470 en 880 (zie Vergelijking 3.1). Deze worden bepaald uit de gemeten BC-massaconcentraties op het filter, informatie over de golflengteafhankelijke massa-absorptiecoëfficiënt (MAC) en C_{ref} (verstrooiingseffecten). Vervolgens kunnen er bron-specifieke absorptiecoëfficiënten voor fossiele brandstoffen (ff) en houtverbranding (wb) bepaald worden per golflengte, waaruit weer het aandeel van de gemeten BC-massaconcentratie voor houtverbranding kan worden berekend als een percentage (BB%) van de IR BC-massaconcentratie. In Vergelijking 3.1 hieronder wordt het formularium gegeven hoe deze waarden in elkaar worden omgerekend.

$$AAE = - \frac{\ln\left(\frac{b_{abs}(470nm)}{b_{abs}(880nm)}\right)}{\ln\left(\frac{470}{880}\right)}$$

$$b_{abs,470nm} = Blue_BCc \cdot \frac{MAC_{470nm}}{C_{ref}}$$

$$b_{abs,880nm} = IR_BCc \cdot \frac{MAC_{880nm}}{C_{ref}}$$

$$b_{abs,ff,880nm} = \frac{b_{abs}(470nm) - b_{abs}(880nm) \cdot \left(\frac{470}{880}\right)^{-AAE_{wb}}}{\left(\frac{470}{880}\right)^{-AAE_{ff}} - \left(\frac{470}{880}\right)^{-AAE_{wb}}}$$

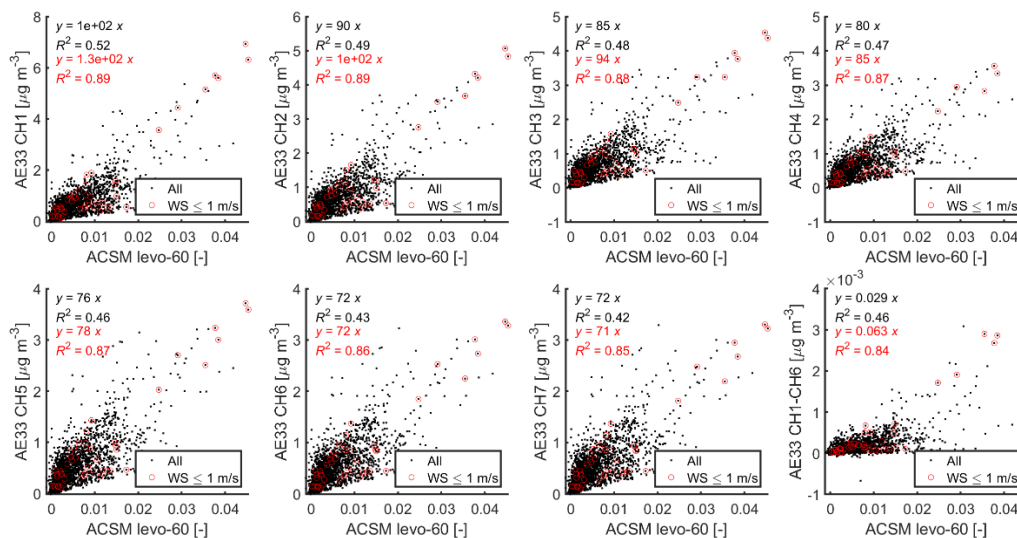
$$b_{abs,wb,880nm} = b_{abs,470nm} - b_{abs,ff}$$

$$BC_{wb} = \frac{BB\% \cdot IR_BCc}{100}$$

$$BB\% = \frac{b_{abs,wb,880nm}}{b_{abs,880nm}} \cdot 100$$

$$BC_{ff} = \frac{(1 - BB\%) \cdot IR_BCc}{100}$$

Vergelijking 3.1: Formularium waarmee de gemeten waarden bij de golflengten 470 nm en 880 nm omgerekend kunnen worden naar de geschatte bronbijdragen van houtrook (wb) en verbranding van fossiele brandstoffen (ff). Blue_BCc en IR_BCc zijn de gemeten BC-massaconcentraties bij, respectievelijk, de golflengten 470 nm en 880 nm. Bron: Mendoza 2024 [26].



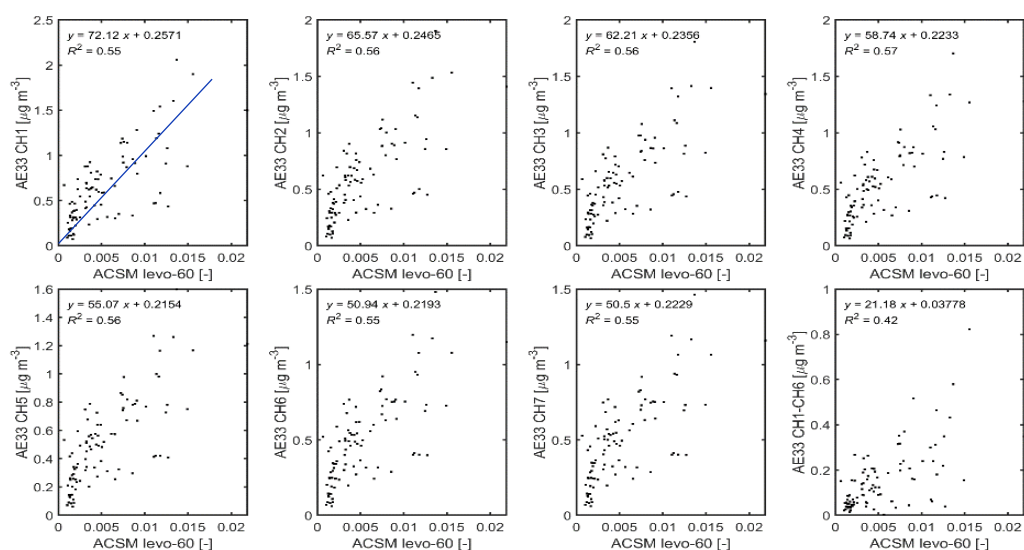
Figuur 3.5: Correlatie 1-uurswaarden van de verschillende kanalen van de aethalometer plus “houtstookroet” (kanaal 1 min kanaal 6) en de ACSM levoglucosan metingen op kanaal 60 in de huidige campagne, voor alle momenten waarbij ook de ACSM data beschikbaar was. Rood omcirkeld de waarden met lage windsnelheden ≤ 1 m/s.

Figuur 3.5 toont de correlatie tussen de aethalometer-absorptie bij zeven golflengten plus 'houtstookroet' (Delta-C) en kanaal 60 van de ACSM (ACSM-60), als maat voor levoglucosan. De correlatie (R^2) is voor alle kanalen niet heel goed en wordt steeds minder van kanaal 1 naar kanaal 7, dus van UV naar IR, in overeenstemming met de interpretatie dat de fractie organisch koolstof (houtverbranding) in die richting afneemt.

Wat opvalt is dat er in het UV (kanaal 1) vrijwel geen hoge BC metingen bij lage ACSM-60 waarden te zien zijn. Dit effect is het meest duidelijk voor “houtstookroet” (rechtsonder), waarbij er voor lage ACSM-60 waarden geen hoge roetwaarden meer gemeten worden. Bij lage ACSM-60 waarden (zeker geen houtrook) zijn dus in ieder geval ook de roetwaarden laag, zoals verwacht.

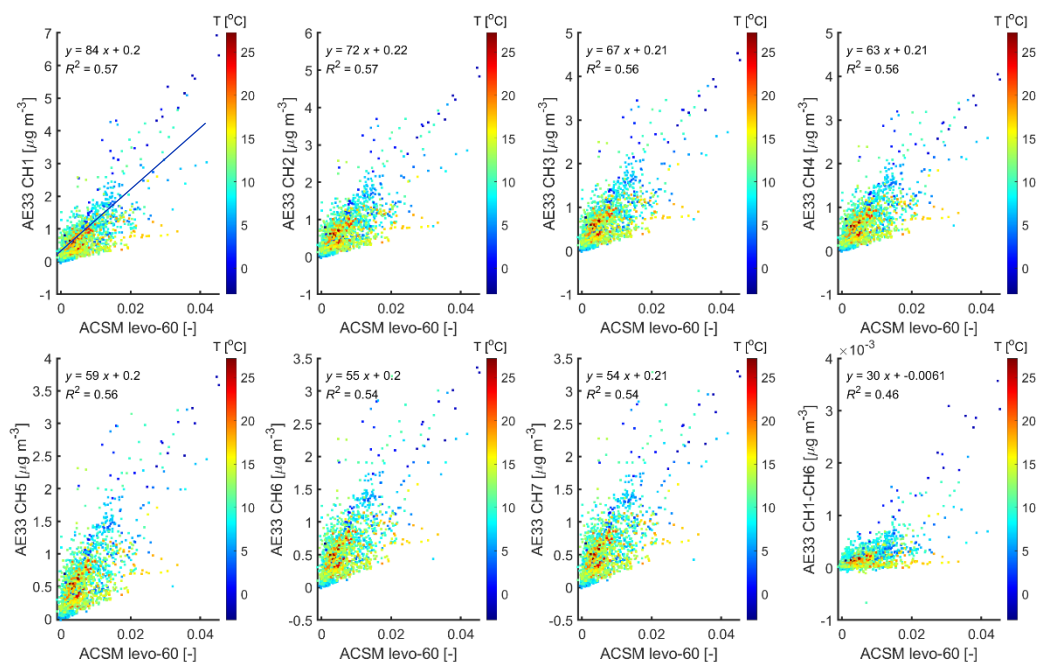
De waarden met zeer lage windsnelheden onder de 1 m/s zijn apart geanalyseerd in Figuur 3.5 en met rood omcirkeld. Bij deze lage windsnelheden is de verwachting dat met name lokaal fijnstof bijdraagt aan het signaal (zie voor de onderbouwing van deze keuze qua windsnelheden paragraaf 4.1). Voor deze waarden is de correlatie tussen de ACSM en houtstookroet goed, en de correlatie met BC1 het beste, zoals verwacht. Er blijven dan echter wel relatief weinig metingen over, dus dit criterium is waarschijnlijk te streng.

Anders dan bij de eerdere bepaling van levoglucosan op filters in de eerdere campagne, worden er nu ook bij hoge ACSM-60 waarden lage roetwaarden gemeten. Als dezelfde figuren gemaakt worden voor daggemiddelden (Figuur 3.6) zijn ook verhoogde ACSM-60 waarden te zien bij lage roetwaarden, dus het is ook niet zo dat deze extra waarden eerder gemist werden bij filtermetingen door de integratie over 24 uur. Een alternatieve verklaring is dus nodig.



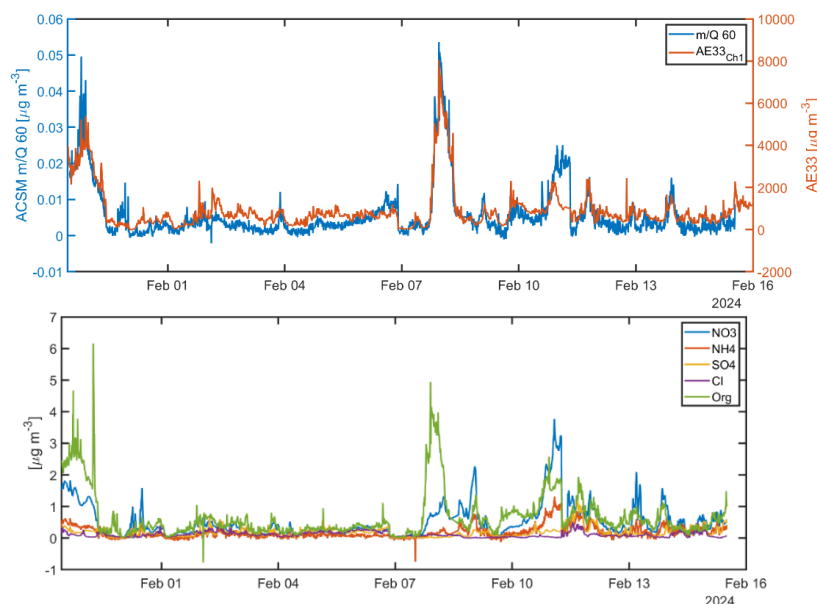
Figuur 3.6: Correlatieplots van daggemiddelde waarden van de kanalen van de AE33 en ACSM-60. Waarden onder de blauwe lijn zijn niet verwacht in vergelijking met de eerdere campagne (Figuur 3.1).

De meest voor de hand liggende verklaring voor de extra observaties van verhoogde ACSM-60 waarden bij een lagere fractie roet (waarden onder de blauwe streep in Figuur 3.6), is dat er op dit kanaal ook fragmenten van andere stoffen dan levoglucosan worden gedetecteerd, mogelijk ook afkomstig van andere bronnen dan houtstook. Dit vermoeden is in lijn met de temperatuur afhankelijkheid van deze data (Figuur 3.7). Het is bekend dat houtrook globaal overeenkomt met omgevingstemperaturen onder 10 °C [30]. Onder de blauwe lijn lijken vooral hogere temperaturen dominant aanwezig, wat suggereert dat het hier geen houtrook betreft.



Figuur 3.7: Correlatieplots van uurwaarden van AE33 kanalen en ACSM-60 gekleurd met de temperatuur van de atmosfeer (de buitentemperatuur). De blauwe lijn geeft nog steeds een indicatieve grens aan; waarden onder de blauwe lijn zijn niet verwacht.

In Figuur 3.8 is het signaal van ACSM-60 vergeleken met kanaal 1 van de aethalometer voor de eerste twee weken van februari. Op enkele korte momenten na is bij sterke verhoging van roet ($> 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) altijd een verhoging van ACSM-60 zichtbaar en volgt roet het ACSM-60 signaal goed. Met name voor de zeer hoge ACSM-60 pieken is dit het geval.



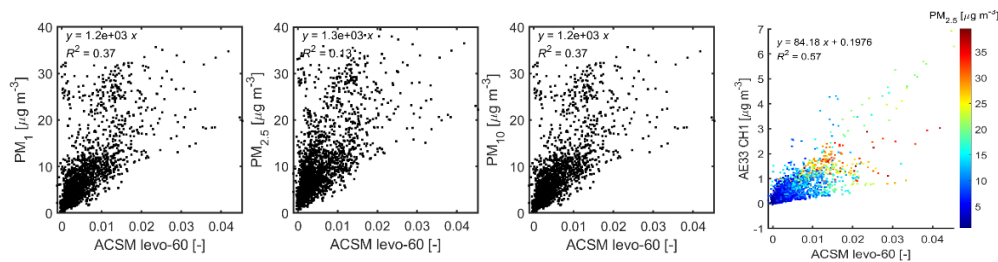
Figuur 3.8: Boven: Een eerste resultaat voor de vergelijking van kanaal 1 van de aethalometer AE33 met kanaal 60 van de ACSM voor de eerste twee weken van februari 2024. Onder: trends van de stoffen en stofgroepen die continu gemonitord worden door de ACSM: NO_3 , NH_4 , SO_4 , Cl en de organische fractie.

Wat opvalt aan de data op dit detailniveau, is dat ACSM-60 ook soms sterk verhoogd is als roet niet of maar deels verhoogd is, zoals bijvoorbeeld op 6 februari of 10-11 februari. Dit zijn momenten met roetwaarden $< 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Op deze momenten wordt er dus ofwel minder roet gevormd door houtstook en/of slaat ACSM-60 toch ook op andere stoffen aan.

Een ACSM fingerprint analyse van verschillende door de ACSM gemeten stoffen (onderste grafiek in Figuur 3.8) laat zien dat deze pieken waarschijnlijk niet of niet alleen gerelateerd zijn aan houtverbranding. Er wordt op deze momenten ook een sterke verhoging van met name nitraat (NO_3), ammonium (NH_4) en sulfaat (SO_4) gezien. Het zoeken naar de precieze verklaring voor het voorkomen van andere stoffen bij deze piekmomenten valt buiten de scope van dit onderzoek, maar het gehele beeld lijkt te correleren met “overwaaiend” fijnstof van buiten de gemeenten (zie ook hoofdstuk 5).

Op de momenten van de hoge ACSM-60 pieken, die dus waarschijnlijk wel aan houtrook toe te kennen zijn, wordt meestal ook een kleine verhoging van nitraat (NO_3) en een kleinere verhoging van ammonium (NH_4) gezien.

Bij correlatieplots tussen $\text{PM}_{2.5}$ en ACSM-60 (Figuur 3.9) ontbreken juist de lagere fijnstofwaarden bij hogere ACSM waarden, wat aangeeft dat ACSM-60 (i.i.g. houtrook) altijd ook een duidelijke verhoging van fijnstof geeft.



Figuur 3.9: Fijnstof gemeten met de FIDAS tegen de ACSM waarden. Van links naar rechts PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_{10} waarden en de eerste grafiek uit.

3.3 Conclusies hoofdstuk 3

Levoglucosan is een betrouwbare marker voor houtrook en correleert goed met roetmetingen, wat helpt om houtrookpieken nauwkeuriger te detecteren. In dit hoofdstuk is onderzocht of de ACSM geschikt is voor snelle levoglucosanmetingen om kortdurende houtrookpieken te kunnen onderscheiden van andere bronnen.

De ACSM is een compact veldinstrument dat via massaspectrometrie “near-real-time” de chemische samenstelling van fijnstof meet met een tijdsresolutie van 10 minuten. Kalibratietests tonen aan dat $m/z = 60$ (ACSM-60) het meest geschikt is voor houtrookdetectie. De meetwaarden op verschillende kanalen geven vertrouwen dat de ACSM, mits goed gekalibreerd, effectief ingezet kan worden voor houtrookdetectie met hoge tijdsresolutie.

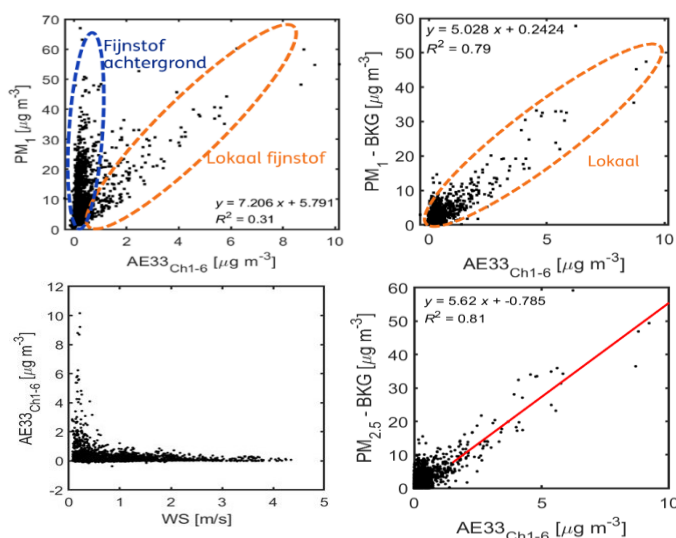
De AE33 aethalometer meet roetconcentraties via lichtabsorptie op zeven golflengten. Hiermee kan onderscheid worden gemaakt tussen roet van fossiele brandstoffen en houtverbranding. Hoge roetwaarden komen altijd goed overeen met ACSM-60. Bij lagere roetwaarden volgt ACSM-60 soms minder goed en is relatief hoger, wat wijst op detectie van meer dan alleen houtrook op dit kanaal. Op die momenten worden vaak ook veel andere stoffen in het fijnstof gedetecteerd met de ACSM.

Als deze momenten kunnen worden uitgefilterd, bijvoorbeeld met een criterium $\text{AE33 BC1} > 2 \mu\text{g/m}^3$, is roet dus een goede indicator voor houtrook, ook op een veel kortere tijdsschaal (10 minuten) dan een dag.

4 Selectie houtrookmomenten in fijnstof op basis van roet en levoglucosan

Om de verspreiding van houtrook in stedelijke gebieden beter te kunnen duiden, is het nodig om momenten te identificeren waarop houtrook een significante bijdrage levert aan de fijnstofconcentratie in een wijk. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe op basis van roet- en fijnstofmetingen, geverifieerd met levoglucosan (ACSM-60), houtrookmomenten zijn geselecteerd uit de meetdata van de pilot in Heemskerk. Daarbij worden drempelwaarden vastgesteld, fijnstofbijdragen berekend en kengetallen afgeleid die gemeenten kunnen helpen bij het onderbouwen van beleid en handhaving rondom houtstook.

4.1 Bepaling drempelwaarden voor de selectie van houtrookmomenten



Figuur 4.1: Onderscheid fijnstof uit lokale bronnen en uit de achtergrond, grafieken uit de campagne in 2020-2021. **Linksboven:** Uurgemiddelde PM_{10} vs. roet. **Rechtsboven:** PM_{10} vs. roet na aftrek van uurgemiddelde PM_{10} waarden LML achtergrondstation in de Rijk. **Linksonder:** Gemeten houtstookroet waarden afhankelijk van windsnelheid. **Rechtsonder:** $PM_{2.5}$ data na achtergrondafrek, gefilterd op windsnelheden onder 1 m/s.

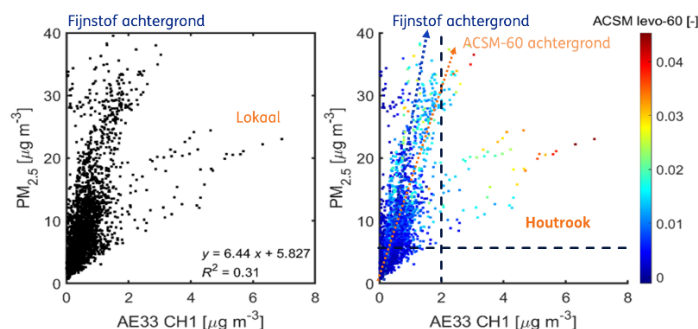
Onderscheiden van lokaal fijnstof en achtergrondfijnstof op basis van roet

Figuur 4.1 toont een aantal figuren uit de resultaten van de houtrookmeetcampagne in seizoen 2020-2021. Bij deze campagne was de meettrailer van TNO geplaatst in Bergen Noord-Holland [17]. De grafiek linksboven toont de fijnstofconcentratie (PM_{10} in dit geval) geplotted tegen de concentratie “houtstookroet” (Delta-C). In deze grafiek zijn twee globale trends in het fijnstof te herkennen, omcirkeld met blauw en oranje, typisch voor metingen in de bebouwde omgeving. In het blauw omcirkelde deel blijft de roetconcentratie onder

de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in het oranje omcirkelde deel loopt de roetconcentratie sterk op met de fijnstofconcentratie. Als nu van alle fijnstof uurwaarden de tegelijkertijd gemeten waarden van het achtergrond LML station in de Rijp worden afgetrokken (rechtsboven in Figuur 4.1), dan blijft alleen het fijnstof over dat correspondeert met hoge roetwaarden. Hoge roetmetingen (en de oranje omcirkelde trend) corresponderen dus met lokaal verhoogde fijnstofwaarden.

Een extra bewijs dat hogere roetwaarden corresponderen met lokaal fijnstof blijkt uit de grafiek links onder in Figuur 4.1 waarin de houtstookroet-concentraties als functie van de windsnelheid zijn weergegeven. Roetconcentraties boven de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ worden alleen gevonden bij de laagste windsnelheden en zijn dus zeer lokaal. Bij 1 m/s wind komt het fijnstof namelijk niet verder dan 3.6 km in een uur, ofwel max. 30 km afstand in een hele nacht. Na correctie van de $\text{PM}_{2.5}$ concentraties worden voor de achtergrondwaarden en het toepassen van een filter op de laagste windsnelheden, dan wordt er een goede, directe correlatie gevonden tussen roet en fijnstof.

4.1.1 Identificatie van houtrook in lokaal fijnstof en achtergrondfijnstof



Figuur 4.2: $\text{PM}_{2.5}$ fijnstof en roetwaarden per uur in de huidige meetcampagne in de periode januari-mei (wanneer de ACSM operationeel was). **Links:** $\text{PM}_{2.5}$ geplot tegen roet (ingezoomd op x- en y-as). **Rechts:** $\text{PM}_{2.5}$ tegen roetwaarden, op kleur gelabeld met de ACSM-60 meetwaarden. De gestreepte lijnen geven de drempelwaarden aan die voor de eerste grove selectie van houtrookmomenten zijn gebruikt.

In de linker grafiek in Figuur 4.2 zijn de $\text{PM}_{2.5}$ uurwaarden¹⁵ tegen de roetwaarden geplot voor de huidige meetcampagne in de IJmond. In deze grafiek zijn opnieuw twee trends te zien die corresponderen met lokaal fijnstof en fijnstof uit de achtergrond¹⁶. Als een kleurmarkering wordt toegevoegd op basis van ACSM-60 waarden (rechts in Figuur 4.2) dan valt op dat er bij lokale fijnstofmetingen met veel roet altijd levoglucosan wordt gevonden en dat er ook in de achtergrond een deel te onderscheiden valt met een licht verhoogde hoeveelheid roet en verhoogde waarden van ACSM-60.

Alle bovenstaande bevindingen bij elkaar beschouwd, zijn in de grafiek drempelwaarden aangegeven op basis waarvan “zekere” houtrookmomenten geselecteerd konden worden. Hierbij is eerst gekeken naar de roetwaarden waarvoor de ACSM-60 waarden hoger waren dan 0.015 ¹⁷. Ongeveer vanaf $\text{ACSM-60} = 0.015$ is er een duidelijk onderscheid te maken tussen fijnstof met en zonder een verhoogde roetfractie en tussen

¹⁵ PM_{10} is ook gemeten, maar dit geeft geen andere inzichten dan $\text{PM}_{2.5}$. In houtrook heeft de grootste fractie van de deeltjes een diameter kleiner dan 2.5 micron . Zie ook Bijlage A.

¹⁶ Ook voor deze data is een LML achtergrondcorrectie uitgevoerd. Dit geeft globaal hetzelfde beeld als in Figuur 4.1, maar voor hele lage roetwaarden blijven er nog enkele verhoogde fijnstofwaarden over. Dit kan verschillende redenen hebben, waarvan geen relevant voor deze discussie.

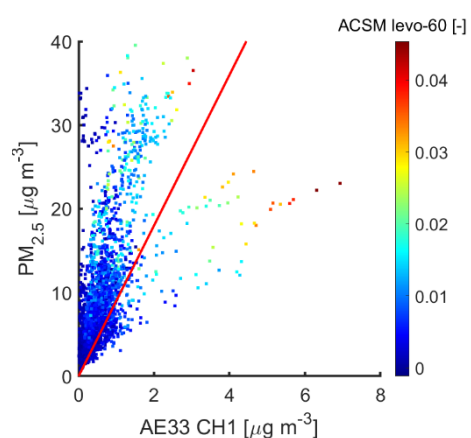
¹⁷ Deze waarde is evenredig met een bepaalde massa levoglucosan aerosol, maar een bepaling van het absolute gewicht is complex omdat meer stoffen op ACSM-60 een bijdrage kunnen leveren (zie voorgaand hoofdstuk).

lokaal fijnstof en fijnstof uit de achtergrond. Voor de AE33 BC1 correspondeert dit grotendeels met waarden boven de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In deze range worden ook geen fijnstofwaarden onder de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gevonden, dit wordt daarom als ondergrens voor fijnstof aangehouden bij de selectie van de houtrookmomenten.

Met deze drempelwaarden zal waarschijnlijk nog een deel van de houtrookmomenten gemist worden, met name in de range $1 < \text{AE33} < 2 \mu\text{g m}^{-3}$. Deels komt dit doordat het begin en eind van een houtrookmoment met deze selectie van uurwaarden gemist wordt. Hoe hiervoor gecorrigeerd is volgt in 4.1.3. Maar daarnaast zal waarschijnlijk nog een aantal kleinere mogelijke houtrookpieken gemist worden, wat is opgenomen als een bron van onzekerheid in de uiteindelijk gevonden kengetallen (zie sectie 4.2).

Een alternatieve selectiemethode

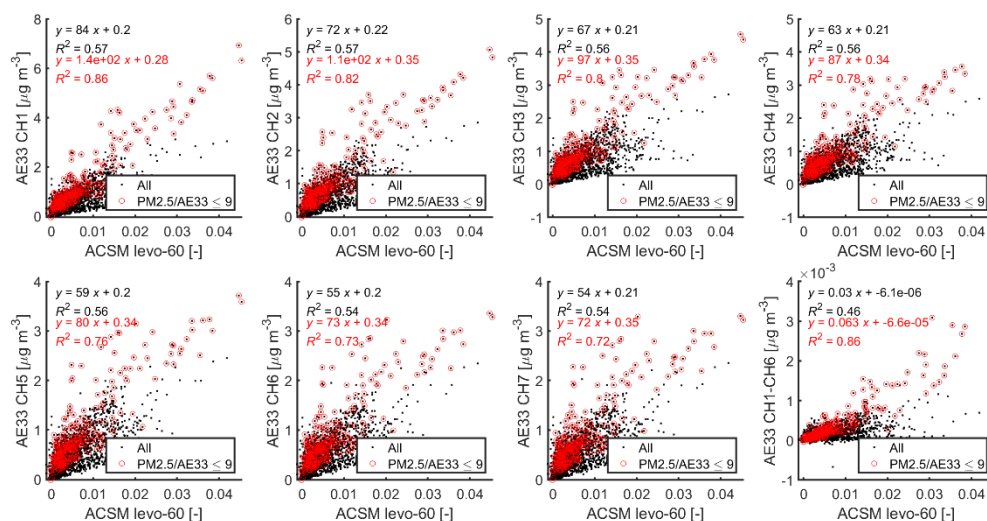
In de rest van dit rapport wordt van bovenstaande, op drempelwaarden gebaseerde, selectiemethode uitgegaan voor de bepaling van houtrookmomenten. Echter, op deze manier is het al duidelijk dat er nog steeds meetpunten meegenomen worden die ook verhoogde ACSM-60 laten zien, zonder evenredige verhoging van roet. Het effect hiervan op de betrouwbaarheid van de getallen is echter waarschijnlijk beperkt, aangezien nu bekend is dat deze verhogingen waarschijnlijk niet of slechts deels, aan houtrook toe te kennen zijn (zie ook paragraaf 193.2). Ook is duidelijk dat met die selectiemethode mogelijk een aantal houtrookmomenten met roetwaarden onder de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemist wordt.



Figuur 4.3: Rode grenslijn lokaal fijnstof/houtrook en achtergrond op $\text{PM}_{2.5}/\text{BC1} = 9$.

Er is daarom ook een inschatting gemaakt wat het zou betekenen als de selectie gedaan zou worden op basis van de verhouding $\text{PM}_{2.5}/\text{BC1}$. In Figuur 4.3 is een grenslijn getrokken waar $\text{PM}_{2.5}/\text{BC1} = 9$. Waarden met $\text{PM}_{2.5}/\text{BC1} > 9$ beschouwen we vervolgens als achtergrond (geen houtrook) en waarden met $\text{PM}_{2.5}/\text{BC1} \leq 9$ als houtrookmomenten. Als dit criterium wordt toegepast op de roet vs. ACSM-60 data uit het vorige hoofdstuk, dan verbetert dit ook de correlatie van “houtstookroet” (Delta-C) met ACSM-60 (levoglucosan) aanzienlijk (Figuur 4.4), terwijl deze eerst matig was. Deze is nu vergelijkbaar met de eerdere resultaten op filtermetingen, zonder dat veel data wordt afgewezen (zoals bij selectie op windsnelheid).

Dit geeft vertrouwen in de duiding van Figuur 4.2. Omdat in eerste instantie werd gedacht dat de ACSM-60 waarden bij lage roet toegeschreven kunnen worden aan houtstook uit de achtergrond, is nog niet geprobeerd of dit criterium significant andere resultaten oplevert dan de drempelwaardenmethode. Tenslotte zijn beide op de selectie van ongeveer dezelfde data in Figuur 4.2 gebaseerd. Dit alternatieve criterium zal in het vervolgonderzoek, met daarbij ook de data van de 2024-2025 campagne getest worden.



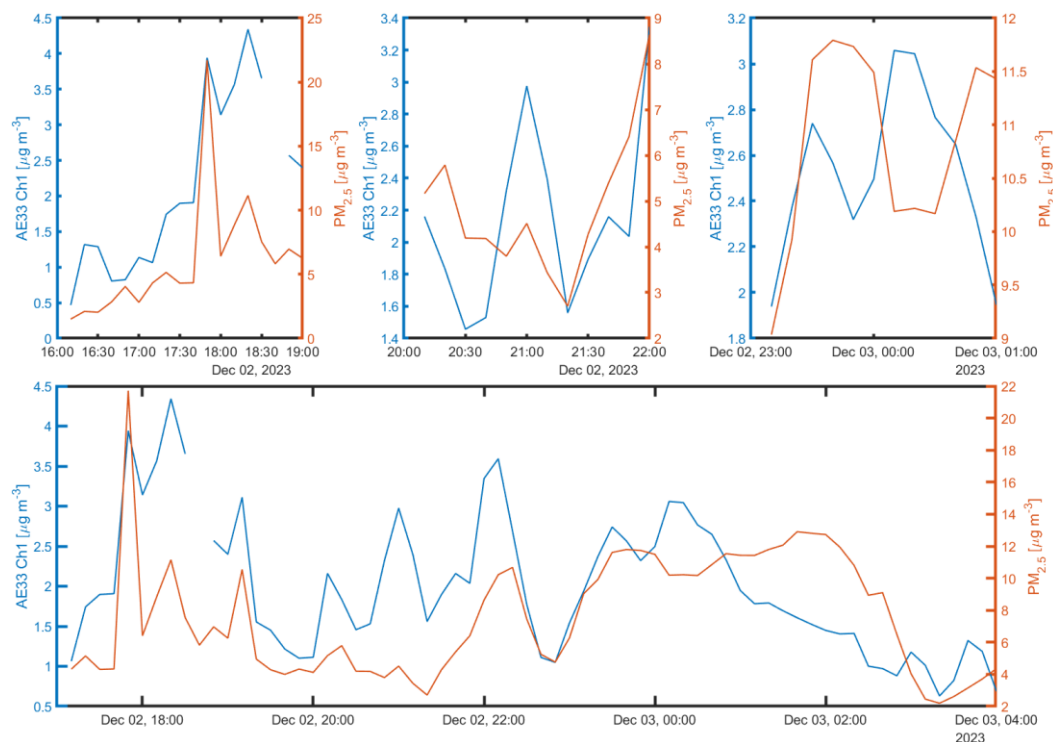
Figuur 4.4: Correlatie 1-uurswaarden van de verschillende kanalen van de aethalometer plus "houtstookroet" en de ACSM-60 metingen. In rood de waarden die overeenkomen met het criterium $\text{PM}_{2.5}/\text{BC1} \leq 9$.

4.1.2 Van thresholdwaarde naar volledige selectie van het houtrookmoment

Voor de uiteindelijke selectie van houtrookmomenten zijn dus de volgende drempelwaarden gebruikt: $\text{AE33 BC1} > 2 \mu\text{g m}^{-3}$ en $\text{PM}_{2.5}$ (FIDAS) $> 5 \mu\text{g m}^{-3}$, beide gebaseerd op de waarden op uurbasis. Met name de drempelwaarde van roet ($2 \mu\text{g m}^{-3}$) blijkt hierbij ruim. Vaak wordt voor en na het geselecteerde tijdsdeel ook nog een duidelijke verhoging in roet gezien, de "schouders" van de piek. Om het volledige houtrookmoment te selecteren is er daarom voor de roetmetingen (BC1) op de uren vlak voor en na de, op basis van $\text{BC1} > 2 \mu\text{g m}^{-3}$ geselecteerde, tijdsdelen een mindere strenge drempel van $\text{BC1} > 1 \mu\text{g m}^{-3}$ toegepast. Hierdoor kwam in de meeste gevallen het gehele houtrookmoment van begin tot eind beter in beeld.

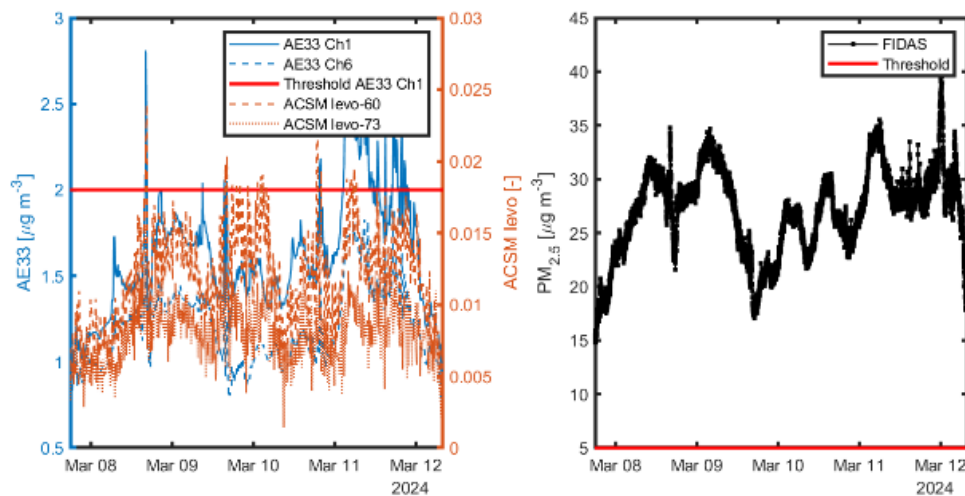
Het aantal geselecteerde houtrookmomenten veranderde door deze aanpassing, omdat enkele opeenvolgende momenten aan elkaar gesmeed werden door deze verbreding (zie voorbeeld in Figuur 4.5). Het aantal getelde houtrookmomenten daalde hierdoor van 54 naar 41¹⁸.

¹⁸inclusief Oud & Nieuw en de vuurkorftest.



Figuur 4.5: Boven: Drie geselecteerde momenten die op basis van de drempelwaarden afzonderlijk werden geselecteerd. Onder: uiteindelijk gevonden aan elkaar verbonden houtrookmoment door het meenemen van de “schouder”.

Door de herlabeling van aanliggende uren ging het aantal houtstookuren sterk omhoog van 240 naar 599, evenals de gemiddelde lengte van een houtrookmoment van 4,5 uur naar 15 uur. Deze verlenging wordt deels veroorzaakt door één zeer lang houtrookmoment in maart (event nummer 34 van 7 maart 19:00 uur tot en met 12 maart 7:00 uur, in totaal 108 uur). Figuur 4.6 toont de tijdseries van AE33 BC1, ACSM-60, ACSM-73 en FIDAS voor dit houtrookmoment. Hieruit komt naar voren dat AE33 BC1, inderdaad tijdens het event soms inzakt tot rond de $1,5 \mu\text{g m}^{-3}$, echter helemaal inzakken gebeurt alleen op het begin en einde van het event. Daardoor wordt dit als één lang event geclassificeerd. Ook de ACSM-60 waarde duidt op een constante aanwezigheid van levoglucosan. Dit houtrookmoment valt in een wat langere koude periode in maart waarin de minimum temperatuur zakte tot 2°C en is dus waarschijnlijk terecht.

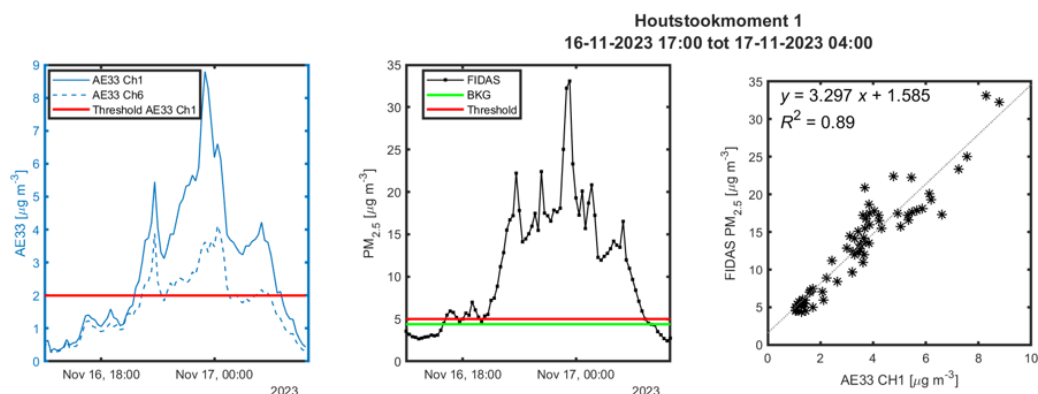


Figuur 4.6: Tijdserie van AE33 (blauw) en ACSM (oranje), links en $PM_{2.5}$ FIDAS (zwart), rechts. Voor houtrookevent 34, van 7 maart 19:00 uur tot en met 12 maart 7:00 uur.

4.1.3 Achtergrondbijdrage op houtrookmomenten

De trend van de ACSM-60 waarde komt vaak goed overeen met de trend in de waarden van kanaal 1 van de aethalometer (AE33 BC1). De bemonsteringsmethode was voor beide instrumenten hetzelfde: er is een $PM_{2.5}$ inlaat gebruikt (alleen deeltjes met een diameter tot aan 2,5 micrometer worden doorgelaten) en de luchtstroom is gedroogd voor de meting. Toch zijn er ook verschillen te zien. Deze verschillen zijn deels te wijten aan ruis en mogelijk ook aan de verschillende inlaten voor de ACSM en de aethalometer. Een deel van de AE33 BC1 waarden zal overeen komen met andere bronnen. Daarnaast kan het voorkomen dat houtrook weliswaar een duidelijke bijdrage levert aan de gemeten fijnstofconcentraties, op basis van gemeten levoglucosan waarden, maar dat de bijdrage van andere bronnen aan fijnstof op die momenten veel groter is. Het is daarom belangrijk om voor de bepaling van het aan houtrook toe te kennen deel van het fijnstof eerst een goede achtergrondcorrectie toe te passen.

Bij de toekenning van fijnstof aan houtrook op de houtrookmomenten moet, zowel voor roet als voor fijnstof, een achtergrondcorrectie toegepast worden. Hiervoor is eerst gekeken naar de correlatie tussen AE33 BC1 en de $PM_{2.5}$ concentratie tijdens de houtrookmomenten. Deze twee grootheden zijn tegen elkaar uitgezet en met lineaire regressie is de bijbehorende correlatie coëfficiënt bepaald (R^2). Wanneer de R^2 -waarde van AE33 BC1 en $PM_{2.5}$ groter was dan 0,6 is aangenomen dat alle $PM_{2.5}$ waarden die boven een vlakke achtergrondconcentratie liggen, toe te kennen zijn aan houtrook. Voor deze vlakke achtergrondconcentratie van $PM_{2.5}$ is de 1-percentiel waarde van het gehele houtrookmoment genomen, zie het voorbeeld in Figuur 4.7 voor houtrookmoment 1. In totaal bleek voor 29 van de 41 gevonden houtrookmomenten deze aanpak mogelijk.

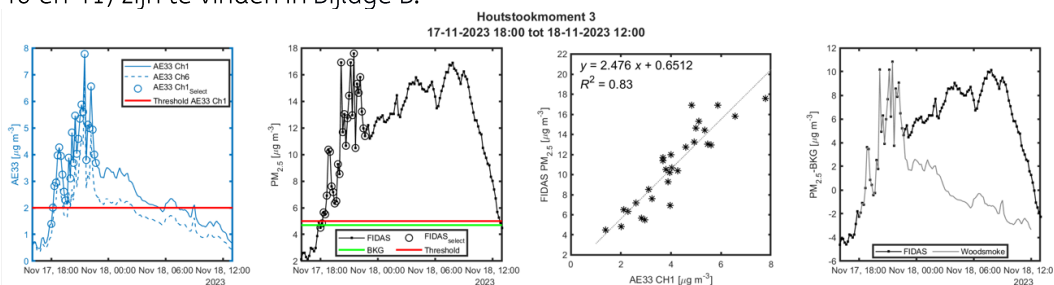


Figuur 4.7: Analyse van houtrookmoment 1. **Links:** de AE33 BC1 en BC6 waarden. **Midden:** PM_{2.5} waarden, met in rood de drempelwaarden gebruikt voor selectie en in groen de achtergrondconcentratie (1-percentiel waarde). **Rechts:** Lineaire regressieplot PM_{2.5} tegen AE33 BC1 met bijbehorende lineaire fit en correlatie coëfficiënt. Alle waarden zijn 10 minuten gemiddelden.

Voor de 12 andere houtrookmomenten moest de bijdrage van houtrook aan PM_{2.5} anders geschat worden. Tijdens deze houtrookmomenten leverde, in ieder geval voor een deel van de tijd, duidelijk ook een andere bron dan houtstook een bijdrage aan het PM_{2.5} signaal en moest de houtrookbijdrage op een andere manier afgeschat worden.

Voor deze momenten is er binnen het houtrookmoment een tijdselectie gemaakt waarvoor de AE33 BC1 en PM_{2.5} waarden op het oog goed overeenkwamen en vervolgens is, ter controle, de lineaire regressie alleen toegepast op dit deel. Vervolgens is het AE33 BC1 signaal tijdens het hele houtrookmoment geschaald met de verhouding tussen AE33 BC1 en PM_{2.5} uit de regressieanalyse en afgetrokken van het PM_{2.5} signaal na achtergrondcorrectie. Het overgebleven PM_{2.5} deel is toegekend aan andere bronnen en het geschaalde PM_{2.5} deel aan houtrook.

Ter illustratie is deze aanpak voor een specifiek houtrookmoment grafisch weergegeven in Figuur 4.8. Voor de vlakke achtergrondcorrectie van de PM_{2.5} concentratie is de 1-percentielwaarde genomen en het geselecteerde gedeelte laat een goede correlatie zien ($R^2 = 0.83$). In het rechter figuur is in grijs te zien welk deel van PM_{2.5} toegeschreven wordt aan houtrook. Omdat het piekenpatroon nooit precies overeen komt in het geselecteerde gebied, is voor metingen waarbij de resulterende PM_{2.5} concentratie van houtrook boven die van de gemeten waarden ligt, de gemeten PM_{2.5} waarde gekozen. De figuren voor alle houtrookmomenten waarvoor deze aanpak nodig was (3, 6, 8, 10, 13, 20, 28, 30, 32, 33, 40 en 41) zijn te vinden in Bijlage B.



Figuur 4.8: Analyse van houtrookmoment 3. **Van links naar rechts:** tijdserie van AE33 BC1; PM_{2.5} met in rood de drempelwaarden voor selectie en in groen de achtergrondconcentratie (1-percentiel waarde); lineaire regressie van PM_{2.5} tegen AE33; en tijdserie van totaal gemeten PM_{2.5} waarden (zwart) en PM_{2.5} waarden toegeschreven aan houtrook (grijs).

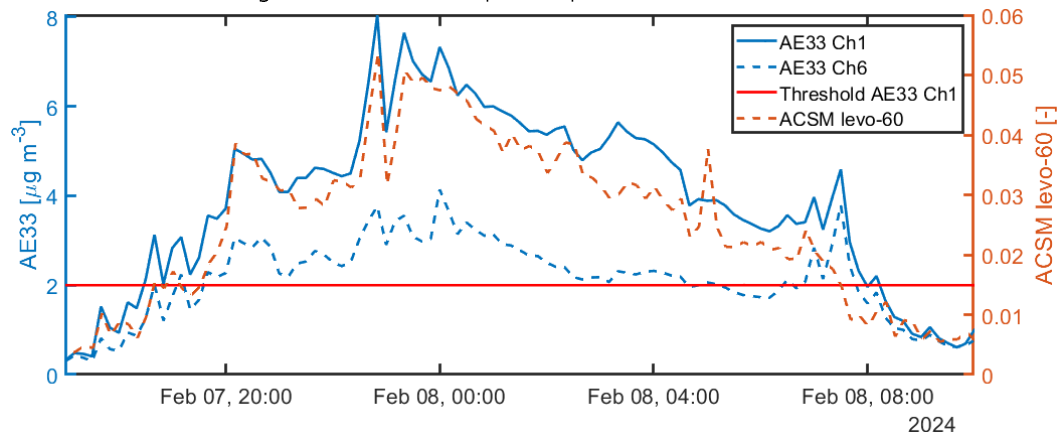
4.2 Onzekerheden bij bepaling houtrookmomenten

4.2.1 Algemene checks

Voor het bepalen van de houtrookmomenten hebben we gebruikt gemaakt van de AE33 aethalometer en de FIDAS. De ACSM is alleen gebruikt ter verificatie van de houtrookmomenten, mede doordat de data hiervan pas per 29 januari 2024 beschikbaar waren. Bij de bepaling van houtrookmomenten zijn er verschillende bronnen van onzekerheid. Deze worden hieronder in meer detail behandeld en het effect op de gevonden waarden ingeschat.

4.2.1.1 False positives

Allereerst is er gekeken naar de zogenaamde “false positives”. Dit zijn momenten die geselecteerd zijn als houtrookmomenten, maar dat eigenlijk niet zijn. Om deze momenten te identificeren is, op basis van Figuur 4.2, een minimumwaarde voor ACSM-60 van 0.015 gekozen als criterium voor toekenning van een houtrookmoment. Voor *alle* houtrookmomenten waarbij de ACSM betrouwbare data gaf, werd deze grenswaarde minimaal voor één uur overschreden. Voor deze momenten is er dus geen verdenking van “false positive”. De ACSM-60 waarden blijken over het algemeen zelfs een zeer vergelijkbaar verloop te laten zien als de AE33 BC1 waarden (zie bijvoorbeeld Figuur 4.9). Doordat de ACSM data pas per 29 januari beschikbaar was kon de data voor de periode daarvoor helaas niet gecheckt worden op false positives.



Figuur 4.9: Tijdserie van AE33 BC1 en BC6 (blauw, linker y-as) en ACSM-60 (oranje, rechter y-as) op 10-minuten basis voor houtrookmoment nummer 27 (7 en 8 februari 2024).

4.2.1.2 False negatives

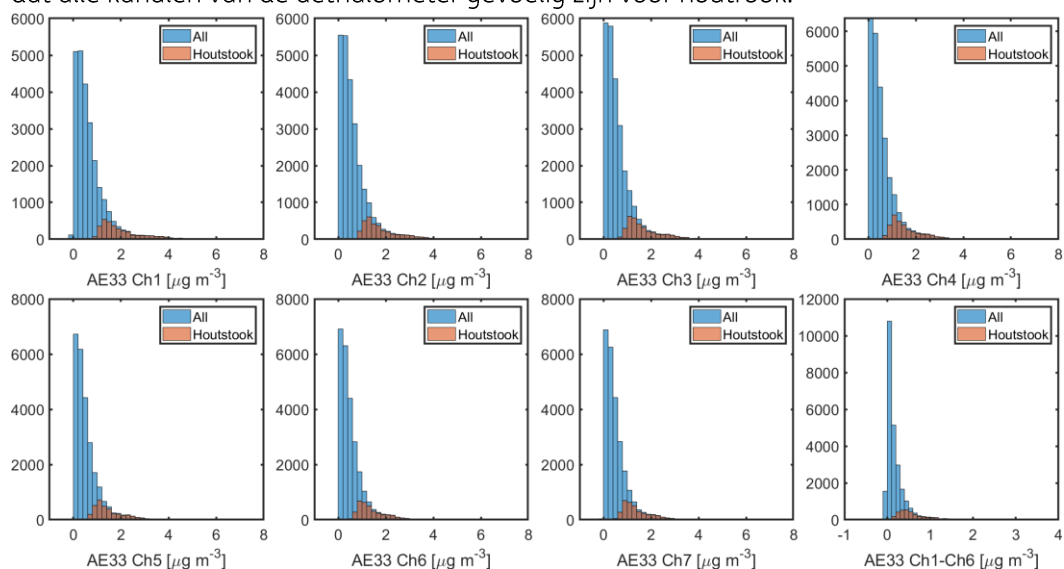
Er is ook gekeken naar “false negatives”; momenten die niet aangemerkt zijn als houtrookmoment, maar dat mogelijk wel waren. Hiervoor is gezocht naar ACSM-60 waarden >0.015 in de data buiten de geselecteerde houtrookmomenten (zie Bijlage A). In totaal kwam dit voor 69 uren voor, echter voor 13 uren was er op dat moment geen data van de FIDAS beschikbaar (in verband met een storing). Dat betekent dat er 56 uren overblijven als false negatives. Relatief veel van deze uren (in totaal 39, oftewel 70%) vallen in mei 2024. Deze houtrook komt mogelijk door barbecues, omdat bij de hogere buitentemperaturen in mei een intensief gebruik van kachels onwaarschijnlijk is.

Aangezien dit onderzoek zich meer richt op de winterstook is het dus niet nodig om hier een correctie voor mee te nemen.

4.2.1.3 Representativiteit van de geselecteerde fracties

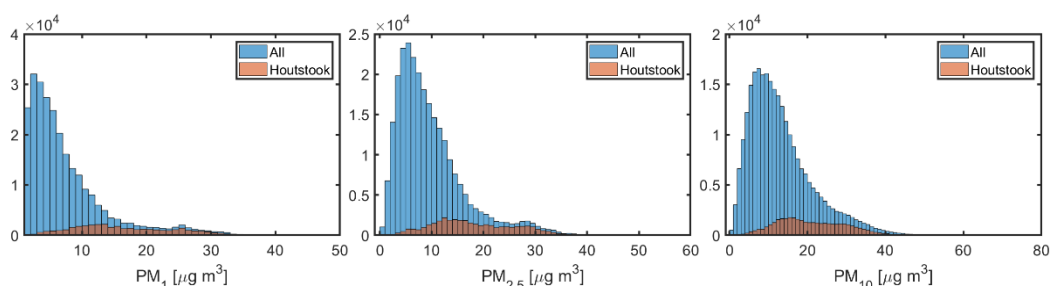
Om meer grip te krijgen op de consequente selectie van de AE33 en $PM_{2.5}$ waarden op houtrookuren t.o.v. tijden buiten de houtrookuren, zijn histogrammen gemaakt. Voor de aethalometer zijn deze te zien in Figuur 4.10. Het is duidelijk dat vrijwel alle en uitsluitend verhoogde roetwaarden worden gevonden door de selectiemethode. Het toevoegen van de “schouders” lijkt ook met name effect te hebben op de hogere AE33 BC1 waarden boven de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Hoewel de selectie alleen is toegepast op AE33 BC1, laten alle zeven kanalen een verhoging zien tijdens houtrookmomenten. In paragraaf 3.2 kwam al eerder naar voren dat alle kanalen van de aethalometer gevoelig zijn voor houtrook.



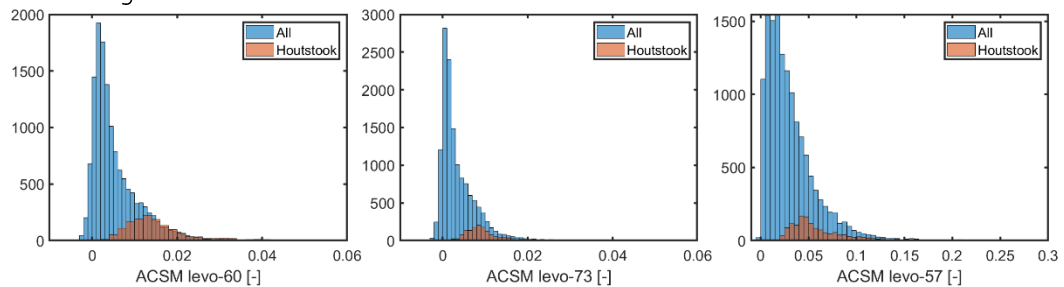
Figuur 4.10: Histogrammen op uurbasis van AE33 concentraties voor alle zeven kanalen en houtstookroet. De geselecteerde houtrookuren zijn oranje gelabeld.

Figuur 4.11 toont histogrammen voor de met de FIDAS gemeten PM_{10} , $PM_{2.5}$ en PM_{10} concentraties. Voor alle fracties wordt de hele range aan waarden ook gevonden wanneer er geen houtrook is. Houtrook is dus één van de bronnen van fijnstof, maar zeker niet de enige. Wel is duidelijk dat houtrook correspondeert met een groot deel van de hoge meetwaarden van fijnstof. Voor PM_{10} lijken zelfs bijna alle waarden $>15 \mu\text{g m}^{-3}$ toegeschreven te kunnen worden aan houtrook. Dit bevestigt dat houtrook met name bijdraagt aan de kleinere deeltjes.



Figuur 4.11: Histogrammen op uurbasis van PM concentraties (PM_{10} , $PM_{2.5}$ en PM_{10}), tevens aangegeven voor geselecteerde houtrookuren (oranje).

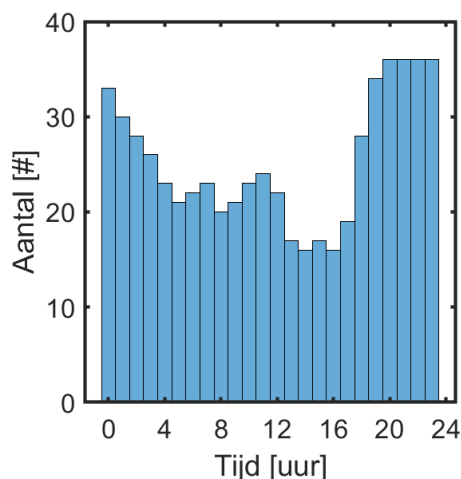
Figuur 4.12 toont de histogrammen voor de drie kanalen van de ACSM. Op kanaal 60 omvatten de houtrookuren duidelijk alle hoge waarden. Dit bevestigt dat het aantal false negatives klein zal zijn (en 0.015 als een redelijke drempelwaarde hiervoor). Voor kanalen 73 en 57 is dit in mindere mate het geval, omdat deze massa's ook gevoelig zijn voor ander organisch materiaal in de atmosfeer. ACSM-60 is dus het meest specifiek gevoelig voor levoglucosan en daarmee houtrook.



Figuur 4.12: Histogrammen op uurbasis van ACSM levoglucosan (met gebruik van m/z 60, 73 en 57), tevens aangegeven voor geselecteerde houtrookuren (oranje).

4.2.1.4 Geloofwaardige stookmomenten

Stookmomenten zijn het meest geloofwaardig wanneer ze samenvallen met typische gebruikspatronen van houtkachels en haarden. In de avonduren zijn mensen thuis en de daalt de buitentemperatuur, in die uren wordt dan ook het zwaartepunt van de houtrookuren verwacht. In de uren daarna is houtrook nog wel vaak detecteerbaar, waarschijnlijk doordat luchtvervuiling in de winter vaak lang blijft hangen (lagere menglaaghoogte). Figuur 4.13 toont de verdeling van gevonden houtrookuren over de dag. Dit laat zien dat de meeste houtrookuren inderdaad in de avond vallen (na 18 uur). Na middernacht neemt het aantal detecties langzaam af. In de voormiddag (van 12 tot 17 uur) wordt het laagste aantal houtrookuren gezien. Op 10 houtrookmomenten is duidelijk houtrook in de ochtend gedetecteerd, deze dagen vielen op twee na allemaal in de koudste maanden december en januari.



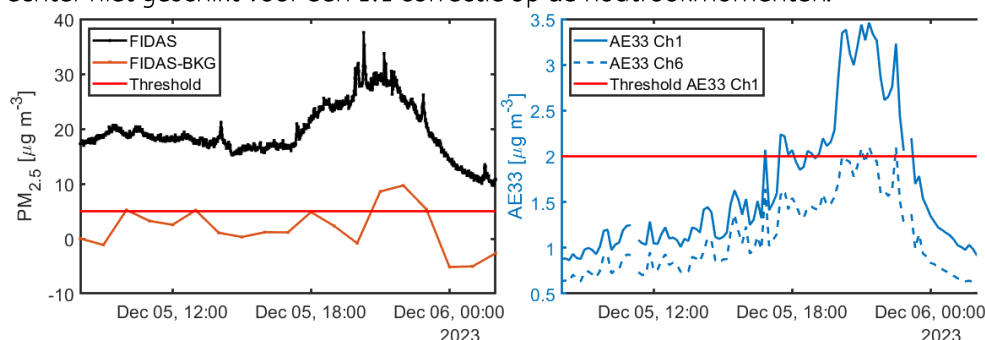
Figuur 4.13: Verdeling van houtrookuren over de uren van de dag in lokale wintertijd. Ook de “schouders” (zie 4.1.2) zijn hierbij meegenomen om ook de opstart en uitdoving goed in beeld te hebben.

4.2.2 Kwantitatief effect van gekozen waarden

4.2.2.1 Effect van vlakke achtergrondcorrectie

Bij de bepaling van de bijdrage van houtrook aan $PM_{2.5}$ is uitgegaan van een vlakke achtergrondcorrectie, gebaseerd op de 1-percentiel waarden. Er is onderzocht of deze correctie verbeterd kan worden door als achtergrond de $PM_{2.5}$ waarden gemeten op LML-station (van het Landelijk Meetnetwerk Luchtkwaliteit) in de Rijk te kiezen. De Rijk is een achtergrondstation beheerd door GGD Amsterdam op 10-15 km afstand van Heemskerk. De verwachting was dat door de achtergrondcorrectie de $PM_{2.5}$ waarden op houtrookmomenten beter overeen zouden komen met de roetwaarden. Hierdoor zou mogelijk de handmatige achtergrondcorrectie voor sommige houtrookmomenten niet nodig zijn.

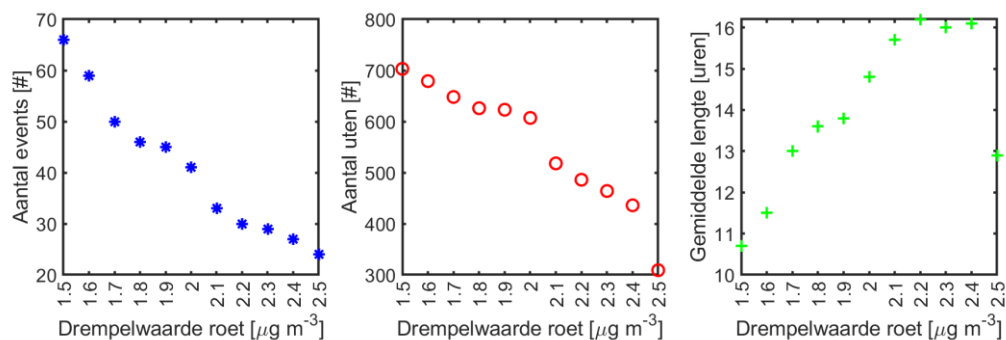
Door deze achtergrondcorrectie verdween echter regelmatig ook het $PM_{2.5}$ deel dat goed overeenkwam met roet. Een voorbeeld is te zien in Figuur 4.14. Hieruit komt naar voren dat het achtergrondstation in de Rijk mogelijk ook deze invloed van houtstook mee meet en houtrook dus ook vanaf grotere afstand het gebied inkomt. Er is besloten daarom niet de achtergrond gecorrigeerde $PM_{2.5}$ waardes uit de Rijk te gebruiken voor het bepalen van de houtrookmomenten. Het globale beeld na deze achtergrondcorrectie was overigens wel vergelijkbaar met de bevindingen in Figuur 4.1 voor de vorige campagne, het leek echter niet geschikt voor een 1:1 correctie op de houtrookmomenten.



Figuur 4.14: Tijdenree van $PM_{2.5}$ met en zonder achtergrondcorrectie (rechts) en AE33 data (links).

4.2.2.2 Effect van drempelwaardenkeuze

Het kiezen van de drempelwaarden voor selectie van de houtrookmomenten heeft invloed op de gevonden kengetallen. De drempelwaarden zijn gekozen op basis van de ranges van waarden van $PM_{2.5}$ en AE33 BC1 waarvoor ook hoge ACSM-60 waarden zijn gezien, gecombineerd met het onderscheid tussen lokaal fijnstof en fijnstof uit de achtergrond (paragraaf 4.1.1). Vervolgens zijn de criteria voor roet (AE33 BC1) iets verruimd om de houtrookmomenten volledig in beeld te krijgen (paragraaf 4.1.2). Om te bepalen in hoeverre de selectie van houtrookmomenten gevoelig is voor de keuze van de drempelwaarden (of de verruiming daarvan) is een variatieanalyse rondom de gekozen drempelwaarden uitgevoerd.



Figuur 4.15: Effect van de gekozen drempelwaarde voor AE33 BC1 op het aantal gevonden houtrookmomenten, het aantal uren in de houtrookmomenten en de gemiddelde lengte van de gevonden momenten. De gekozen drempelwaarde is vet gedrukt (AE33 kanaal 1 > $2 \mu\text{g m}^{-3}$ en FIDAS $\text{PM}_{2.5} > 5 \mu\text{g m}^{-3}$).

Figuur 4.15 toont het effect van een variatie in de AE33 BC1 drempelwaarde (in stappen van $0,1 \mu\text{g m}^{-3}$) op het aantal gevonden houtrookmomenten, de gemiddelde lengte daarvan (inclusief schouders) en het totaal aantal houtrookuren.

Een kleine verandering in de AE33 BC1 drempelwaarde heeft een groot effect op het aantal gevonden houtrookmomenten. Een verschil van $0,1 \mu\text{g m}^{-3}$, ten opzichte van de gekozen $2 \mu\text{g m}^{-3}$, zorgt bij verlaging voor 4 momenten meer (10% verschil) of bij verhoging 8 momenten minder (20% verschil) events.

De gekozen drempelwaarde heeft ook effect op het totaal gevonden aantal uren, maar minder sterk: $0,1 \mu\text{g m}^{-3}$ minder AE33 BC1 zorgt voor 16 meer gevonden uren (3%) en $0,1 \mu\text{g m}^{-3}$ meer roet zorgt voor 89 minder gevonden uren (15%). De lengte van de events neemt met 1 uur af bij $0,1 \mu\text{g m}^{-3}$ verlaging, en met 0,9 uur toe bij $0,1 \mu\text{g m}^{-3}$ verhoging. Een kleine verandering van de roet drempelwaarde naar boven heeft dus meer effect dan naar beneden. Het effect vlt wel af met verdere verhoging ($2,2 \mu\text{g m}^{-3}$ leidt tot 32 uur minder, 5%) en de gekozen drempelwaarde zit duidelijk op een “breekpunt”. Dit geeft vertrouwen in de gekozen drempelwaarde.

Tabel 4.1: Effect van de gekozen drempelwaarde voor de FIDAS $\text{PM}_{2.5}$ op het aantal geselecteerde houtrookmomenten, het aantal uren in de houtrookmomenten en de gemiddelde lengte van de geselecteerde momenten. De gekozen drempelwaarde is vet gedrukt (AE33 kanaal 1 > $2 \mu\text{g m}^{-3}$ en FIDAS $\text{PM}_{2.5} > 5 \mu\text{g m}^{-3}$).

AE33 Kanaal 1 [µg m ⁻³]	FIDAS [µg m ⁻³]	PM _{2.5}	Aantal events [#]	Aantal uren [#]	Gemiddelde lengte [uren]
2	3	41	607	14.8	
2	4	41	607	14.8	
2	5	41	607	14.8	
2	6	41	607	14.8	
2	7	41	607	14.8	

Tabel 4.1 laat het effect zien van de drempelwaarde van $\text{PM}_{2.5}$ (FIDAS). Hieruit blijkt dat het aantal gevonden houtrookmomenten en de lengte daarvan niet gevoelig is voor de gekozen $\text{PM}_{2.5}$ drempelwaarde. Verhoging of verlaging van de drempel met $2 \mu\text{g m}^{-3}$ heeft geen gevolgen. Dit ligt met name aan de minder strenge AE33 BC1 drempelwaarde van $1 \mu\text{g m}^{-3}$ voor het selecteren van de “schouders”. Als alleen het strenge filter wordt

gebruikt ($AE33\ BC1 > 2\ \mu g\ m^{-3}$), dan geeft variatie in de $PM_{2.5}$ drempelwaarde zeer kleine verschillen in het aantal uren (variërend tussen 238 en 244 uur voor drempelvariatie tussen 7 en $3\ \mu g\ m^{-3}$). De drempelwaarde van AE33 BC1 is dus kritischer voor de selectie dan de $PM_{2.5}$ drempelwaarde en roet is dus een belangrijkere indicator van houtrook dan $PM_{2.5}$.

4.3 Kengetallen voor houtrook in de IJmond

Bijlage B geeft een overzicht van alle, op basis van de in de vorige paragrafen beschreven selectiemethode, gevonden houtrookmomenten. In Tabel 4.2 en Tabel 4.3 zijn de kengetallen gegeven die hieruit voor de houtrookpilot kunnen worden afgeleid.

Tevens worden hierbij de onzekerheden in de kengetallen gegeven ($\pm$ achter de getallen). De onzekerheden zijn bepaald door het effect van variatie in de gekozen inputwaarden te beschouwen. Hierbij is gekeken naar:

- variatie van de gekozen drempelwaarden (zowel voor roet als voor $PM_{2.5}$)
- variatie van de waarden voor schouderbepaling van roet
- variatie in de gekozen percentielwaarde bij de achtergrondconcentratie bepaling
- variatie in de tijdsrange waarover de achtergrondconcentratie bepaling gedaan wordt per houtrookmoment
- de apparatuursafhankelijke onzekerheden in de meetwaarden.

Deze onzekerheden zijn vervolgens opgeteld met behulp van numerieke propagatie van onzekerheden. Vervolgens is bij de variatie van drempelwaarden, waarbij ook de selectie van houtrookmomenten iets verandert, opnieuw gekeken of er correlatie was tussen AE33 BC1 en $PM_{2.5}$. Wanneer dit niet het geval was, is de $PM_{2.5}$ concentratie bijdrage van houtrook ingeschat met behulp van AE33 BC1, zoals beschreven in paragraaf 4.1.3.

Tabel 4.2: Algemene kengetallen voor de houtrookpilot 2023-2024 in de IJmond op basis van de in paragraaf 4.1 beschreven selectie van houtrookfijnstof. Het gaat hier in alle gevallen om $PM_{2.5}$.

Kengetallen	
Aantal geïdentificeerde houtrookmomenten ¹⁹	39 ± 5
Gemiddelde fijnstofconcentratie tijdens houtrookuren ²⁰	$7,6 \pm 1,9\ \mu g/m^3$ houtrook (na achtergrondaftrek) $18,4 \pm 1,9\ \mu g/m^3$ totaal (bovengrens)
Piekconcentratie houtrookmoment gemiddeld ²⁰	$13,3 \pm 2,3\ \mu g/m^3$ (na achtergrondaftrek)
Procentuele houtrookbijdrage aan fijnstof ²¹	$10,1 \pm 3,3\%$ $12,1 \pm 3,9\%$ (alleen wintermaanden) $40,0 \pm 11,2\%$ (tijdens houtrookmomenten)

¹⁹ Exclusief het vuurkorfexperiment van 18 januari en Oud & Nieuw.

²⁰ Exclusief Oud & Nieuw.

²¹ Berekend uit het totaal aan houtrookfijnstof gecorrigeerd voor de achtergrondbijdrage gedeeld door het totaal aan fijnstof.

Tabel 4.3: Kengetallen in uren en dagen voor de houtrookpilot 2023-2024 in de IJmond op basis van de in paragraaf 4.1 beschreven selectie van houtrookfijnstof.

Kengetallen	Dagen	Uren
Totale lengte houtrookpilot 2023-2024	196	4654
Aantal overschrijdingsdagen van de daggemiddelde WHO-norm voor PM _{2.5} (15 µg/m ³) ²²	27 (daggemiddelde)	724
Aantal “overschrijdingsuren” waarin PM _{2.5} > 15 µg/m ³ ¹⁹	31 (uren opgeteld)	743
Aantal dagen met daggemiddelde overschrijding door houtrook ²³	9 (daggemiddelde)	190
Houtrookuren volgens huidige drempelwaarden ¹⁹	25 ± 3,7 (uren opgeteld)	598 ± 86 (13% van totaal)
Houtrookuren met gemeten PM _{2.5} waarden boven 15 µg/m ³	15 ± 1 (uren opgeteld)	363 ± 27 (8% van totaal, 49% van overschrijdingsuren, 59% van houtrookuren)
Gemiddelde lengte houtrookpiek	0,6 ± 0,2	15 ± 2,8 ²⁴
Meest voorkomende stookmoment	Donderdag	Avonduren tussen 19 en 23

4.4 Conclusies hoofdstuk 4

In dit hoofdstuk is een methode uitgewerkt om houtrookmomenten te identificeren op basis van roet- en fijnstofmetingen, geïntegreerd met ACSM-60 metingen als marker voor levoglucosan.

De aanpak is gebaseerd op drempelwaarden voor roet (AE33 kanaal 1 > 2 µg/m³) en fijnstof (PM_{2.5} > 5 µg/m³), aangevuld met een bredere selectie van de “schouders” van pieken (roet > 1 µg/m³) om de volledige duur van houtrookmomenten te vangen. Deze methode resulteerde in de identificatie van 39 houtrookmomenten (41 inclusief oud & nieuw en een test met een vuurkorf).

Een alternatieve benadering op basis van de verhouding PM_{2.5}/BC1, nog directer gebaseerd op het onderscheid tussen lokaal fijnstof met roet en fijnstof met minder roet uit de achtergrond, toonde een verbeterde correlatie met levoglucosan waarden en biedt perspectief voor verdere verfijning van de selectiecriteria. In vervolgonderzoek zal ook deze benadering verder worden getest.

Voor de preciezere toekenning van fijnstof aan houtrook is er ook een correctie voor de fijnstofbijdrage van andere bronnen toegepast. Voor 29 van de 41 houtrookmomenten kon een directe lineaire relatie tussen roet en fijnstof worden vastgesteld ($R^2 > 0,6$), waarna de correctie is vastgesteld op een vlakke achtergrondbijdrage van 1 percentiel.

²² Inclusief Oud & Nieuw.

²³ Totaal aantal daggemiddelde overschrijdingsdagen minus de dagen waarbij ook een overschrijding zou zijn na aftrek van het fijnstof uit houtrook. Het aantal uren is het totaal aan houtrookuren op die dagen.

²⁴ 12 uur als het houtrookmoment van 5 dagen lang op 8-12 maart niet meegenomen wordt.

Voor de overige momenten is een geschaalde waarde van de roetmeting gebruikt om het houtrookdeel in de fijnstofmetingen te onderscheiden van fijnstof uit andere bronnen.

De onzekerheidsanalyse toont aan dat de kans op false positives verwaarloosbaar is, terwijl het aantal false negatives beperkt blijft tot 56 uur, grotendeels buiten het stookseizoen. De gekozen drempelwaarden zijn dus effectief. Ook de geselecteerde fracties van roet en fijnstof en de gevonden tijdstippen van de houtrookmomenten overtuigen dat de selectie valide is. Verdere verfijning en validatie (filteranalyses en alternatieve selectiecriteria) is gepland om de methode nog duidelijker te bevestigen.

De gekozen drempelwaarden zijn ook robuust vanuit een kwantitatieve beschouwing. Een verlaging van de roetdrempel met $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ leidt tot 3% meer houtrookuren, terwijl een verhoging met $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 15% meer uren oplevert. Het effect vlakt af met verdere verhoging en de gekozen drempelwaarde zit duidelijk op een “breekpunt”, wat vertrouwen geeft in de gekozen drempelwaarde. Roet is ook duidelijk een sterkere indicator voor houtrook dan $\text{PM}_{2,5}$.

De 39 geselecteerde houtrookmomenten zijn in totaal gelijk aan 598 uur (eq. 25 dagen) blootstelling, waarvan 352 uur (eq. 15 dagen) met een waarde boven de WHO advieswaarde van $15 \mu\text{g m}^{-3}$. Tijdens 189 van deze uren was de waarde niet hoger dan $15 \mu\text{g m}^{-3}$ geweest zonder houtrook. De daggemiddelde $\text{PM}_{2,5}$ waarde had op 9 van de 27 dagen de WHO advieswaarde niet overschreden zonder de aanwezigheid van houtrook. Tijdens houtrookmomenten was de bijdrage van houtrook aan de $\text{PM}_{2,5}$ -concentratie gemiddeld 40%. Het was 12,1% van al het fijnstof in de wintermaanden. De gemiddelde concentratie van aan houtrook toegekend fijnstof tijdens houtrookmomenten was $7,6 \mu\text{g m}^{-3}$, met een piekconcentratie van $13,3 \mu\text{g m}^{-3}$.

5 Fijnstof en roet sensoren voor de verspreiding van houtrook

5.1 Ontwikkeling van de TNO roetsensoren

In 2024 is er intensief gewerkt aan het ontwikkelen van zelfstandige roetsensorkastjes voor het detecteren van houtrook op wijkniveau (zie ook paragraaf 2.4). In ieder roetsensorkastje bevinden zich twee detectoren (D0 en D1), waarbij de lucht via een leiding eerst door één en dan door de andere detector stroomt. Daarnaast bevindt zich in ieder kastje een pompje met extra filter, een UV-bron voor ionisatie van roet, een verwarmingselement, een flowmeter, een luchtvochtigheidsmeter, een transformator en een Central Processing Unit (CPU) met modem. In ieder zelfstandig kastje is extra afscherming voor externe velden en weersinvloeden aangebracht. Voor de kastjes is (in theorie) één keer per jaar klein onderhoud nodig.

Het ontwikkeltraject verliep niet zonder tegenslagen. De oorspronkelijke 19-inch versie in de aerosoltrailer, die werd teruggeplaatst na reparatie (**kastje 1**), bleef problemen geven, ondanks vervanging van de detectorbuis. Ook het eerste prototype zelfstandige kastje (**kastje 2**) viel al in februari uit. Diverse pogingen om deze kastjes werkend te krijgen, waaronder het vervangen van de versterker en experimenten met nieuwe materialen en andere configuraties van de aansluitingen van de detectorbuis, leverden slechts beperkt succes op.

Ondanks de uitdagingen was er ook voortgang en werden de kastjes op een aantal aspecten succesvol verbeterd. Eind 2024 waren uiteindelijk zes zelfstandige kastjes gebouwd, waarvan het tweede prototype kastje (**kastje 3**) voortdurend een realistisch signaal heeft gegeven en alleen een vervanging van de pomp hoefde te ondergaan. De stabiliteit van de meetdata van kastje 3 verbeterde sterk na het plaatsen van een verbeterde cyclooninlaat en het kastje stond lange tijd in goede staat op de meettrailer, waardoor de meetdata ook goed met de aethalometer te vergelijken is. Ook het derde prototype kastje (**kastje 4**) liet een verbetering in signaal zien na het plaatsen van een cyclooninlaat, en is enkele maanden uitgeplaatst geweest bij een bewoner.

De oorspronkelijk gekozen pomp in de kastjes bleek niet stevig genoeg, deze brak uit elkaar na enkele maanden. Deze is nu in alle kastjes vervangen door een betrouwbaarder model dat tot nu toe redelijk stabiel draait. Ook is gevonden dat grote fluctuaties in het signaal te wijten waren aan pompinstabiliteit, wat opgelost kon worden door een hogere luchtflow toe te passen.

Ook werd er een nieuw type signaalversterker getest, die veel van de stabiliteitsproblemen had moeten oplossen. Tijdens testen in Rotterdam in augustus en rooktesten op een boeren erf in september-oktober bleek dat het nieuwe type versterker een te hoge detectielimiet tot gevolg had, ver boven de voor houtrook relevante range. De versterker was daardoor niet inzetbaar. Helaas waren de nieuwe kastjes (**kastjes 5-7**) al uitgerust met deze nieuwe versterker, deze waren daardoor ook niet functioneel.

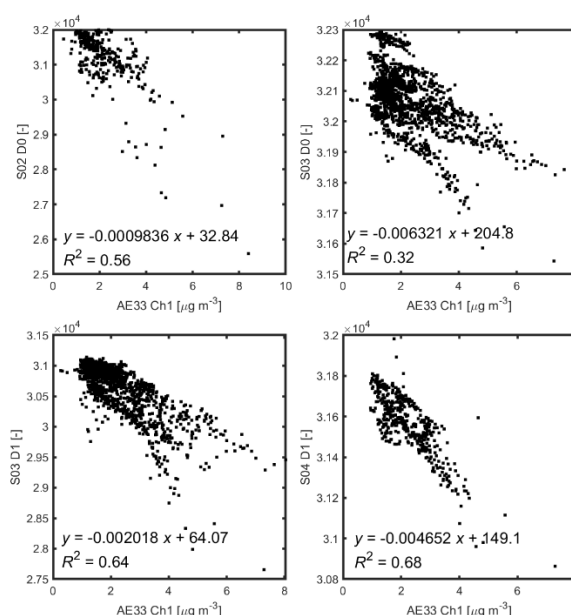
5.2 Datakwaliteit van de roetsensoren

Tabel 5.1: Periodes wanneer de zelfstandige roetsensorkastjes operationeel waren

Sensorkastje	Locatie	Bruikbare meetperiode
2	Heemskerk, in de trailer	tijdens campagne: 12 december – 1 februari (alleen D0)
3	Heemskerk, op de trailer	tijdens campagne: 12 januari – 28 mei (D0 tot 4 april)
4	Heemskerk, op de trailer	tijdens campagne: 12 januari – 29 januari
4	Bij bewoner in Heemskerk	Tijdens campagne: 30 januari – 30 april & 7 mei – 28 mei
4	Bij bewoner in Heemskerk	na campagne: 29 mei – 24 september

Gedurende enkele perioden tijdens de campagne en daarna zijn de prototype kastjes operationeel geweest (Tabel 5.1). Van die periodes is gebruik gemaakt om een kalibratie van het signaal uit te voeren.

Vier detectoren, in kastjes 2, 3 en 4, konden gekalibreerd worden met het AE33 BC1 signaal (Figuur 5.1). Bij de vorige campagne in Bergen werd een veel sterkere correlatie gezien tussen de roetsensor en het “houtstookroet” signaal. Dit heeft vermoedelijk te maken met de instabiliteit van het signaal van de losse roetsensorkastjes tijdens de kalibratie, o.a. omdat deze is gedaan voor het plaatsen van de betere inlaat²⁵. Zowel voor kastje 3 als voor kastje 4 was er één detector (D1) die goed heeft gewerkt.

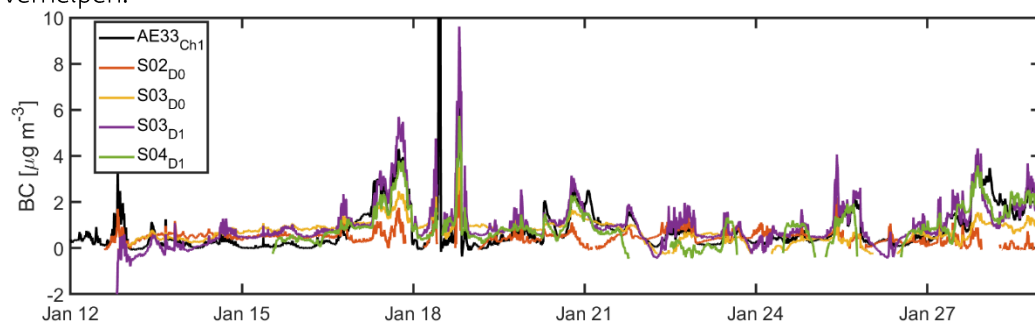


Figuur 5.1: Kalibratiegrafieken van de werkende sensoren uit Tabel 5.1 op uurbasis tegen AE33 BC1. Vanwege de ruis is de kalibratie alleen uitgevoerd voor metingen tijdens houtrookmomenten. Bovenin elke grafiek de resulterende functie van een lineaire fit aan de data en de correlatie coëfficiënt (R^2).

De eerste, meest voor de hand liggende, verklaring van de matige correlatie van de sensoren met AE33 BC1 in Figuur 5.1 is de instabiliteit van de sensorkastjes. Dit kan komen door luchtvochtigheid, variaties in de pompsnelheid en lekstromen in het instrument.

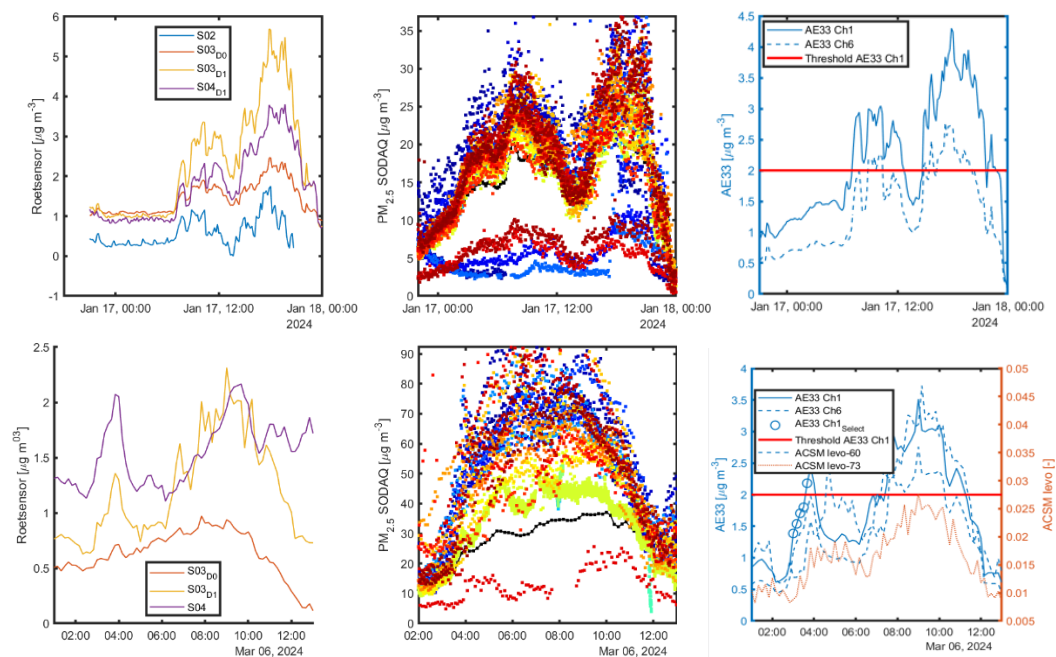
²⁵Aan het einde van de campagne was deze inlaat wel geplaatst, maar toen was er veel minder roet in de lucht wat de kalibratie ook bemoeilijkt.

Figuur 5.2 toont een tijdserie van de gekalibreerde roetwaardes van de roetsensoren en de AE33 BC1. Op 18 januari in de ochtend is er zeer dicht bij de meettrailer hout gestookt als experiment (het eerder naar gerefereerde vuurkorfexperiment). Dit figuur bevestigt dat kastje 3 en 4 voor bepaalde periodes AE33 BC1 (van 15 tot 21 januari) goed gevolgd hebben, maar dat er ook langere periodes waren dat het signaal zeer onstabiel was (van 21 tot 27 januari). Er wordt gewerkt aan een robuuster ontwerp om deze problemen te verhelpen.



Figuur 5.2: Tijdserie van de roetconcentraties gemeten met de AE33 en de roetsensoren (S02_{D0}, S03_{D0}, S03_{D1} en S04_{D1}) alle op 10 minuten basis.

Een tweede verklaring voor het verschil in vergelijkbaarheid van de roetsensor met de AE33 in Bergen ten opzichte van deze campagne is een mogelijk sterk andere bronverdeling. In Bergen stond de trailer in een woonwijk met veel houtstokers, terwijl in Heemskerk de trailer dicht bij parkeerplaatsen staat. De roetsensor is, op basis van het meetprincipe, gevoelig voor een breder spectrum aan roetsamenstelling (organisch vs. elementair koolstof) dan één van de kanalen van de aethalometer. Bij een grotere mix aan bronnen zal het signaal van de roetsensor dus een “mix” weergeven van de verschillende kanalen van de AE33.

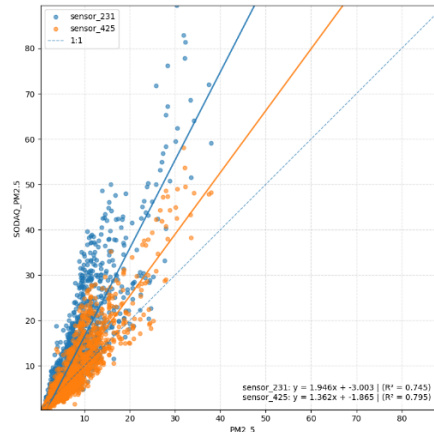


Figuur 5.3: Voorbeelden van roet- en fijnstofsensormetingen op twee houtrookmomenten in januari en maart. Links: Signaal van de twee detectoren in roetsensorkastjes 3 (op centraal meetpunt) en 4 (bij HL deelnemer). Midden: Signaal van de fijnstofsensoren in de IJmond. De zwarte datapunten geven de waarde van de FIDAS fijnstofmonitor op het centrale meetpunt. Rechts: Signaal van de aethalometer kanaal 1 en 6 (blauw) en van de ACSM op kanalen 60 en 73 (oranje).

Figuur 5.3 toont voor twee verschillende houtrookmomenten de signalen van de twee best werkende roetsensoren (kastje 3 en 4) en alle fijnstofsensoren uit het Hollandse Luchten-netwerk in de IJmondgemeenten. Het valt op dat op deze momenten twee detectoren (S3-D1 en S4-D1), trends laten zien die goed overeenkomen met de aethalometer metingen (zie ook Bijlage B). Dit laat zien dat, na het overkomen van alle mankementen, het nog steeds een interessante technologie is voor de detectie van houtrookroet. Het ontwerp wordt momenteel in detail onder de loep genomen, met als nieuw verwacht ijkmoment Q1 2026.

5.3 Gebruik van de fijnstofsensoren uit het Hollandse Luchten meetnetwerk

In deze studie zijn alle beschikbare data van fijnstofsensoren in de IJmondgemeenten meegenomen. Deze fijnstofsensoren volgen over het algemeen goed de trends van het referentie-instrument (de FIDAS), zij het met meer ruis en enkele minder goed werkende sensoren (Figuur 5.3). Opmerkelijk is dat veel van de SODAQ-sensoren bijna 2 maal hogere $PM_{2.5}$ -waarden meten dan de FIDAS, wat erop wijst dat een nieuwe kalibratie van de absolute waarden noodzakelijk is voordat deze sensoren betrouwbaar kunnen worden ingezet voor het bepalen van de bijdrage van houtrook aan lokale fijnstofconcentraties. Deze kalibratie zal waarschijnlijk per fijnstofsensor gedaan moeten worden. Een vergelijking van de fijnstofsensoren op het centrale meetpunt met de $PM_{2.5}$ meetwaarden van de FIDAS (Figuur 5.4) laat zien dat de sensoren weliswaar nauwelijks een offset vertonen, maar dat de gevoeligheid wel onderling kan verschillen.



Figuur 5.4: Vergelijking van de $PM_{2.5}$ metingen van de twee fijnstofsensoren van SODAQ op het centrale meetpunt met de metingen van de FIDAS.

Toch bieden deze sensoren gemeenten een bruikbaar hulpmiddel: ze maken het mogelijk om fijnstofpieken tijdens houtrookmomenten lokaal goed te volgen, wat belangrijk kan zijn voor beleid en handhaving.

Enkele knelpunten bij het gebruik van fijnstofsensoren zijn dat er regelmatig uitschieters te zien zijn in de PM -metingen, die de analyse kunnen verstoren en dat er ook sensoren zijn die volledig vlakke waarden registreren, wat duidt op technische problemen of uitval. Het is niet verassend dat goedkope sensoren vaker problemen laten zien dan de veel duurdere high-end instrumenten. Maar door veel sensoren in te zetten, zoals in de IJmond, kunnen sensoren met problemen relatief makkelijk geïdentificeerd en uitgefilterd worden. Het verbeteren van de datakwaliteit en sensorbetrouwbaarheid blijft

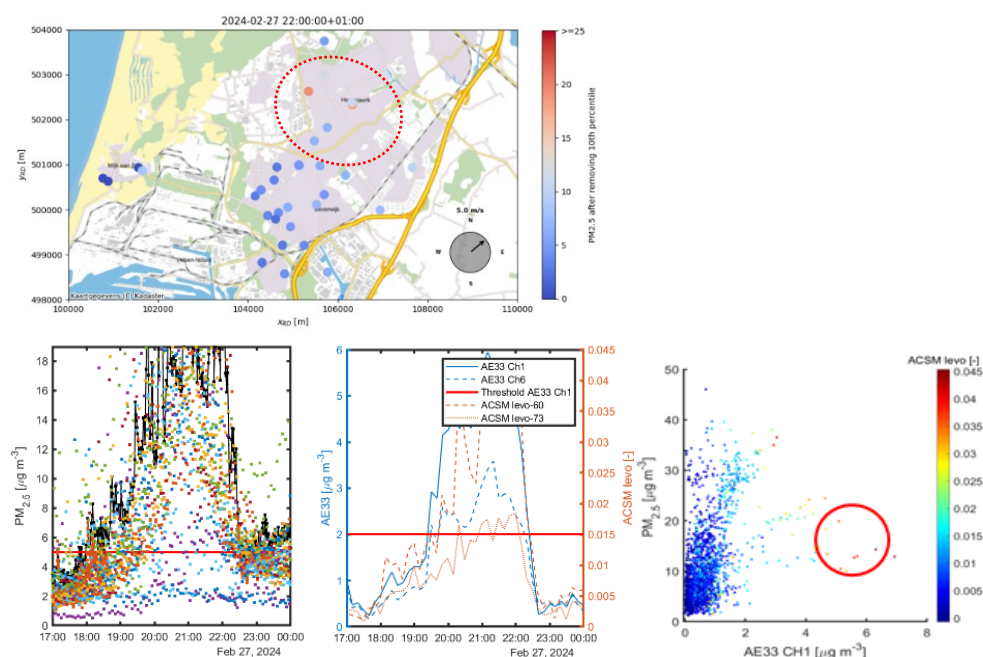
echter een aandachtspunt om het netwerk in de toekomst geschikt te maken voor nauwkeurige en actiegerichte luchtkwaliteitsmonitoring.

5.4 Verspreiding houtrook over IJmondgemeenten

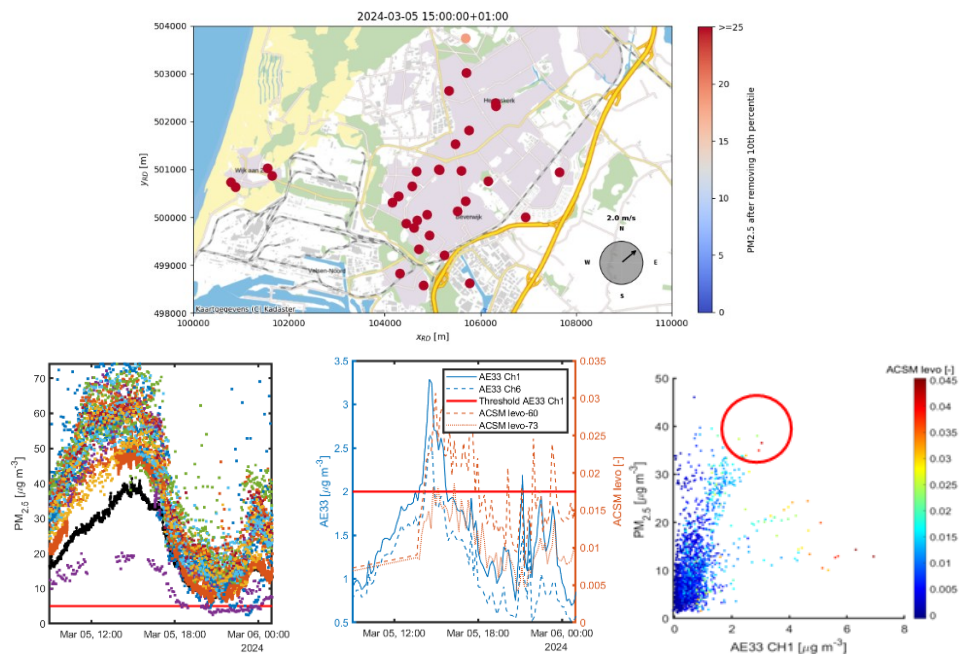
Er bevinden zich 72 $PM_{2.5}$ fijnstofsensoren bij actieve bewoners in de IJmondgemeenten waarvan de data wordt geregistreerd door Samen meten en Hollandse Luchten. Om te zien of deze sensoren ook een duidelijk en vergelijkbaar signaal geven op de geïdentificeerde houtrookmomenten zijn er animaties gemaakt, waarbij op de kaart van de IJmond met een schaal van blauw naar rood het verloop van de meetwaarden van deze sensoren gedurende de houtrookmomenten worden weergegeven. In Bijlage B zijn voor alle houtrookmomenten het beeld bij de maximale fijnstofwaarde weergegeven. In de animaties waren 3 karakteristiek verschillende soorten houtrookmomenten te onderscheiden, overeenkomstig met de trends uit het fijnstof vs. roetdiagram (Figuur 4.2):

1. Momenten met lokale houtrook, waarbij de fijnstoftrends verschillend zijn voor de sensoren (scatter) en er in een bepaald gebied een verhoging aan te wijzen is. (Figuur 5.5).
2. Gemengde momenten, met een grote bijdrage van overwaaiend fijnstof, maar waar bovenop ook nog indicaties van lokale houtrook in wijken zijn aan te wijzen (Figuur 5.6).
3. Momenten waarbij overwaaiend fijnstof zo dominant is, dat lokale houtrookbijdragen nauwelijks te herkennen zijn (Figuur 5.7).

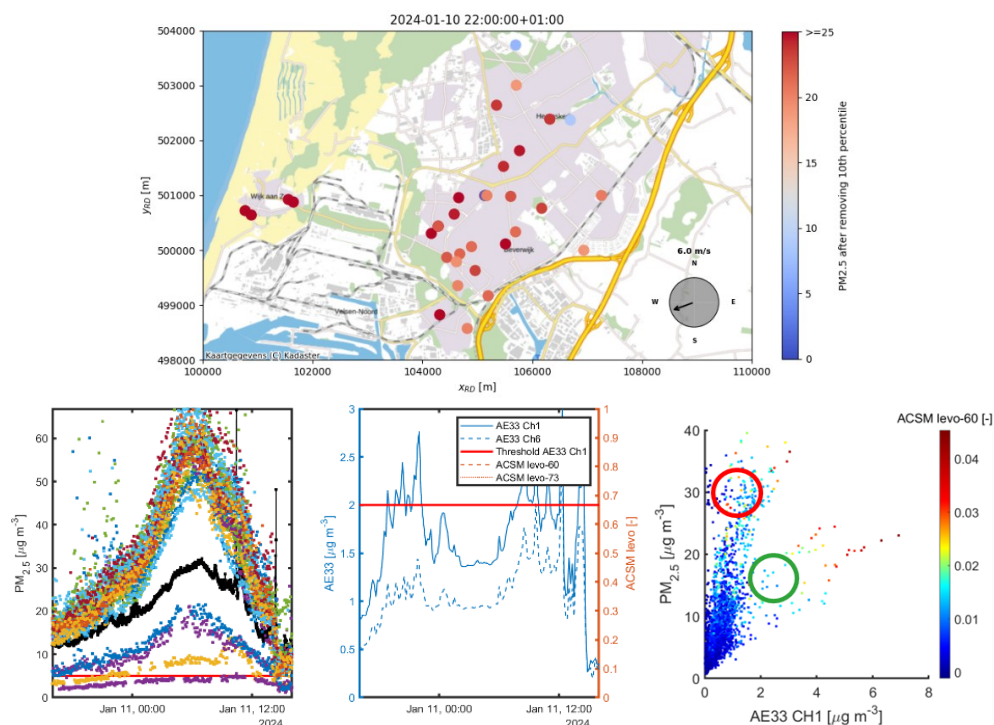
Hieronder zijn enkele voorbeelden van deze drie typen houtrookmomenten gegeven.



Figuur 5.5: Voorbeeld van een moment met lokale houtrook, waarbij de fijnstoftrends verschillend zijn voor de sensoren (scatter) en er in een bepaald gebied een verhoging aan te wijzen is. **Boven:** het kaartje van de IJmondgemeenten op het piekmoment. **Onder:** Gemeten $PM_{2.5}$ concentraties op het geselecteerde houtrookmoment, in rood de drempelwaarde, in zwart het high-end instrument (links). Gemeten roet (BC1 en BC6), ACSM-60 en ACSM-73 op hetzelfde moment, in rood de drempelwaarde (midden). Plek in het fijnstof-roet diagram die correspondeert met de gemeten roet en fijnstofwaarden op het piekmoment (rechts).



Figuur 5.6: Voorbeeld van een “gemengd moment”. Dit is waarschijnlijk voor een groot deel houtrook, maar er is ook een grote achtergrondbijdrage (tot 15:00 uur). Na 18:00 lijkt het karakter te veranderen en gaat het beeld over in een lokale houtrookpiek. Het maximum van de piek is gelijkmatig over de hele regio waar te nemen. Zie voorgaande figuur voor de beschrijving van de losse plaatjes.



Figuur 5.7: Voorbeeld van een moment met een minimale houtrookbijdrage (mogelijk in uren voor middernacht en in de ochtend), waarbij het overwaaigende fijnstof. Op basis van de roetconcentratie wordt de hoogste waarde niet toegekend aan houtrook. Hier wordt dus voor gecorrigeerd. In rood in het fijnstof-roet diagram de waarden van het piekmoment, in groen de waarden van het houtrookmoment, waarvoor fijnstof ook verhoogd is. Zie voorgaande figuren voor de beschrijving van de losse plaatjes.

Voor de momenten waarop lokale houtrook goed te onderscheiden is, valt verder op dat:

- De gemeten roet en fijnstofwaarden op deze momenten in de range vallen, die in Figuur 4.2 geassocieerd wordt met lokaal fijnstof.
- Deze momenten vaak herkenbaar zijn aan een grote variatie (scatter) in de fijnstoftrends van de verschillende sensoren (want dit wordt in een bepaalde wijk wel opgepikt en ergens anders niet) en scherpe korte pieken in de FIDAS metingen.
- Deze over het algemeen een $R^2 > 0,6$ hebben in de regressie analyse van roet tegen fijnstof, wat duidt op een lage, of nagenoeg lineaire, relatieve bijdrage van andere fijnstofbronnen, wat het eerder gekozen criterium voor houtrookmomenten waarbij een extra achtergrondcorrectie nodig is bevestigt.

In het vervolgonderzoek zal in meer detail naar deze aanvullende criteria gekeken worden.

5.5 Conclusies hoofdstuk 5

In Hoofdstuk 5 wordt de inzet van fijnstof- en roetsensoren als instrumenten om de verspreiding van houtrook op wijkniveau in kaart te brengen beschouwd aan de hand van de resultaten van de meetpilot.

De TNO-roetsensorkastjes toonden potentie in de pilot; kastjes 3 en 4 leverden bruikbare data op. De plaatsing van een verbeterde cyclooninlaat en vervanging van de pomp droegen bij aan een stabiel signaal, maar de betrouwbaarheid van het huidige ontwerp blijft beperkt, en verdere doorontwikkeling is nodig. Een nieuw ontwerp zal waarschijnlijk begin 2026 opnieuw in de praktijk getest worden.

De fijnstofsensoren uit het Hollandse Luchten-netwerk bleken goed in staat om trends in $PM_{2,5}$ te volgen en informatie te leveren over de ruimtelijke spreiding van fijnstof tijdens houtrookmomenten. Dit biedt perspectief voor lokale handhaving en/of burgerbetrokkenheid. De sensoren overschatten de absolute fijnstofwaarden wel aanzienlijk (tot bijna een factor 2).

De animaties van de fijnstofsensormetingen laten zien dat het mogelijk is om op basis van patronen in de sensordata onderscheid te maken tussen verschillende typen houtrookmomenten: lokaal, gemengd en achtergrond gedomineerd. Deze classificatie is belangrijk om de resultaten goed te duiden, fijnstofpieken met waarden boven de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zijn doorgaans niet uitsluitend toe te kennen aan houtrook op enkele korte uitschieters na.

Bij lokaal gedomineerde houtrookmomenten zijn duidelijke verhogingen zichtbaar in zowel roet- als fijnstofmetingen met een vergelijkbare trend. Vaak komen deze ook overeen met een sterke ruimtelijke variatie in de waarden van de fijnstofsensoren over het gebied. Op gemengde momenten is er een combinatie van lokale houtstook en overwaaiend fijnstof aanwezig, maar zijn nog wel verschillen tussen locaties te zien. Op achtergrondmomenten, gedomineerd door overwaaiend fijnstof, zijn verschillen in houtrook tussen wijken niet meer te onderscheiden. Dit onderstreept ook dat het belangrijk is om te werken met een combinatie van roet- en fijnstofmetingen om de aanwezigheid van houtrook in wijken goed te kunnen duiden.

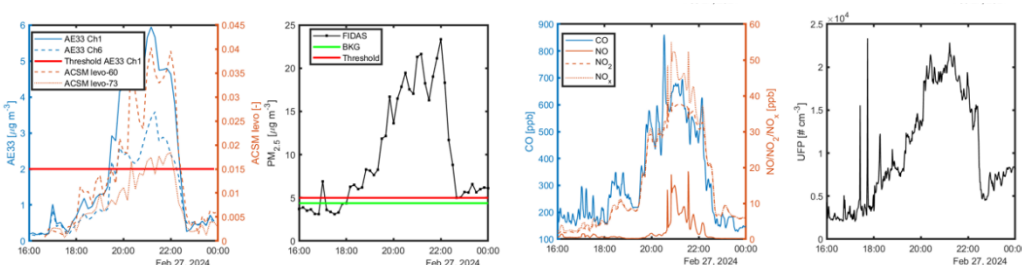
Mits goed gekalibreerd en onderhouden, vormen de sensoren een kostenefficiënt alternatief voor de high-end meetapparatuur, waarmee ook de verspreiding over verschillende wijken specifiek bepaald kan worden. Verdere verbetering van de datakwaliteit, robuustheid en standaardisatie van de roet- en fijnstofsensoren is echter noodzakelijk voor toepassing van de methode voor de bepaling van houtrookmomenten in de praktijk.

6 Andere stoffen in houtrook

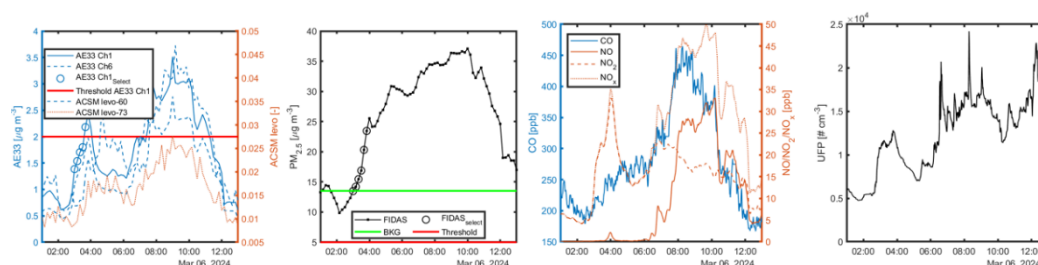
6.1 Correlatie met andere gemeten stoffen

In de voorgaande hoofdstukken zijn de houtrookmomenten bepaald op basis van roet en fijnstof, waarbij de drempelwaarden zijn bepaald aan de hand van ACSM-60 als marker voor levoglucosan. Op veel houtrookmomenten lijken echter de trends van CO, NO₂ en UFP ook goed overeen te komen met die van roet en ACSM-60 (Figuur 6.1).

Op momenten wanneer houtrookfijnstof meer gemengd is met fijnstof uit andere bronnen (Figuur 6.2) zijn de trends in CO, NO₂ en UFP echter over het algemeen ook anders. Om hier meer grip op te krijgen is onderzocht wat het zou betekenen als CO of NO₂ gebruikt zou worden voor de herkenning van houtrookmomenten.

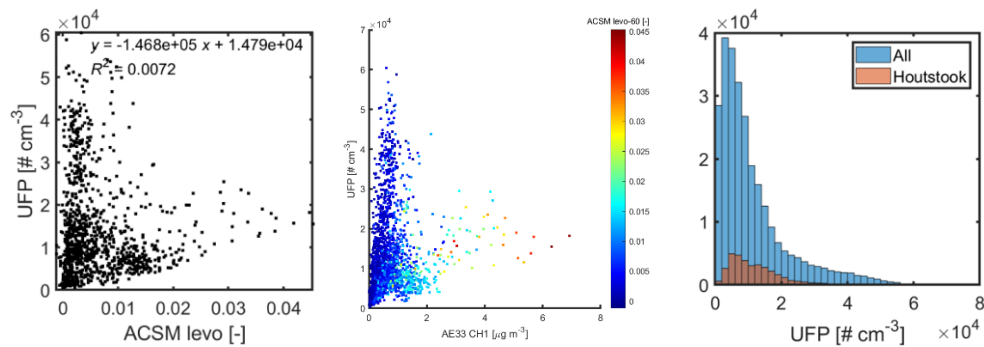


Figuur 6.1: Voorbeeld van een als “lokaal” geïdentificeerd houtrookmoment met hoge roetwaarden boven de 4 µg/cm³. Van links naar rechts: i) roet (BC1 en BC6) en levoglucosan (kanalen 60 en 73), ii) fijnstof (PM_{2.5}), iii) CO, NO, NO₂ en NO_x, iv) UFP.



Figuur 6.2: Voorbeeld van een als “gemengd” geïdentificeerd houtrookmoment met hoge roetwaarden boven de 4 µg/cm³. Van links naar rechts: i) roet (BC1 en BC6) en levoglucosan (kanalen 60 en 73), ii) fijnstof (PM_{2.5}), iii) CO, NO, NO₂ en NO_x, iv) UFP.

6.2 Selectie op basis van UFP en roet



Figuur 6.3: Links: UFP vs. ACSM-60. Midden: UFP vs AE33 BC1, gekleurd voor ACSM-60. Rechts: Histogram op uurbasis van UFP concentraties, tevens aangegeven voor geclassificeerde houtrookmomenten (oranje).

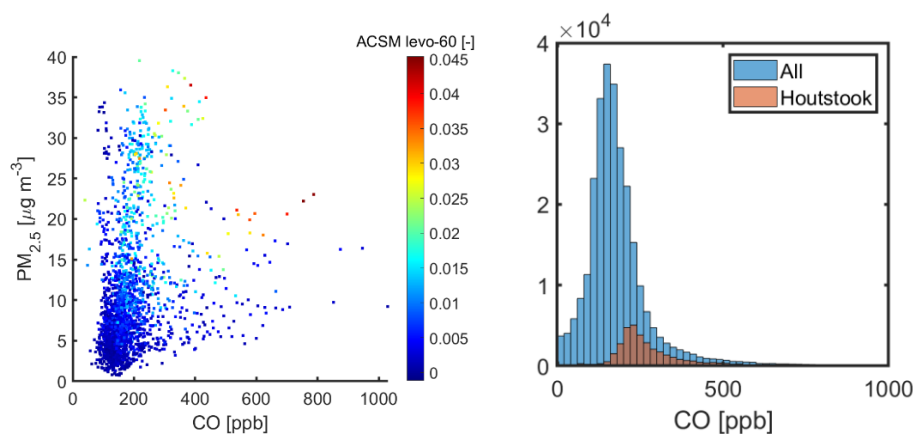
UFP vertoont een duidelijkere relatie met ACSM-60 dan $\text{PM}_{2.5}$ (Figuur 6.3). Er is een duidelijke trend zichtbaar waarbij lagere UFP-concentraties (< 30.000 deeltjes/cm 3) overeenkomen met een sterke toename in ACSM-60 en hoge UFP concentraties veel minder correleren met verhoogde ACSM-60 waarden.

De relatie tussen UFP en roet (midden in Figuur 6.3) laat een vergelijkbare tweedeling zien als $\text{PM}_{2.5}$ versus roet, maar dan met een scherpere scheiding tussen metingen met en zonder levoglucosan. Metingen met verhoogde ACSM-60-waarden en $\text{AE33 BC1} < 2 \mu\text{g/m}^3$ (achtergrond) bevatten vaak ook veel $\text{PM}_{2.5}$, maar komen overeen met relatief lage UFP aantallen (< 10.000 deeltjes/cm 3). Voor $\text{AE33 BC1} > 2 \mu\text{g/m}^3$ (houtrookmomenten) komen alle verhoogde UFP-waarden overeen met verhoogde ACSM-60 waarden.

UFP in combinatie met roet is hiermee dus, net zo goed of misschien wel beter dan $\text{PM}_{2.5}$, geschikt voor de selectie van drempelwaarden voor de aanwezigheid van houtrook. Met een aanvullend criterium voor UFP zou de drempelwaarde voor roet mogelijk verlaagd kunnen worden. Dit biedt perspectief om de selectie van houtrookmomenten verder te verfijnen op basis van UFP-metingen. Een nadeel hierbij is wel dat het meten van UFP met sensoren, in vergelijking met $\text{PM}_{2.5}$, nog in de kinderschoenen staat. Het is niet aannemelijk dat het in de nabije toekomst mogelijk is om low-cost UFP sensoren in een dicht meetnetwerk in te zetten.

Het histogram in Figuur 6.3 toont de verdeling van UFP-waarden over de gehele meetperiode, wat deze bevindingen bevestigt. Buiten de houtrookmomenten worden regelmatig UFP-concentraties boven de 30.000 deeltjes/cm 3 gemeten, op houtrookmomenten niet. Wel is er ook duidelijk een bijdrage van andere bronnen van ultrafijnstof, waarschijnlijk met name wegverkeer [31], in dezelfde UFP meetrange als voor houtrook. De UFP-range alleen is dus geen goed criterium voor houtrookdetectie. De locatie van het meetpunt nabij parkeerplaatsen en wegen verklaart waarschijnlijk deze verhoogde achtergrondwaarden.

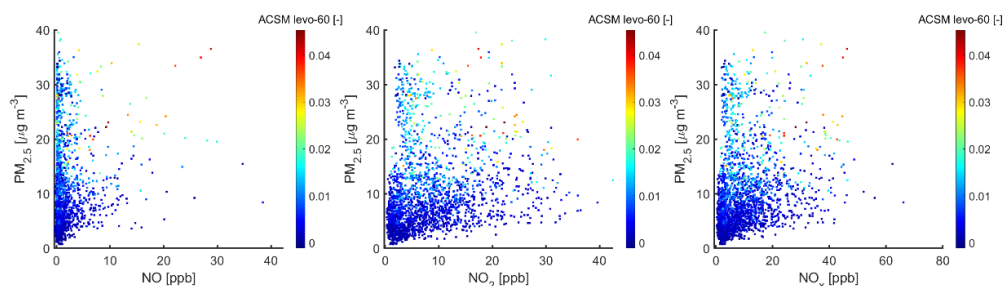
6.3 Drempelwaarden op basis van CO en NO₂



Figuur 6.4: Links: PM_{2.5} vs. CO, gekleurd voor ACSM-60. Rechts: Histogram op uurbasis van CO concentraties, tevens aangegeven voor geïdentificeerde houtrookmomenten (oranje).

Figuur 6.4 laat (links) de relatie zien tussen de gemeten PM_{2.5}-concentraties en de CO-waarden. Tijdens de houtrookmomenten (geïdentificeerd a.d.h.v. ACSM-60) liggen de meeste CO-concentraties rond de 200 ppb, met wat uitschieters naar hogere waarden. Uit de fijnstofrange en de vergelijking met Figuur 4.2 volgt echter dat deze waarden zowel lokale als achtergrond gedomineerde fijnstofmomenten omvatten. Bij hogere CO-concentraties worden zowel houtrookgerelateerde als niet-houtrookgerelateerde metingen waargenomen. Hoewel er op houtrookmomenten dus vaak een zekere correlatie te zien lijkt tussen hogere CO en hogere PM_{2.5} waarden, is deze relatie niet eenduidig genoeg om CO als zelfstandig selectiecriterium voor houtrookmomenten te gebruiken.

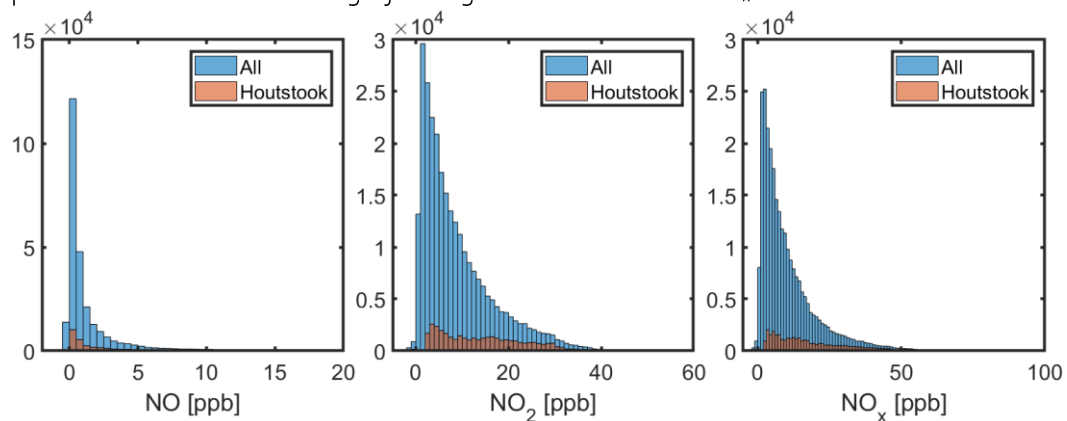
De rechtergrafiek in Figuur 6.4 toont het histogram van de gemeten CO-concentraties. Hieruit blijkt ook duidelijk dat CO tijdens houtrookmomenten gemiddeld verhoogd is. Bij een CO-verhoging boven de 300 ppb is er meestal wel sprake van houtrook. Dit is ook de verwachting, aangezien CO een bekend bijproduct is van onvolledige verbranding, zoals bijvoorbeeld bij houtstook. Toch blijft voorzichtigheid geboden: CO wordt bij dezelfde concentraties ook uitgestoten door andere bronnen, zoals verkeer, waardoor het minder geschikt is als primaire indicator. CO is mogelijk wel waardevol als ondersteunende indicator bij de duiding van houtrookgerelateerde luchtvervuiling.



Figuur 6.5: Van links naar rechts, PM_{2.5} vs. NO, NO₂ en NO_x, gekleurd voor de ACSM-60 waarden.

Hoewel we de trends van NO, NO₂ en NO_x regelmatig mee zien bewegen met die van roet, geeft voor deze stoffen de vergelijking met PM_{2.5} en ACSM-60 (Figuur 6.5) een nog diverser beeld dan voor CO, wat ook deze stoffen niet voor de hand liggend maakt om selectiecriteria aan toe te kennen.

Figuur 6.6 toont de histogrammen voor NO, NO₂ en NO_x (NO en NO₂ bij elkaar opgeteld). Voor NO is zichtbaar dat tijdens houtrookmomenten de NO concentratie soms ook laag is (<3 ppb). Echter momenten met hogere NO waarden (>5 ppb) komen ook voor op houtrookmomenten. Voor NO₂ is duidelijk zichtbaar dat zeer lage waarden (≤2 ppb) niet voorkomen op momenten van houtrook. Wel komen hoge NO₂ concentraties (>20 ppb) ook veel voor op momenten dat er geen houtrook is. NO_x is de optelling van NO en NO₂ en hiervoor is (logischerwijs) ook geen duidelijk patroon in het histogram zichtbaar. Voor zowel NO, NO₂ als NO_x is wegverkeer een bekende, grote bron. Gezien de locatie van de meettrailer op een parkeerplaats, is het goed mogelijk dat de verhoogde NO_x waarden hier vandaan komen. Verder is de verwachting dat de temperaturen die voorkomen bij particuliere houtstook te laag zijn om grote hoeveelheden NO_x te vormen.



Figuur 6.6: Histogram op uurbasis van NO, NO₂ en NO_x concentraties, tevens aangegeven voor geclassificeerde houtrookmomenten (oranje).

6.4 Conclusies hoofdstuk 6

Naast roet en levoglucosan zijn ook CO, NO₂ en UFP onderzocht als aanvullende indicatoren voor houtrook. UFP blijkt het meest veelbelovend. In het UFP-roet diagram werkt ACSM-60 sterk selecterend, waarmee ook op basis van UFP en roet goed onderscheid gemaakt kan worden tussen lokale houtrookmomenten (hoge UFP en AE33 BC1 > 2 µg/m³) en achtergrondpieken (lage UFP en AE33 BC1 > 2 µg/m³). Daarmee biedt UFP perspectief voor verfijning van of een alternatieve selectiemethode, mits gecombineerd met roet of ACSM-60.

CO en NO₂ laten tijdens houtrookmomenten vaak verhoogde waarden zien, maar worden ook beïnvloed door o.a. verkeer. Ze zijn minder geschikt als primaire indicator, want te weinig onderscheidend, maar kunnen wel ondersteunend zijn bij de interpretatie van complexe situaties.

7 Conclusies en vervolg

De houtrookpilot in Heemskerk (2023–2024) heeft aangetoond dat het mogelijk is om met een combinatie van fijnstof- en roetmetingen, ondersteund door levoglucosan analyses, houtrookmomenten goed te identificeren en de verspreiding over wijken in kaart te brengen. De nieuwe meetaanpak maakt het mogelijk om onderscheid te maken tussen houtrook en andere bronnen van fijnstof en tussen lokale bronnen en overwaaiend fijnstof.

De studie biedt perspectief om in de toekomst de methode toe te passen met gebruik van, veel goedkopere, fijnstof- en roetsensoren en laat zien welke eventuele andere stoffen uitzicht bieden om de betrouwbaarheid verder te vergroten en in welke ranges deze stoffen aanwezig zijn tijdens houtrookmomenten. Dit biedt gemeenten een krachtig instrument om gericht en onderbouwd beleid te ontwerpen, inwoners inzicht te geven op de eigen inbreng in de luchtkwaliteit en eventuele handhaving met gegevens te ondersteunen.

Snelle levoglucosanmetingen maken onderscheid op korte tijdschaal mogelijk

De inzet van de ACSM voor het meten van levoglucosan met een tijdsresolutie van 10 minuten heeft bewezen effectief te zijn. Deze metingen maken het mogelijk om kortdurende houtrookpieken te onderscheiden van andere bronnen van fijnstof en zodoende houtrook “telbaar” te maken, waar voorheen alleen naar variaties op een langere tijdschaal gekeken kon worden. Kanaal ACSM-60 lijkt goed geschikt als marker voor levoglucosan in de detectie van houtrook, als aanvulling op criteria uit het PM_{2.5}-roetdiagram.

Houtrookmomenten goed te identificeren via drempelwaarden

Op basis van roet- en fijnstofmetingen zijn drempelwaarden vastgesteld (AE33 BC1 > 2 µg/m³ en PM_{2.5} > 5 µg/m³) waarmee houtrookmomenten betrouwbaar kunnen worden geselecteerd. Door deze drempels te combineren met een verfijnde selectie van de “schouders” van pieken (BC1 > 1 µg/m³) kon de volledige duur van houtrookmomenten beter worden vastgelegd. In totaal zijn 39 houtrookmomenten geïdentificeerd²⁶, goed voor 598 uur aan blootstelling, waaruit verdere kengetallen konden worden afgeleid. Houtrook komt typisch voor bij lage windsnelheden, koude omstandigheden en met een verhouding van PM_{2.5}/roet > 9.

Verspreiding zichtbaar via fijnstofsensoren

De verspreiding van houtrook over de IJmondgemeenten kon goed gevolgd worden met behulp van het Hollandse Luchten-netwerk van fijnstofsensoren.

Op basis van de meetdata zijn drie typen houtrookmomenten te onderscheiden:

- Lokale houtrookmomenten met duidelijke ruimtelijke variatie
- Gemengde houtrookmomenten, met slechts een deel van de tijd ruimtelijke variatie.
- Door achtergrond gedomineerde houtrookmomenten, zonder ruimtelijke variatie.

²⁶ 41 houtrookmomenten als ook het vuurkorfexperiment en het vuurwerk met Oud&Nieuw worden meegerekend.

Deze classificatie is belangrijk om de resultaten goed te duiden. Fijnstofpieken met waarden boven de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zijn doorgaans niet uitsluitend toe te kennen aan houtrook (op enkele korte uitschieters na).

UFP, CO en NO_2 als aanvullende indicatoren

Naast roet, fijnstof en ACSM-60, komen trends in CO en NO_2 vaak overeen met houtrook, maar vaak ook niet. Dit maakt deze stoffen niet geschikt als indicatoren voor houtrook. De UFP concentratie zou mogelijk, in combinatie met roet, gebruikt kunnen worden als aanvullend selectie criterium voor houtrookmomenten (als bovengrens), maar UFP-sensoren zijn nog prijzig.

7.1 Vervolg

In het stookseizoen van november 2024 tot maart 2025 is het centrale meetpunt opnieuw ingezet in Heemskerk om de meetmethodiek verder te verfijnen en de betrouwbaarheid van de gebruikte sensoren te verbeteren. Een belangrijk doel was het operationeel krijgen van meerdere roetsensorkastjes. Ook tijdens de vervolgcampagne functioneerde slechts één roetsensorkastje langdurig stabiel, waardoor nu de komende periode wordt ingezet op het verbeteren van het ontwerp van de TNO-roetsensor of het vinden van een goed alternatief. Het ontwerp zal in het vierde kwartaal van 2025 worden geëvalueerd op kosten versus functionaliteit, met het oog op bredere inzetbaarheid in gemeentelijke meetnetwerken.

Begin 2026 zal het nieuwe ontwerp, mits werkend, in de praktijk getest worden. Deze test zal, ter vergelijking, hoogstwaarschijnlijk weer in de IJmond plaatsvinden. Bij succes zal er ook gekeken worden naar commercialisatie van het prototype.

Behalve het werk aan de roetsensor, zullen een aantal analyses nog volgen in een aanvulling op dit rapport. Om de bruikbaarheid van ACSM-60 als marker voor levoglucosan te bevestigen, zullen nog een groot aantal filters uit beide campagnes worden geanalyseerd in het laboratorium. Deze filtermetingen dienen als referentie om de betrouwbaarheid van de ACSM-metingen te beoordelen. Daarnaast zal ook de data van de vervolgcampagne uitgewerkt worden met behulp van de in dit rapport beschreven methode.

In de vervolgcampagne is een ander soort “vaporizer” van de ACSM getest om het instrument gevoeliger te maken voor levoglucosan. Deze analyse moet nog worden afgerond.

Naast de TNO-sensoren zijn in de nieuwe campagne ook een commerciële roetsensor en SPARKS-sensoren van het RIVM op het centrale meetpunt geplaatst. Deze parallelle inzet maakt het mogelijk om verschillende roetsensortechnologieën onder gelijke omstandigheden te vergelijken en te beoordelen op meetkwaliteit, robuustheid en kostenefficiëntie.

De methode voor het selecteren van houtrookmomenten zal in de toekomst nog verder worden uitgedaagd. Naast de bestaande drempelwaarden voor roet en fijnstof zal ook worden gekeken naar de verhouding tussen roet en $\text{PM}_{2.5}$ als (aanvullend) criterium. Deze gecombineerde benadering biedt zicht op een nog robuustere selectiemethode.

Het staat in de planning om de methode ook in andere regio's in Nederland toe te passen, om te zien of dit een groot effect heeft op de gevonden waarden en om een fijnmaziger beeld te krijgen van de bijdrage van houtrook aan de luchtvervuiling in Nederland. Gemeenten die nu al een houtrookbeleid voeren (bijvoorbeeld gebaseerd op de stookwijzer) kunnen met het gebruik van deze methode mogelijk beter bijsturen.

8 Dankwoord

Deze houtrookpilot is tot stand gekomen dankzij de inzet, samenwerking met en betrokkenheid van vele partijen. Wij willen in het bijzonder de volgende organisaties en personen bedanken voor hun waardevolle bijdragen:

- **RIVM**, voor het delen van de meetdata van de fijnstofsensoren in de IJmond en de ondersteuning bij de verwerking en interpretatie van deze gegevens.
- **Waag Future Lab en Omgevingsdienst IJmond**, voor hun cruciale rol in het organiseren van bijeenkomsten met het burgermeetnetwerk Hollandse Luchten, het faciliteren van lokale betrokkenheid en het beheer van de fijnstofsensoren in het veld.
- **GGD Amsterdam**, voor het beschikbaar stellen van de PM_{2.5}-concentraties gemeten aan het LML-station in De Rijp, waarmee een belangrijke referentie voor achtergrondmetingen werd geboden.
- **De politie Heemskerk**, voor het beschikbaar stellen van hun parkeerplaats voor de meettrailer. Hierbij gaat in het bijzonder onze dank uit naar Peter Olgers voor alle ondersteuning ter plaatse.
- **Gerard van Zelst**, voor zijn waardevolle hulp bij de verwerking van de data van de fijnstofsensoren en het plaatsen van twee sensoren op het centrale meetpunt.

Daarnaast gaat onze dank ook uit naar alle andere bewoners en deelnemers van het Hollandse Luchten-netwerk die hun tijd, ruimte en enthousiasme beschikbaar hebben gesteld voor het plaatsen van sensoren en het delen van inzichten. Zonder hun actieve bijdrage was deze pilot niet mogelijk geweest.

Tot slot bedanken we alle collega's en partners die met hun expertise, technische ondersteuning en kritische blik hebben bijgedragen aan de uitvoering en verdieping van dit onderzoek.

TNO Energy & Materials Transition, Petten, 25 september 2025

Valid Signed by Marieke van Milligen-Versluis
on 2025-09-25 10:21:46

Marieke van Milligen
Research Manager EMSA

Valid Signed by Paula Bronsveld
on 2025-09-25 11:27:39

Paula Bronsveld
auteur

9 Referenties

- [1] Naeher, L. P., Brauer, M., Lipsett, M., Zelikoff, J. T., Simpson, C. D., Koenig, J. Q., & Smith, K. R. (2007). *Woodsmoke health effects: A review*. Inhalation Toxicology, 19 (1), 67–106. <https://doi.org/10.1080/08958370600985875>
- [2] <https://www.emissieregistratie.nl/onderwerpen/condenseerbaar-fijnstof>
- [3] Plomp, A., Hensen, A., van den Bulk, P., Frumau, A., & Blom, M. (2020). *Houtrook uit particuliere kachels: zoektocht naar indicatoren en verkenning van mogelijkheden voor reductie van overlast* (TNO-rapport 2020 R11767A). <https://publications.tno.nl/publication/34636614/KNBiKp/TNO-2020-R11767A.pdf>
- [4] De Wild, P., Reith, H., & Heeres, E. (2011). *Biomass pyrolysis for chemicals*. Biofuels, 2(2), 185–208. ECN-W--11-020. Petten: Energy research Centre of the Netherlands(ECN). <https://publications.tno.nl/publication/34633488/N91S3R/w11020.pdf>
- [5] Weimer, S., Alfara, M. R., Schreiber, D., Mohr, M., Prévôt, A. S. H., & Baltensperger, U. (2008). Organic aerosol mass spectral signatures from wood-burning emissions: Influence of burning conditions and wood type. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D10), D10304. <https://doi.org/10.1029/2007JD009309>
- [6] Simoneit, B. R. T., Schauer, J. J., Nolte, C. G., Oros, D. R., Elias, V. O., Fraser, M. P., ... & Cass, G. R. (1999). *Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles*. Atmospheric Environment, 33(2), 173–182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00145-9)
- [7] Bhattarai, H., Saikawa, E., Wan, X., Zhu, H., Ram, K., Gao, S., ... & Cong, Z. (2019). *Levoglucosan as a tracer of biomass burning: Recent progress and perspectives*. Atmospheric Research, 220, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.004>
- [8] Lim, H., Silvergren, S., Spinicci, S., Rad, F. M., Nilsson, U., Westerholm, R., & Johansson, C. (2022). *Contribution of wood burning to exposures of PAHs and oxy-PAHs in Eastern Sweden*. Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 11359–11379. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11359-2022>
- [9] Hu, Q.-H., Xie, Z.-Q., Wang, X.-M., Kang, H., & Zhang, P. (2013). *Levoglucosan indicates high levels of biomass burning aerosols over oceans from the Arctic to Antarctic*. Scientific Reports, 3, Article 3119. <https://doi.org/10.1038/srep03119>
- [10] Dindal, A. (2014). *Magee Scientific Model AE33 Aethalometer* (EPA/600/R-15/011). U.S. Environmental Protection Agency. [https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=307997&fed_org_id=111\[1\]\(https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=307997&fed_org_id=111\)](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=307997&fed_org_id=111[1](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=307997&fed_org_id=111))
- [11] Zotter, P., Herich, H., Gysel, M., El-Haddad, I., Zhang, Y., Močnik, G., ... & Prévôt, A. S. H. (2017). *Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and wood burning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol*. Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 4229–4249. <https://doi.org/10.5194/acp-17-4229-2017>
- [12] Sandradewi, J., Prévôt, A. S. H., Szidat, S., Perron, N., Alfara, M. R., Lanz, V. A., ... & Baltensperger, U. (2008). *Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter*. Environmental Science & Technology, 42(9), 3316–3323. <https://doi.org/10.1021/es702253m>
- [13] Özdemir, E., van den Elshout, S., & Holland, F. (2023). *Automatische houtrookmonitoring: Onderzoek met de AE33-monitor*. DCMR Milieudienst Rijnmond.

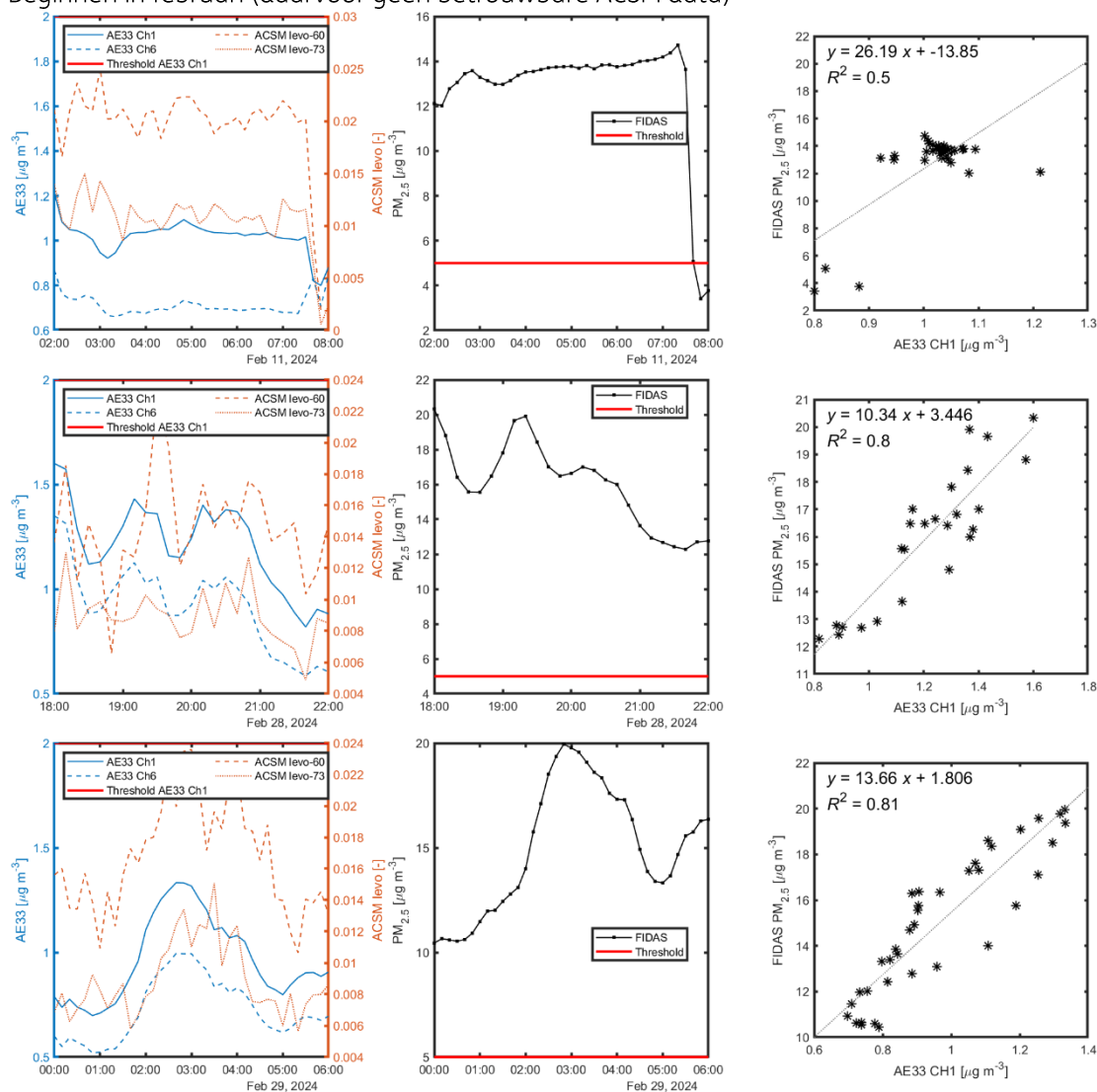
- <https://www.dcmr.nl/sites/default/files/2024-08/Houtrookmonitoring.pdf>
- [14] VITO. (2018). *Inschatting van de bijdrage van houtverbranding door burgers aan luchtverontreiniging in Vlaanderen*. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. https://emis.vito.be/sites/emis/files/articles/3331/2018/WoodCombustion_FINAL-REPORT_16jan2018_NL_TW.pdf
 - [15] NILU & Aarhus University. (2025). *Potential for reducing the health burden of air pollution from residential wood combustion in the Nordic countries*. Nordic Council of Ministers. <https://pub.norden.org/nord2025-017>
 - [16] Piot, C., Jaffrezo, J.-L., Cozic, J., Pissot, N., El Haddad, I., Marchand, N., & Besombes, J.-L. (2012). *Quantification of levoglucosan and its isomers by high performance liquid chromatography–electrospray ionization tandem mass spectrometry and its applications to atmospheric and soil samples*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(1), 141–148. <https://doi.org/10.5194/amt-5-141-2012>
 - [17] Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), TNO, Universiteit Utrecht (IRAS), & GGD Amsterdam. (2022). *Samenwerking Houtrookonderzoek: Samenvatting van de onderzoeksresultaten*. RIVM. <https://www.rivm.nl/documenten/samenvatting-samenwerking-houtrookonderzoek>
 - [18] Chow, J. C., Lowenthal, D. H., Chen, L.-W. A., Wang, X., & Watson, J. G. (2015). *Mass reconstruction methods for PM_{2.5}: A review*. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(3), 243–263. <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0338-3>
 - [19] [Hollandse Luchten | Sodaq AIR](#)
 - [20] [Hollandse Luchten | Kaart](#)
 - [21] [Samen Meten | Samen meten](#)
 - [22] Ng, N. L., Herndon, S. C., Trimborn, A., Canagaratna, M. R., Croteau, P. L., Onasch, T. B., Sueper, D., Worsnop, D. R., Zhang, Q., Sun, Y. L., & Jayne, J. T. (2011). *An Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) for routine monitoring of the composition and mass concentrations of ambient aerosol*. *Aerosol Science and Technology*, 45(7), 780–794. <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.560211>
 - [23] TNO. (2018). *CAIREBoxmetingen fijnstof en stikstofdioxide in Sliedrecht* (TNO-rapport R11144). Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek. Geraadpleegd van <https://publications.tno.nl/publication/34627229/reGoPw/TNO-2018-R11144.pdf>
 - [24] Zhang, J., Li, K., Wang, T., Gammelsæter, E., Cheung, R. K. Y., Surdu, M., Bogler, S., Bhattu, D., Wang, D. S., Cui, T., Qi, L., Lamkaddam, H., El Haddad, I., Slowik, J. G., Prevot, A. S. H., & Bell, D. M. (2023). *Bulk and molecular-level composition of primary organic aerosol from wood, straw, cow dung, and plastic burning*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 14561–14576. <https://doi.org/10.5194/acp-23-14561-2023>
 - [25] Alfarra, M. R., Prévôt, A. S. H., Szidat, S., Sandradewi, J., Weimer, S., Lanz, V. A., Schreiber, D., Mohr, M., & Baltensperger, U. (2007). *Identification of the mass spectral signature of organic aerosols from wood burning emissions*. *Environmental Science & Technology*, 41(16), 5770–5777. <https://doi.org/10.1021/es062289b>
 - [26] Mendoza, D. L., Hill, L. D., Blair, J., & Crosman, E. T. (2024). *A long-term comparison between the AethLabs MA350 and Aerosol Magee Scientific AE33 black carbon monitors in the Greater Salt Lake City Metropolitan Area*. *Sensors*, 24 (3), 965. <https://doi.org/10.3390/s24030965>
 - [27] Liu, D., Mishchenko, M. I., Mackowski, D. W., & Cairns, B. (2018). *Spectral dependence of aerosol single-scattering albedo and implications for aerosol remote sensing*. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 217, 158–171. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.05.023>

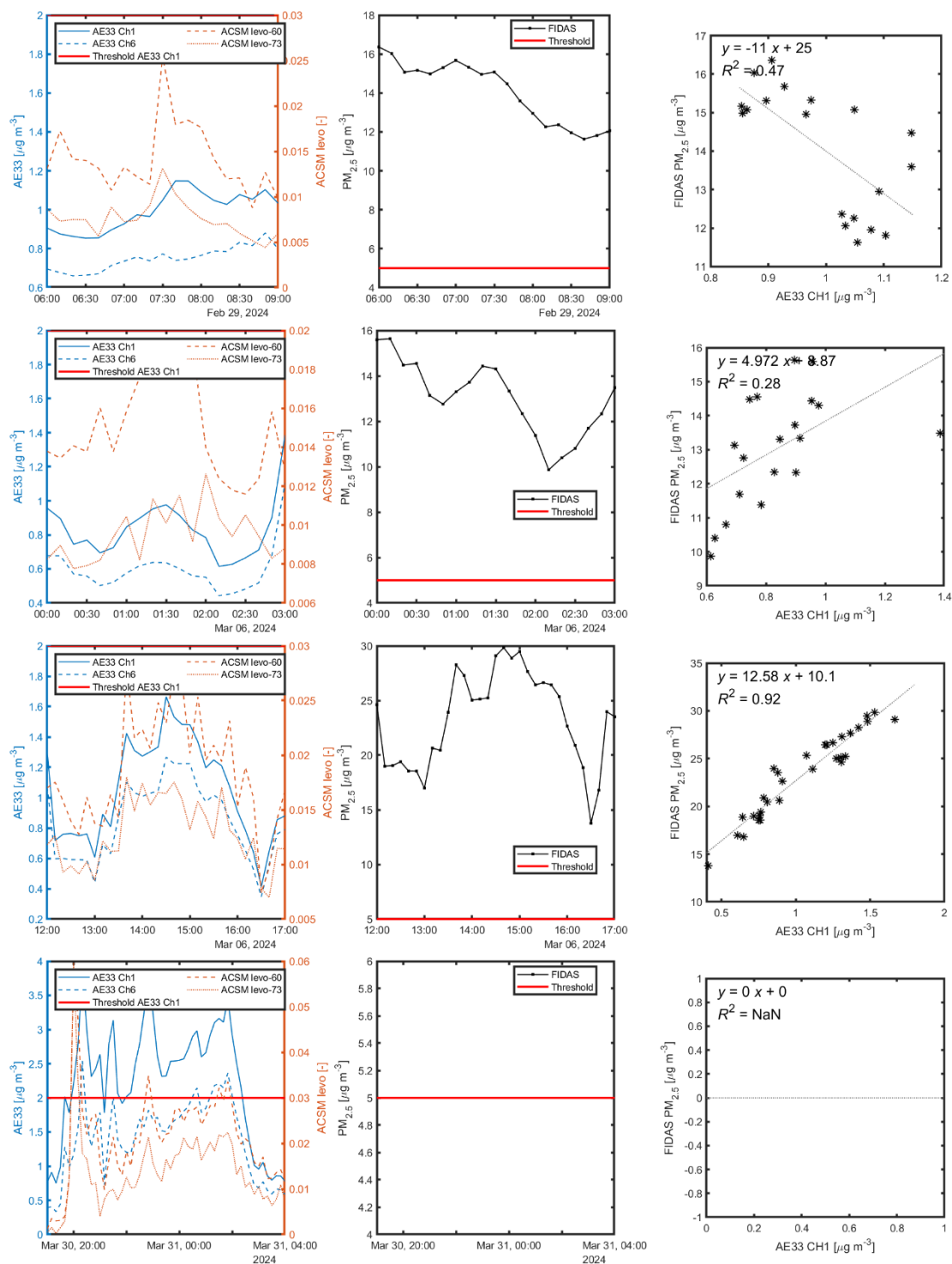
- [28] Andreae, M. O., & Gelencsér, A. (2006). *Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols*. Atmospheric Chemistry and Physics, 6 (10), 3131–3148.
- [29] Allen, G., & Rector, L. (2020). *Characterization of residential woodsmoke PM_{2.5} in the Adirondacks of New York*. Aerosol and Air Quality Research, 20 (11), 2419–2432. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.01.0005> (and references therein).
- [30] Giannoni, M., & Zangrando, R. (2012). *The use of levoglucosan for tracing biomass burning in PM_{2.5} samples in Tuscany (Italy)*. Environmental Pollution, 167, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.03.016>
- [31] Weijers, E. P., & Vonk, J. (2020). *Verkennde metingen aan ultrafijn stof in het IJmondgebied* (RIVM-rapport 2020-0095). Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2020-0095.pdf>

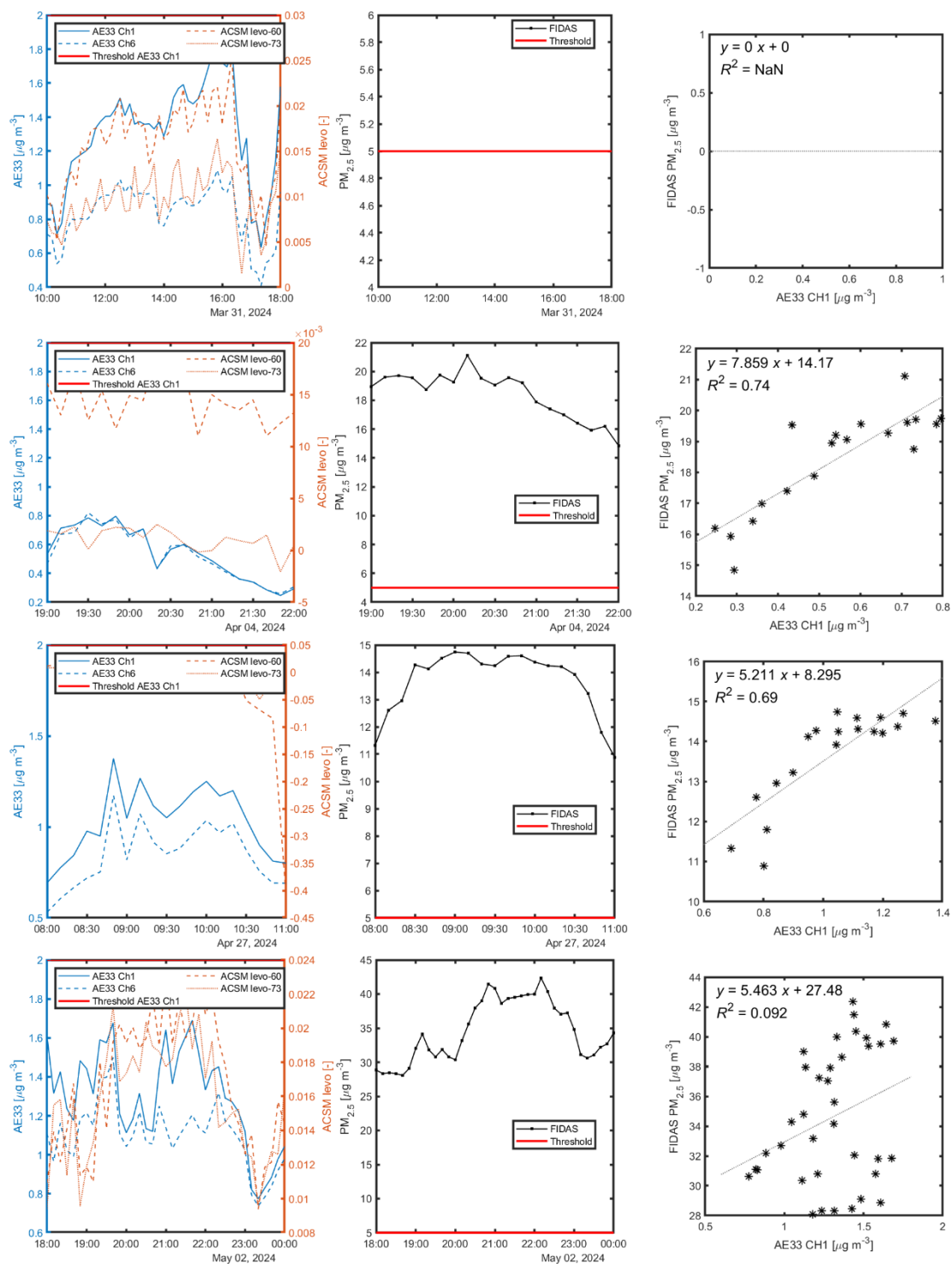
Bijlage A

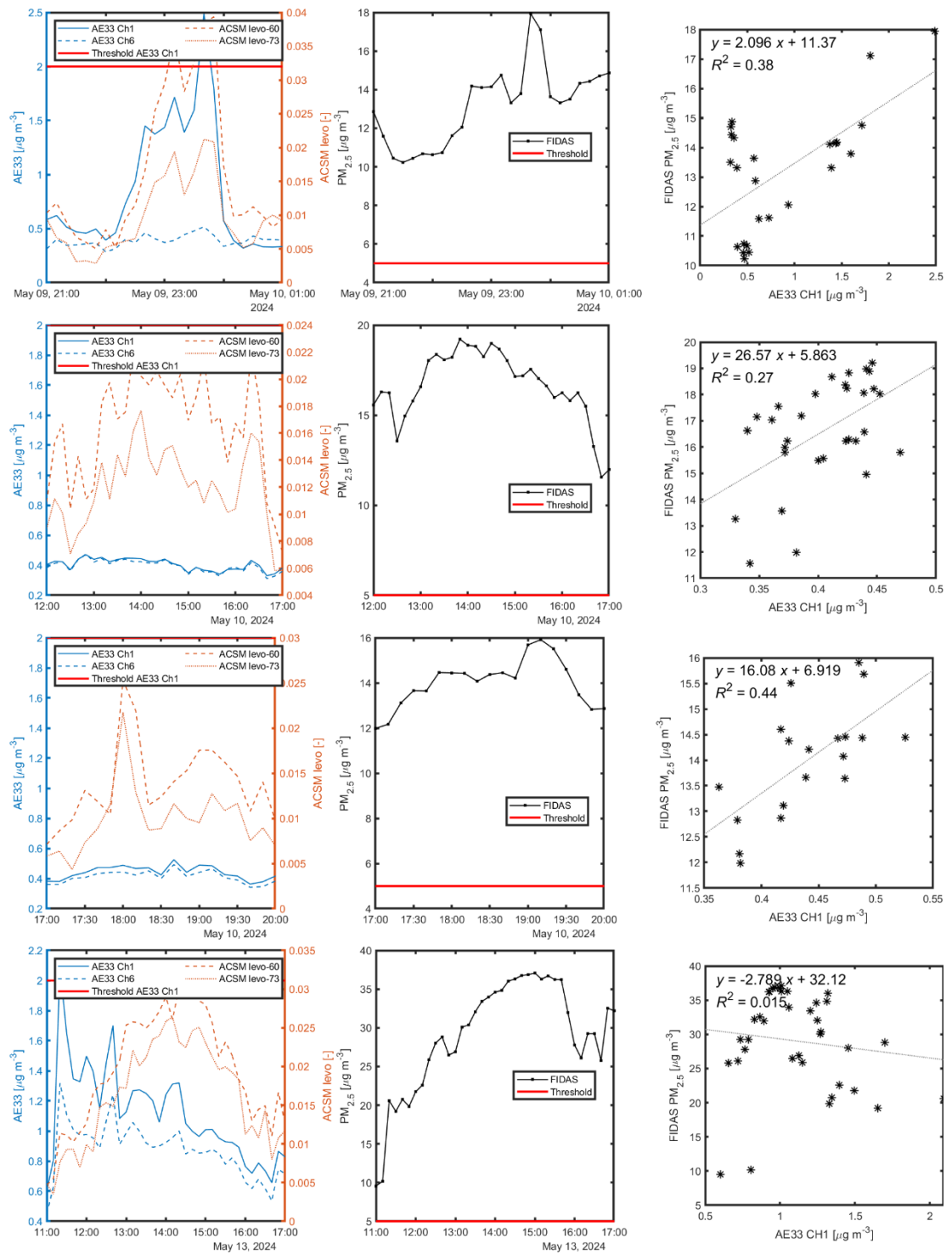
Potentiele houtrookmomenten (false negatives ACSM > 0.015)

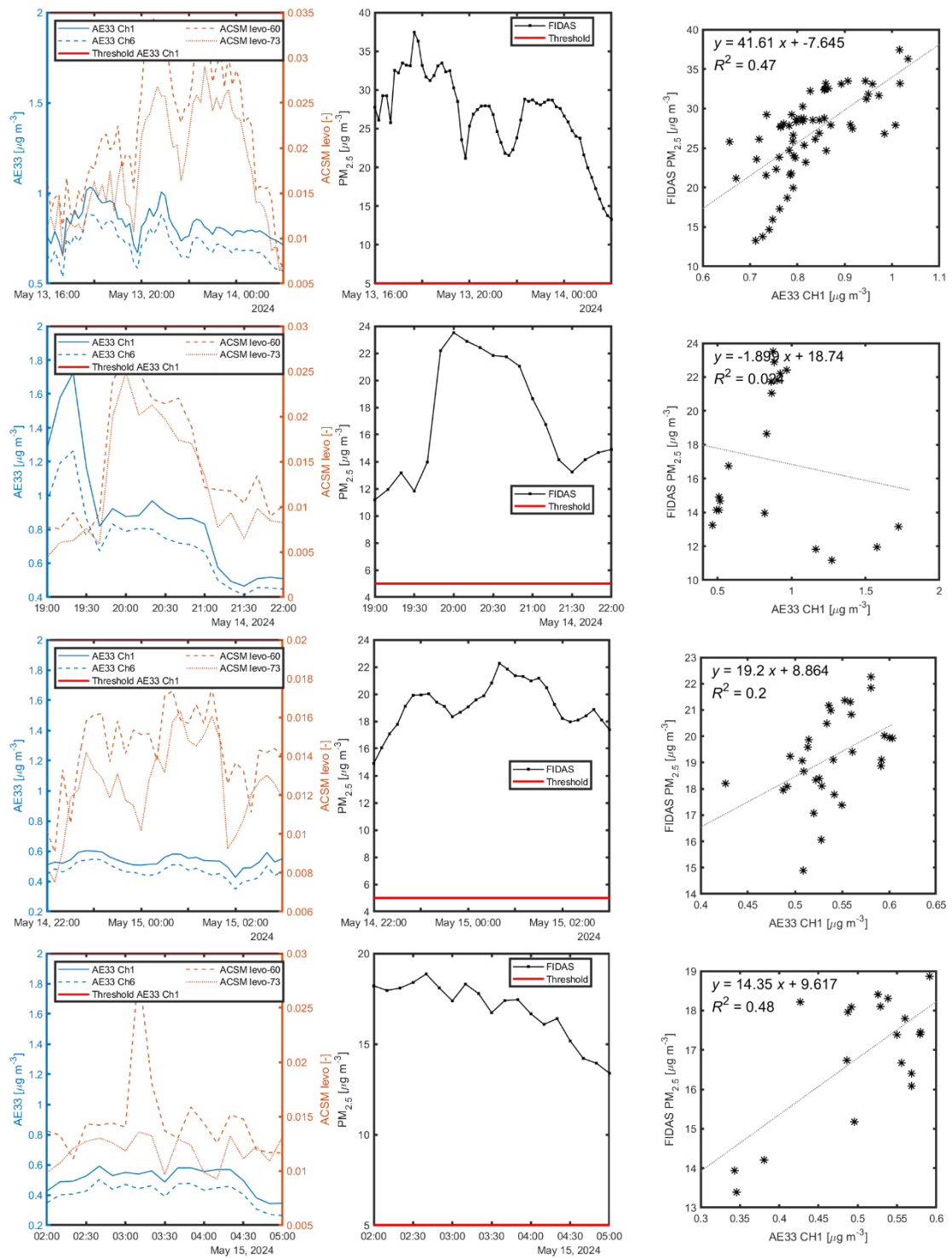
Beginnen in februari (daarvoor geen betrouwbare ACSM data)

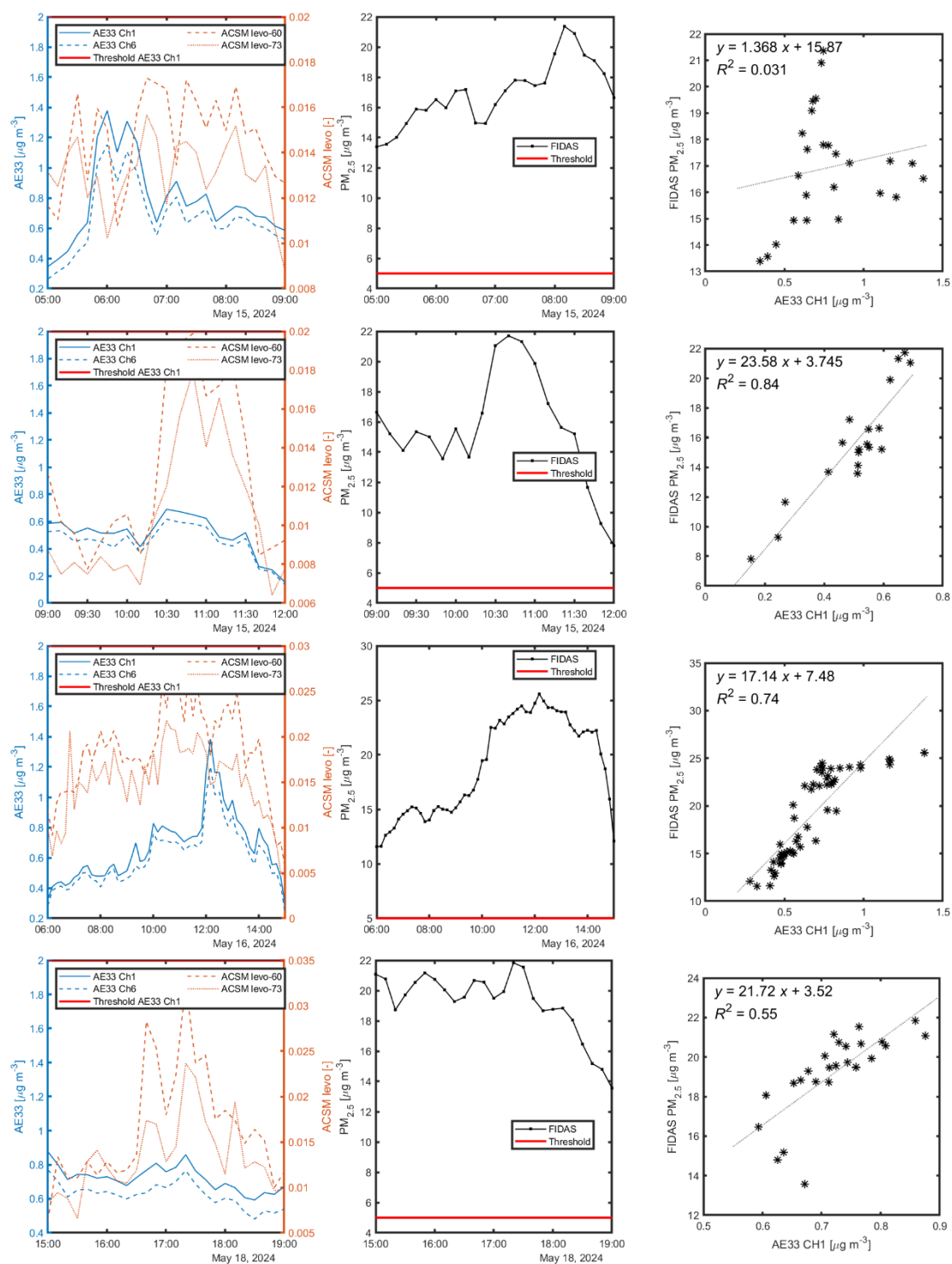












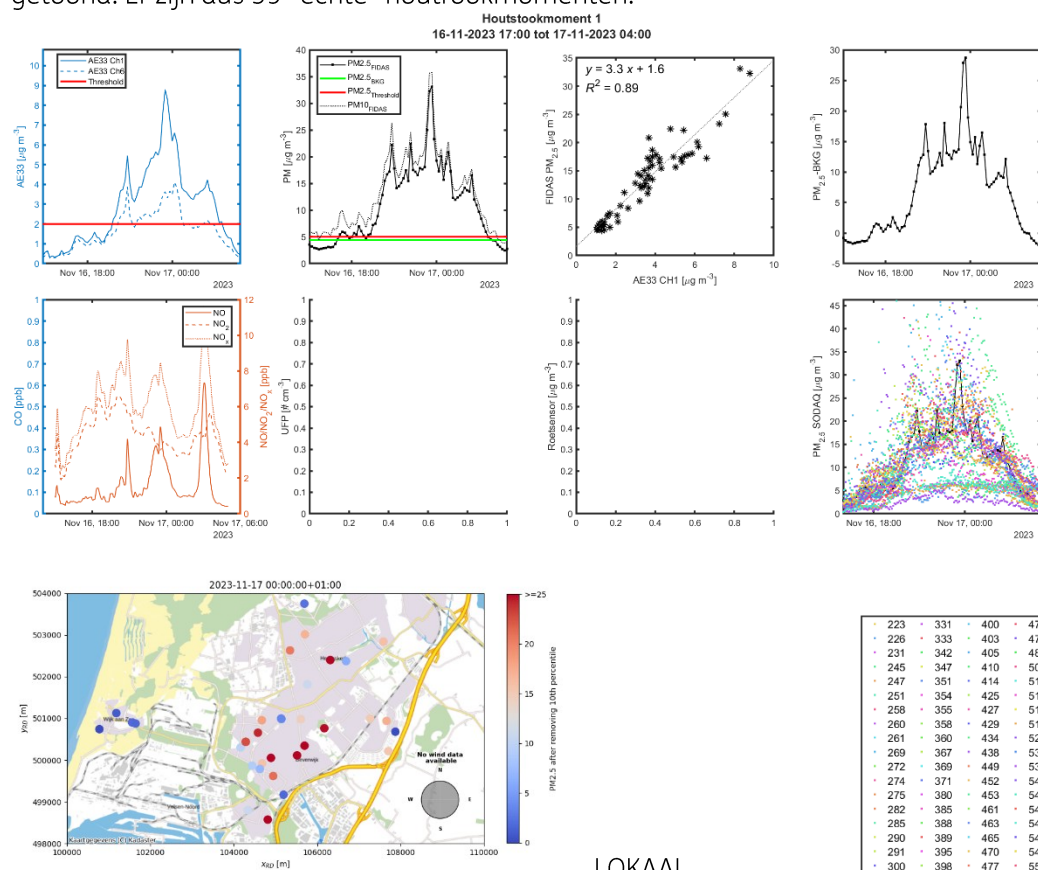
Bijlage B

Geselecteerde houtrookmomenten

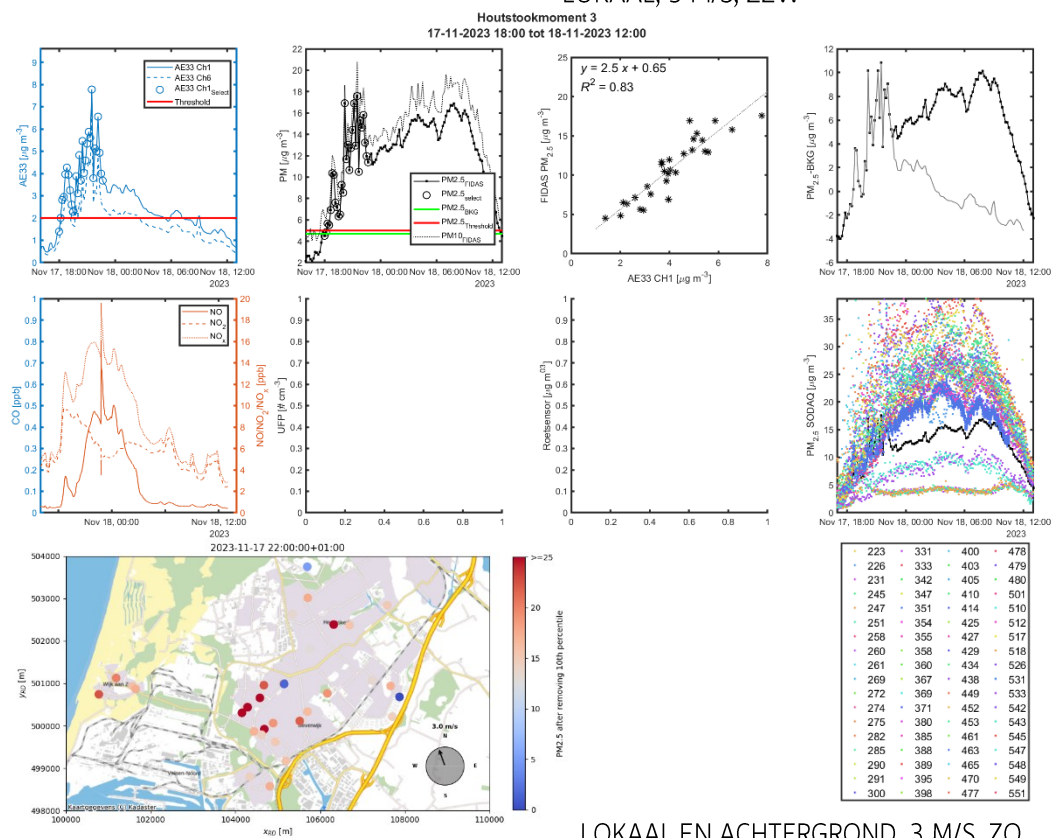
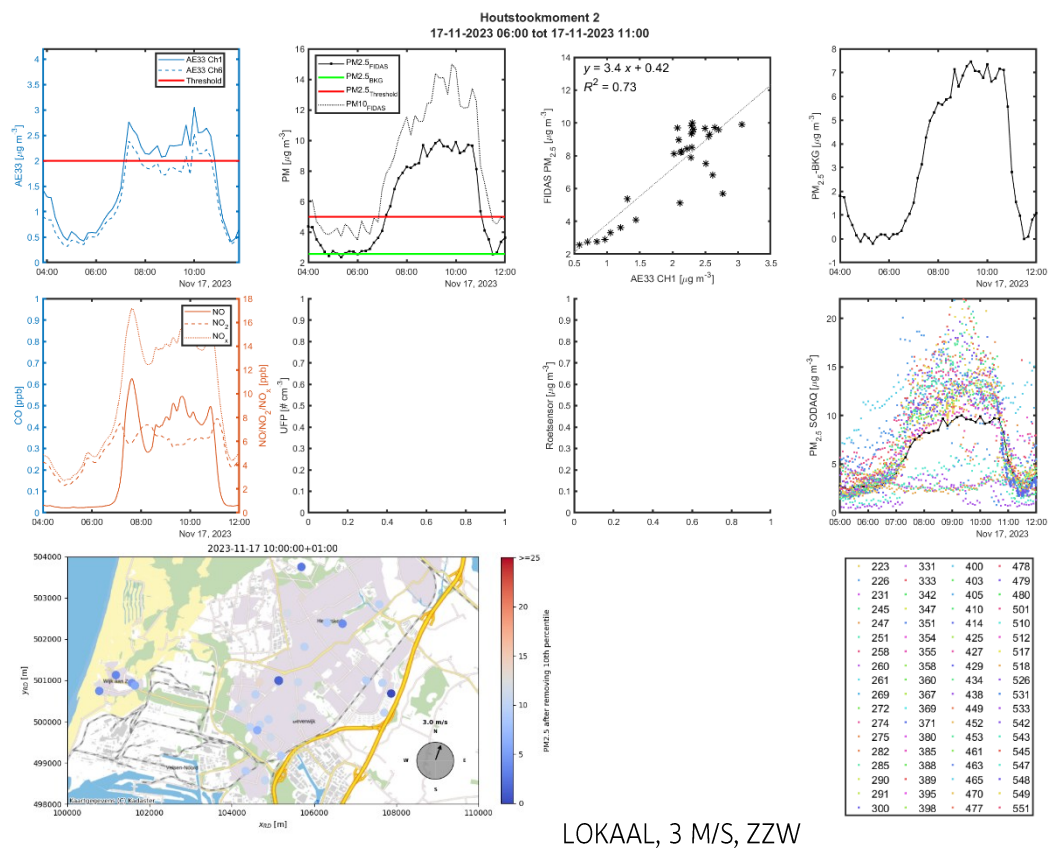
Hieronder volgt voor alle 41 (aanvankelijk) geselecteerde houtrookmomenten de data van alle gemeten stoffen. De teksten zijn een kwalitatieve inschatting van het type houtrookmoment, die toch vaak moeilijk te maken blijkt. De beste indicator voor lokale houtrook als dominante bron lijkt een spreiding in de fijnstofsensorwaarden te zijn.

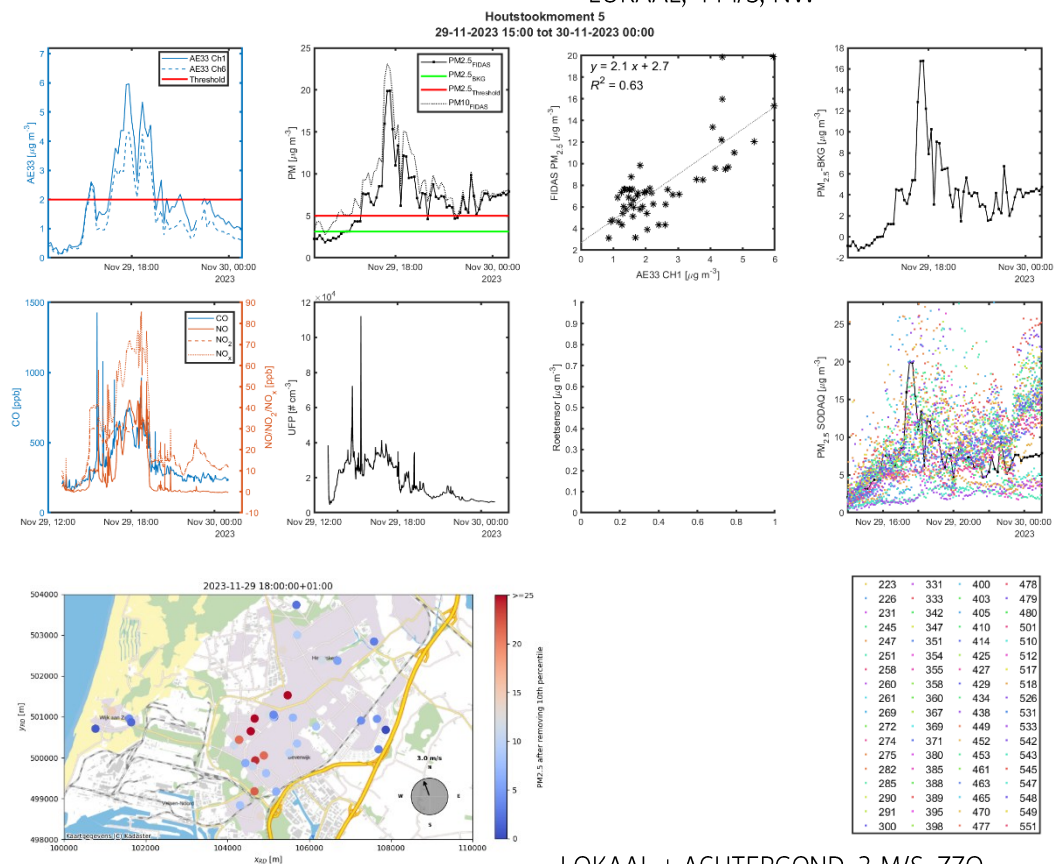
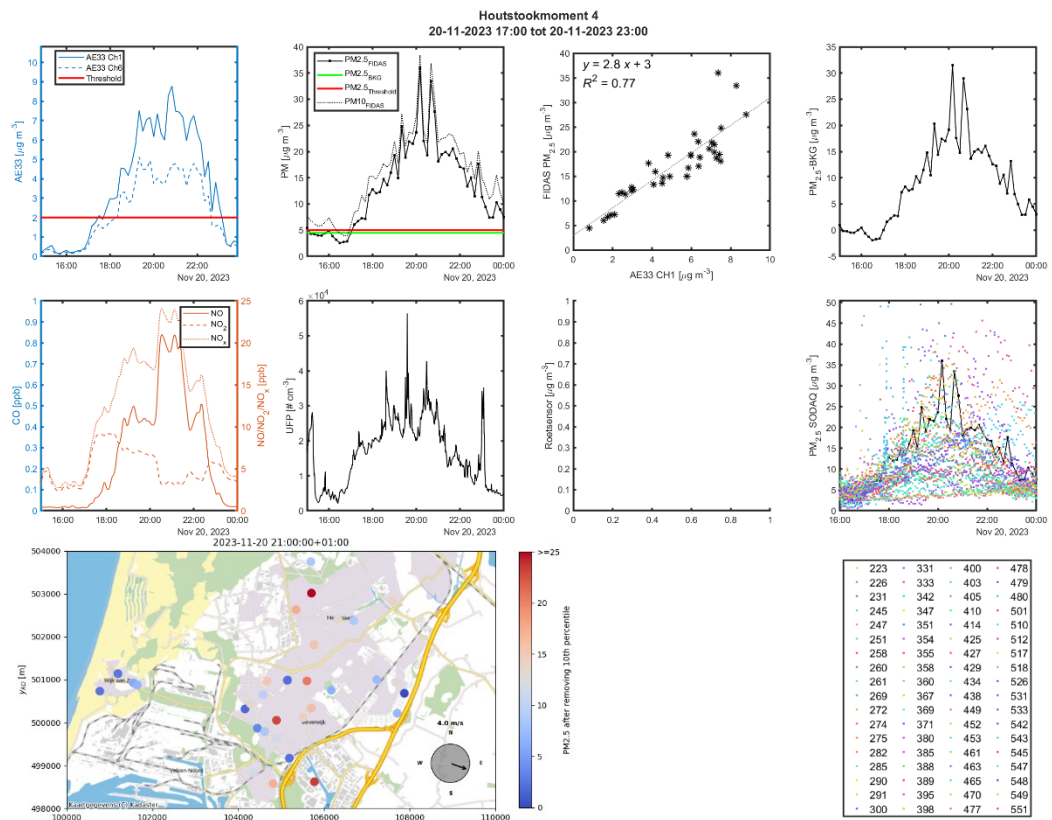
Het kaartje betreft alleen het moment waarop $PM_{2.5}$ maximaal is. De hoogste waarden worden vaak gevonden bij fijnstof uit de achtergrond, dit kan daarom een vertekend beeld geven. Voor een beter beeld van de spreiding is het beter de volledige filmpjes van de sensordata te bekijken, welke op aanvraag ter beschikking zijn.

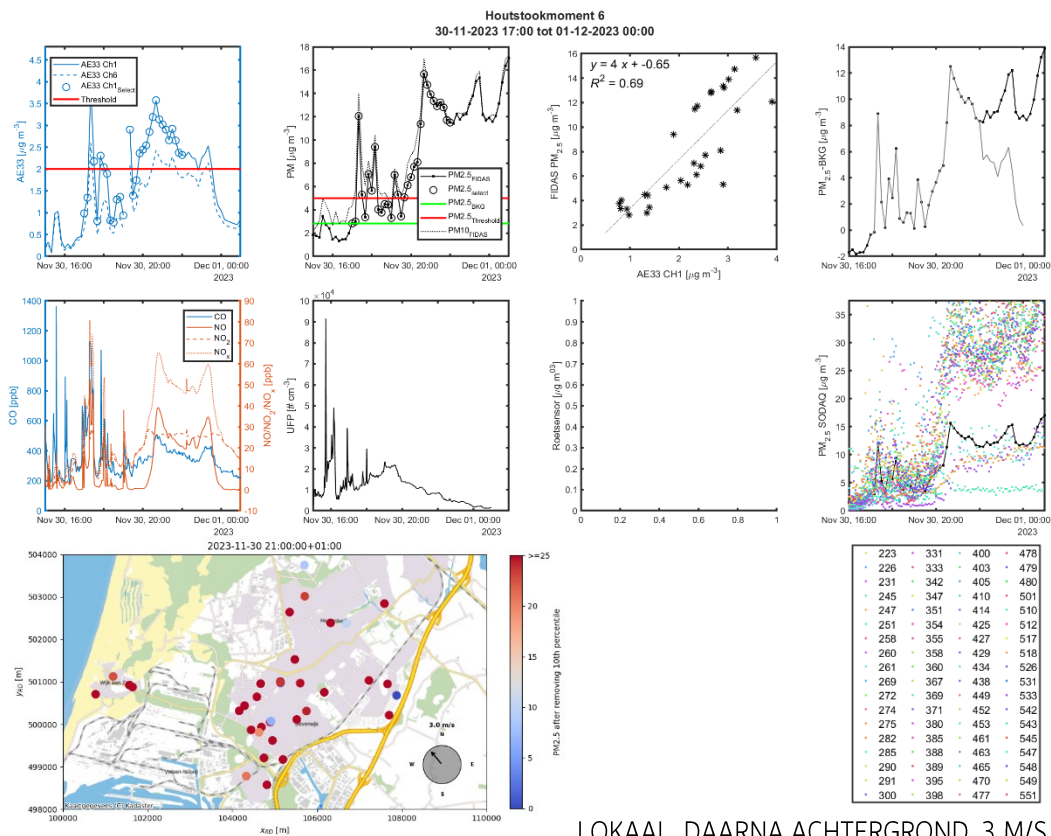
Twee momenten uit deze lijst zijn niet meegenomen bij de analyse van de kengetallen in hoofdstuk 4: vuurwerk op 1 januari (moment 17) en het vuurkorf experiment op 18 januari (moment 22). Omdat deze wel door het algoritme gevonden worden, zijn ze hier toch getoond. Er zijn dus 39 “echte” houtrookmomenten.



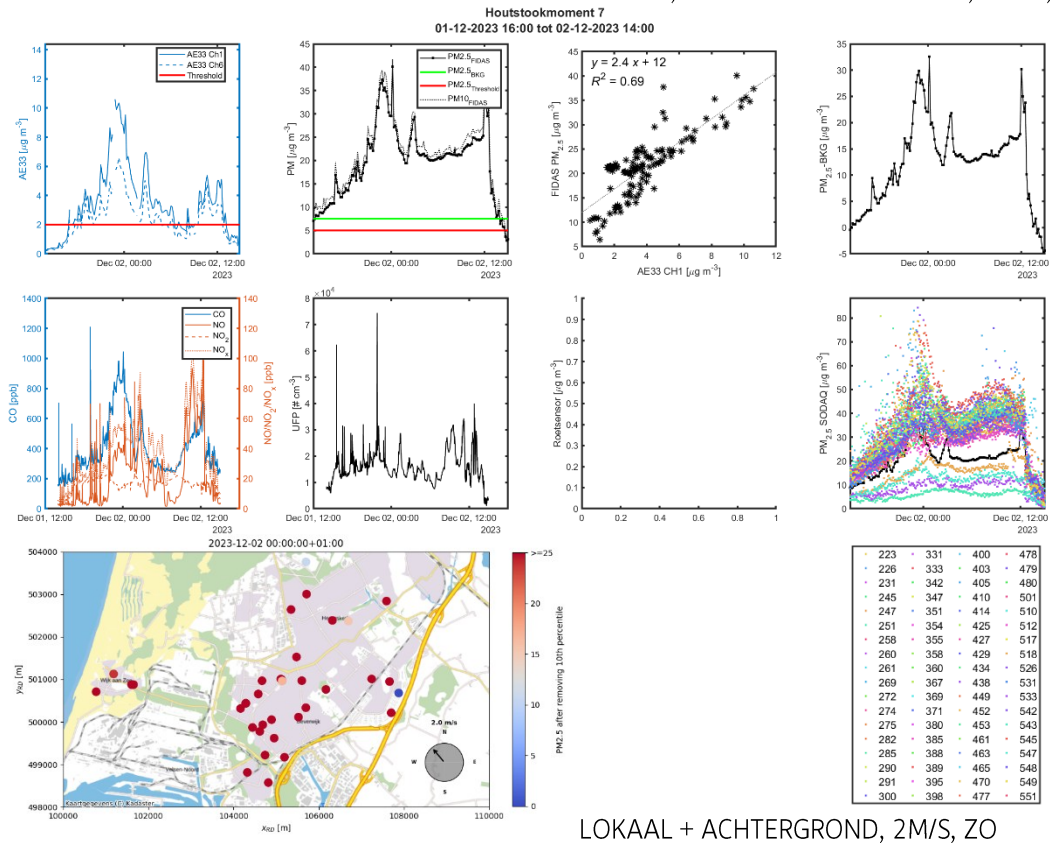
LOKAAL



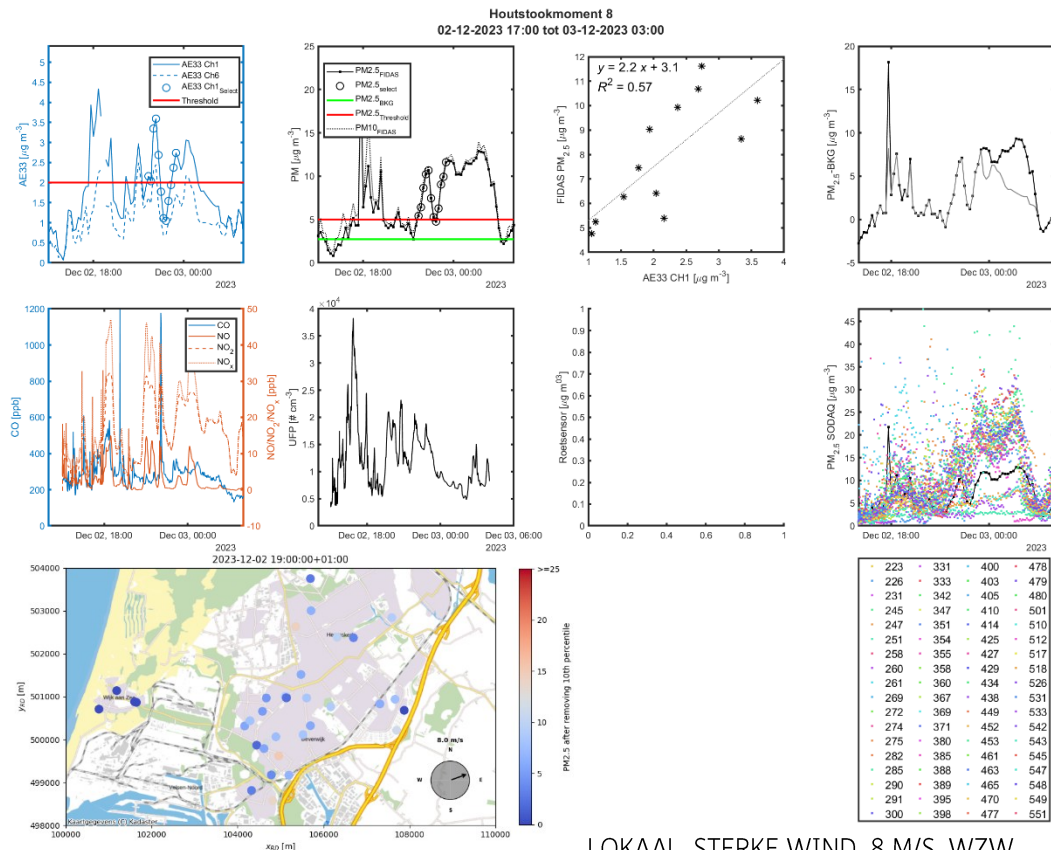




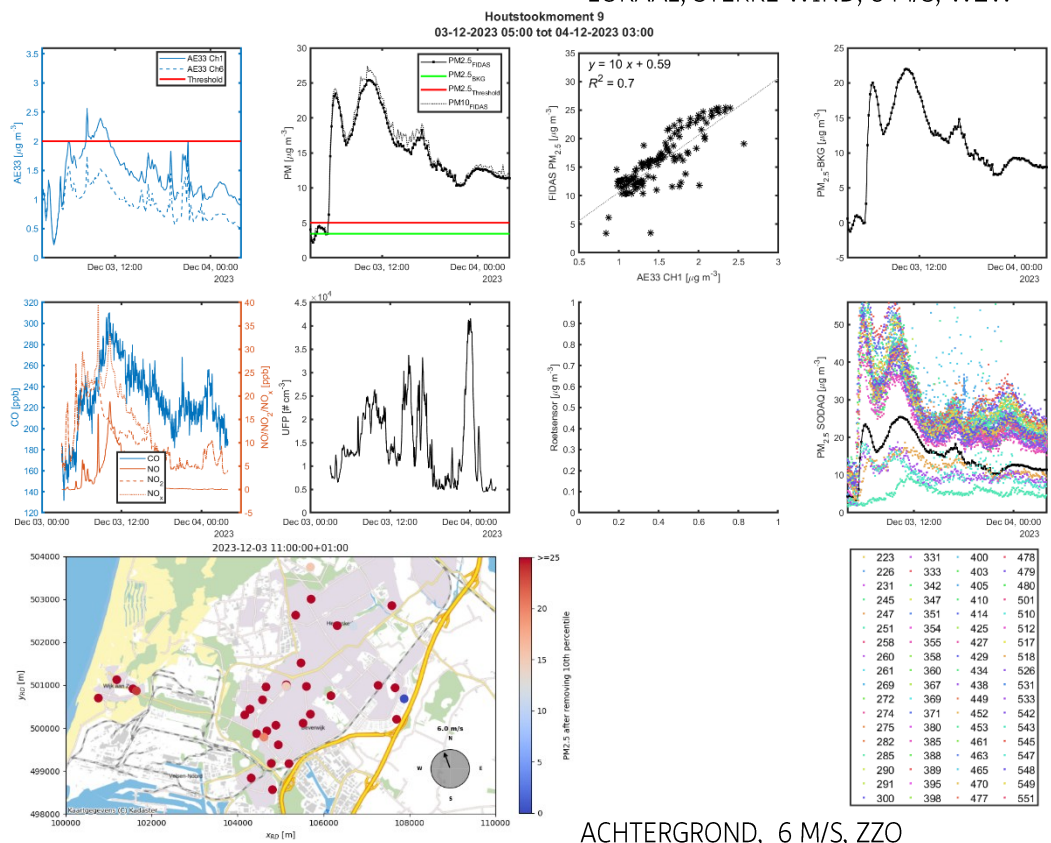
LOKAAL, DAARNA ACHTERGROND, 3 M/S, ZO



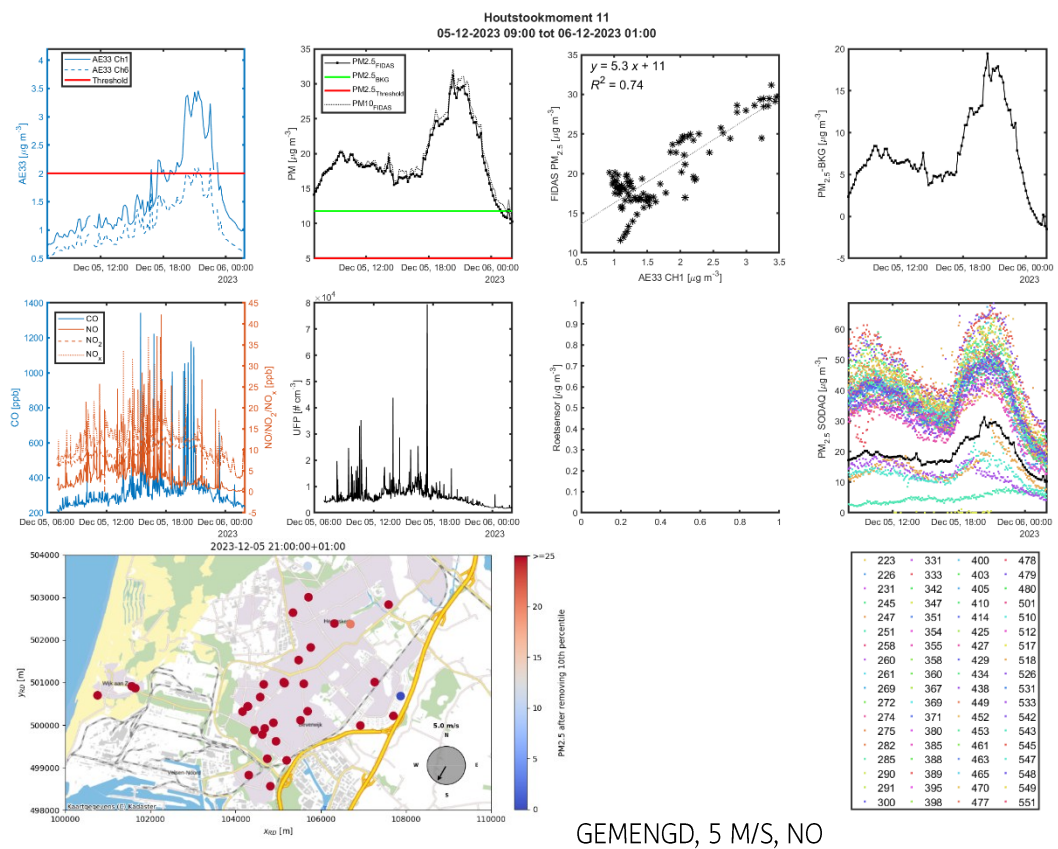
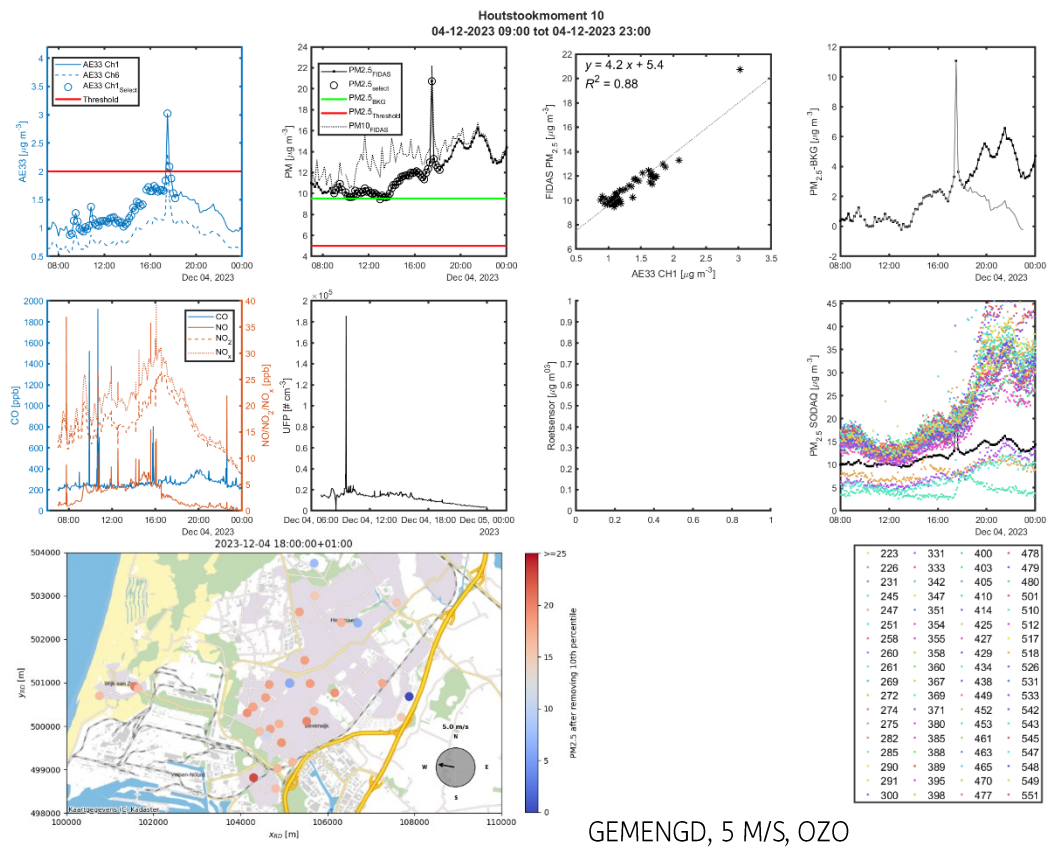
LOKAAL + ACHTERGROND, 2M/S, ZO

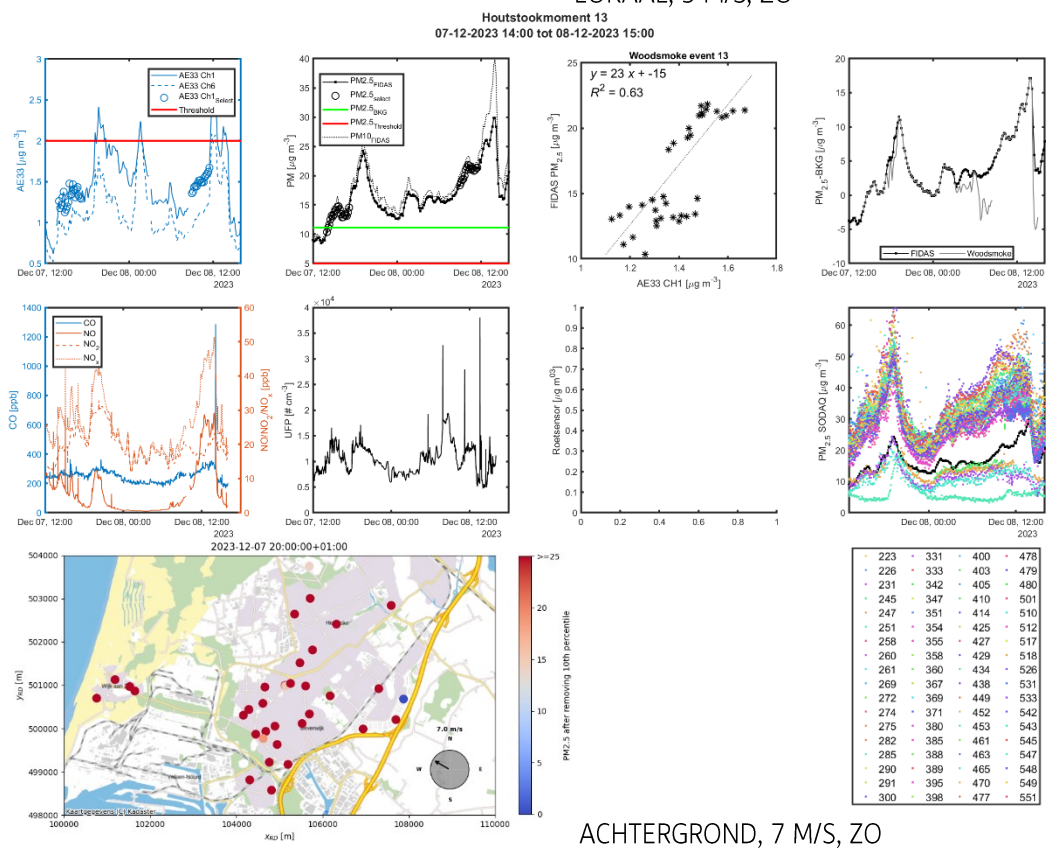
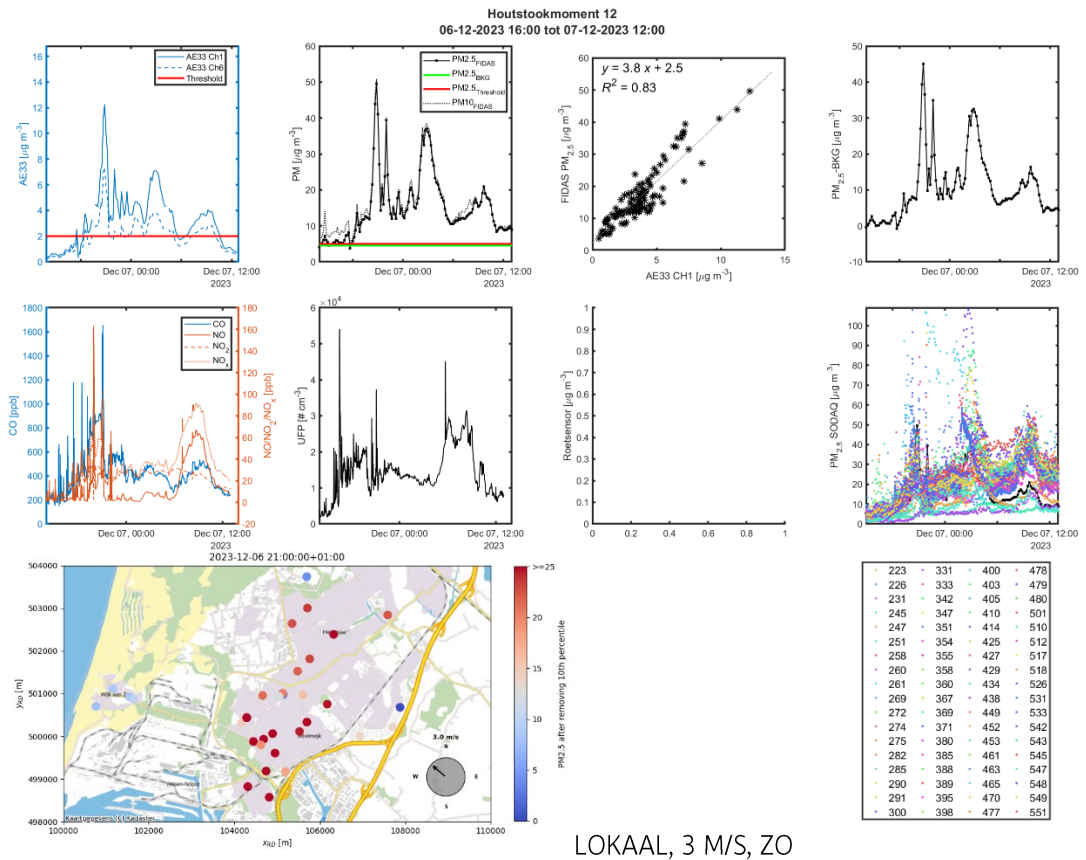


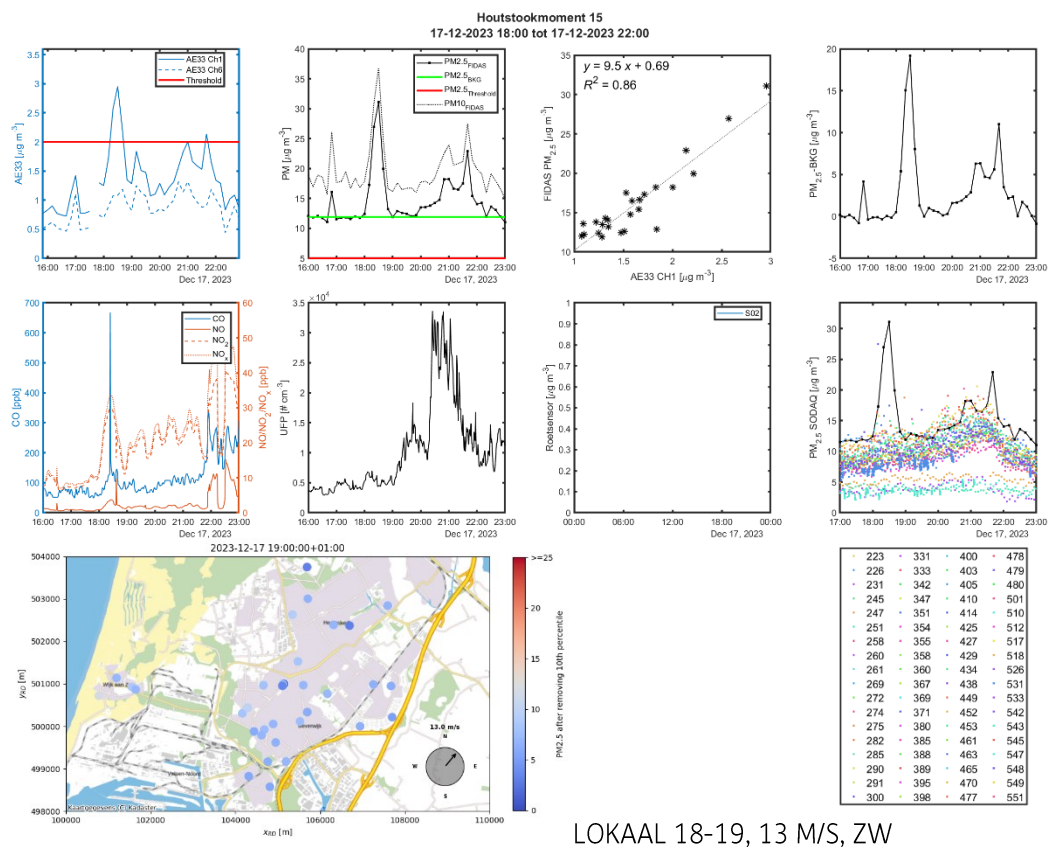
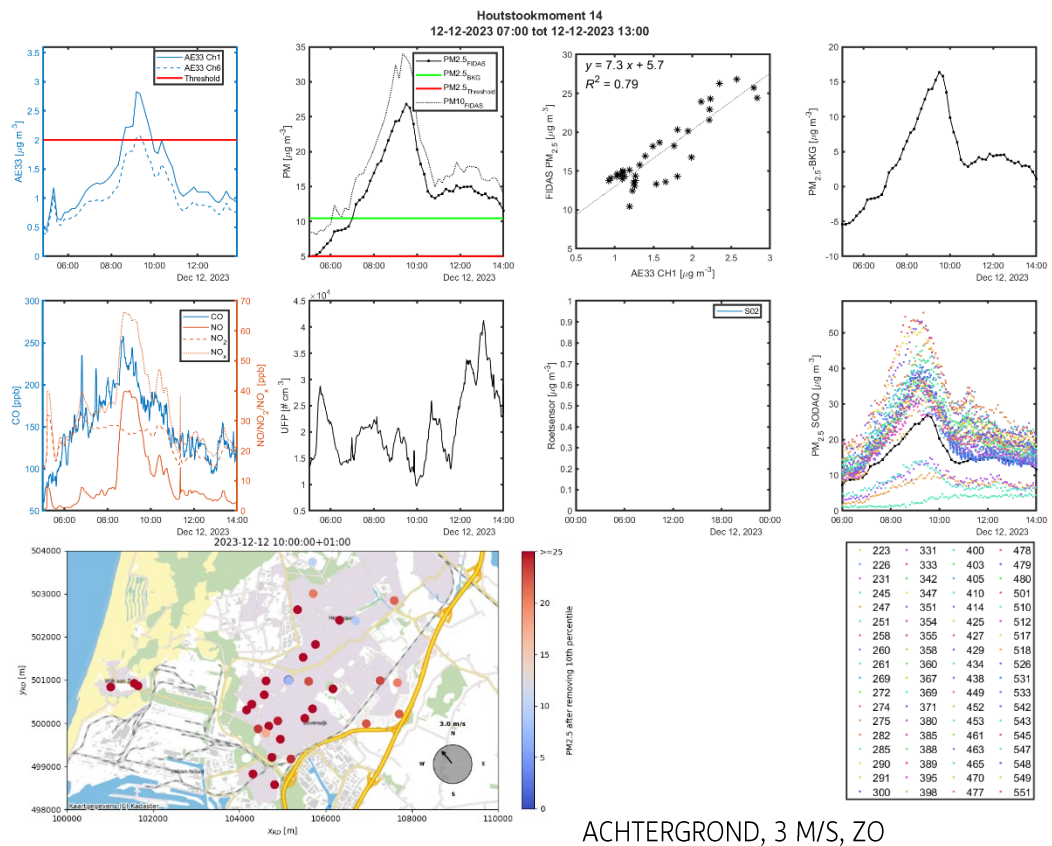
LOKAAL, STERKE WIND, 8 M/S, WZW

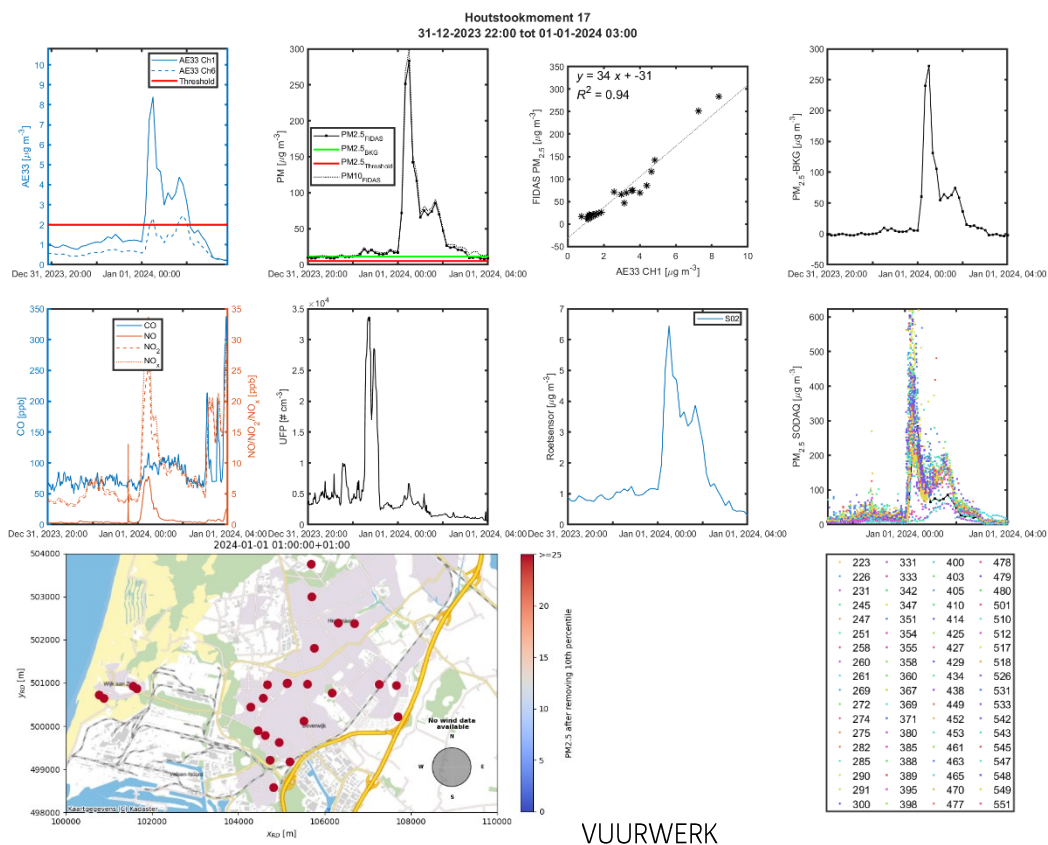
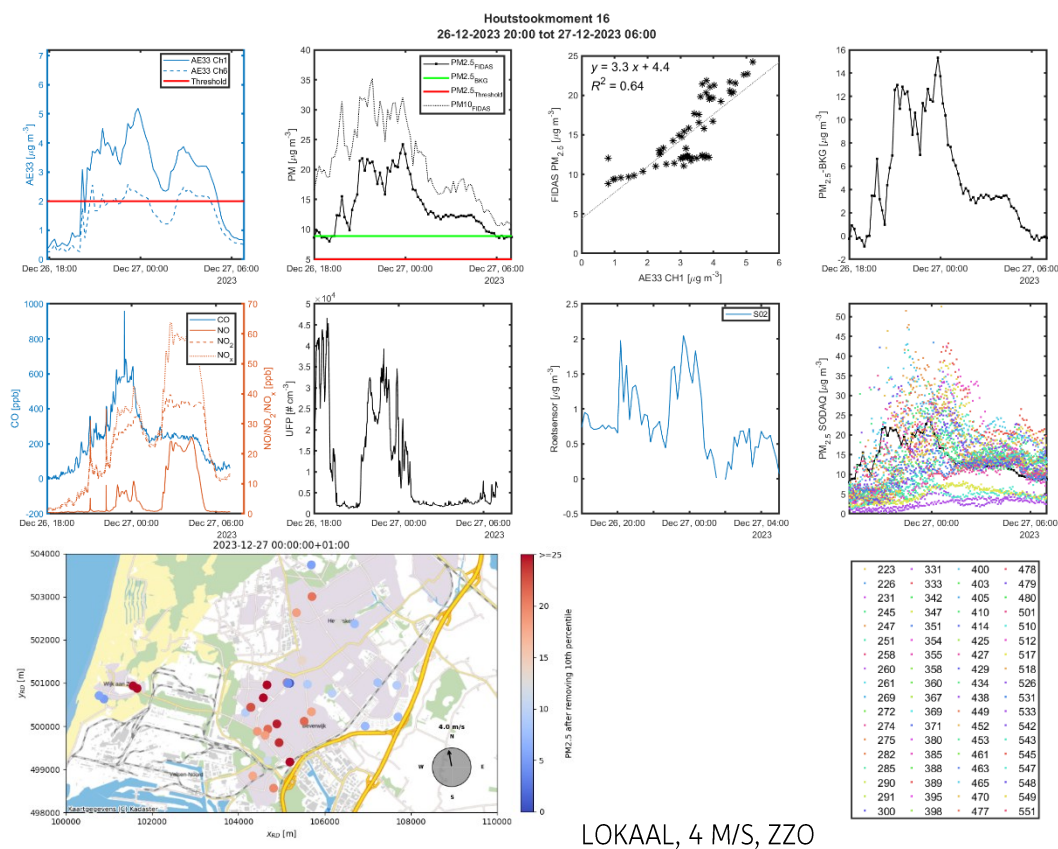


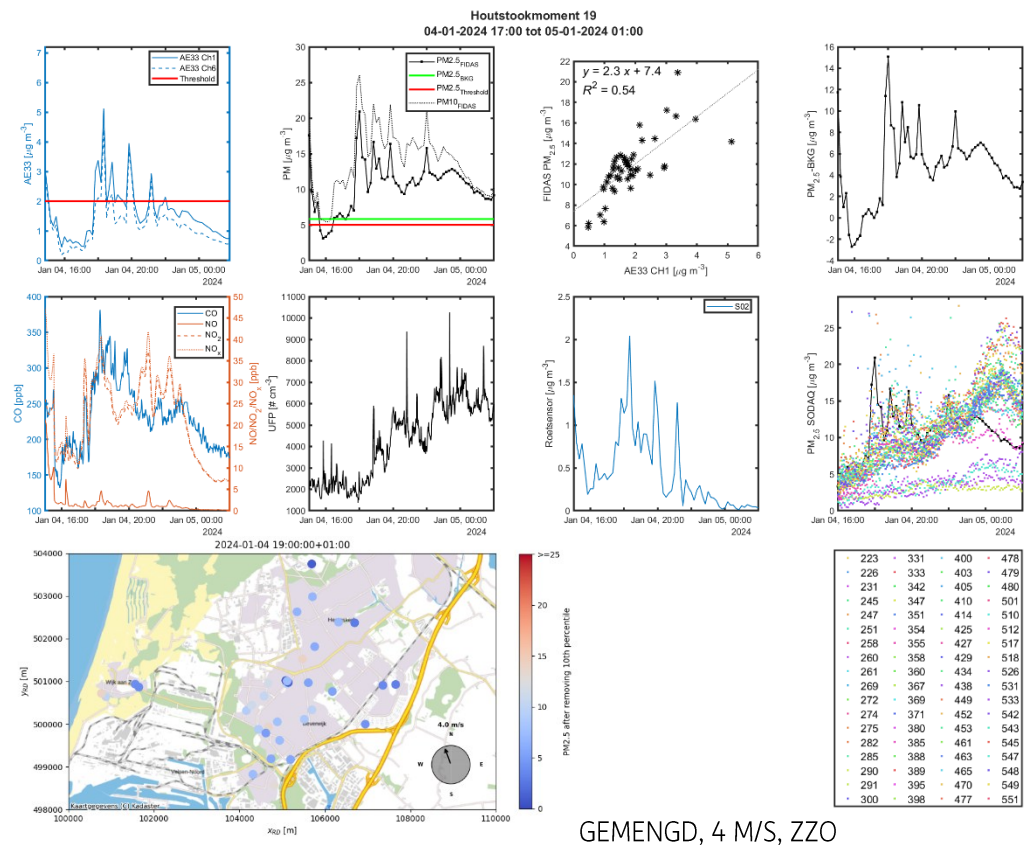
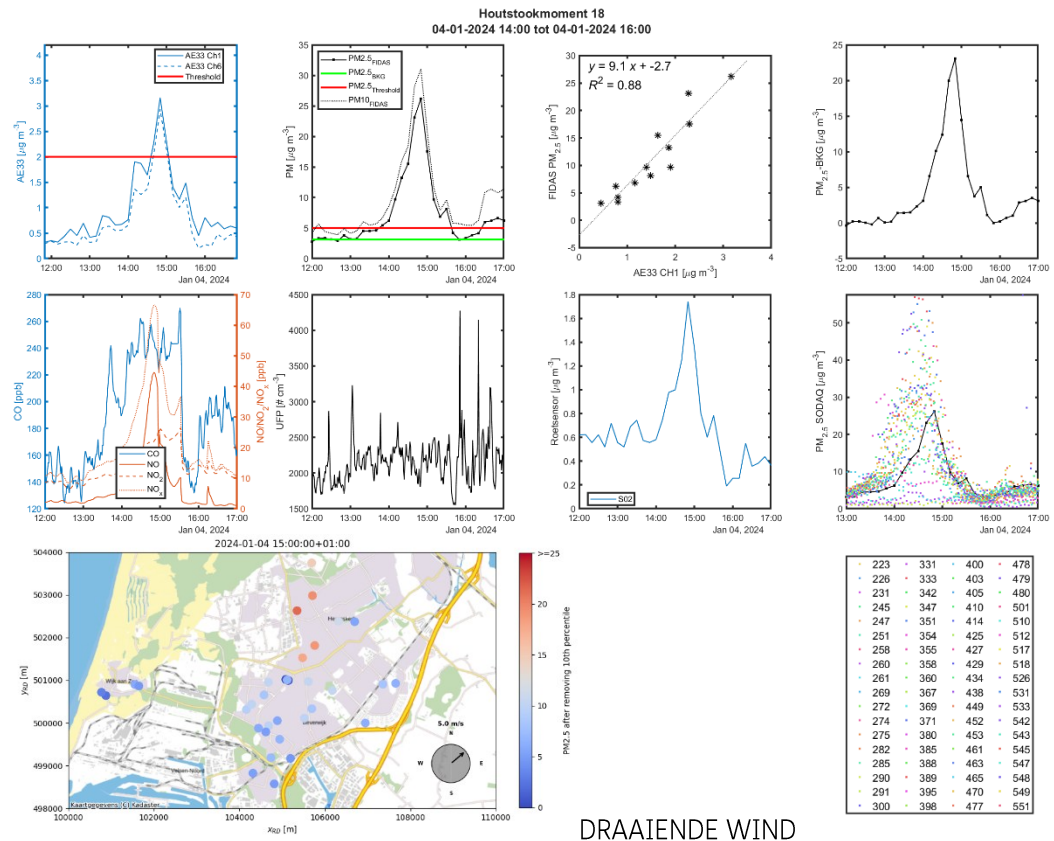
ACHTERGROND, 6 M/S, ZZO

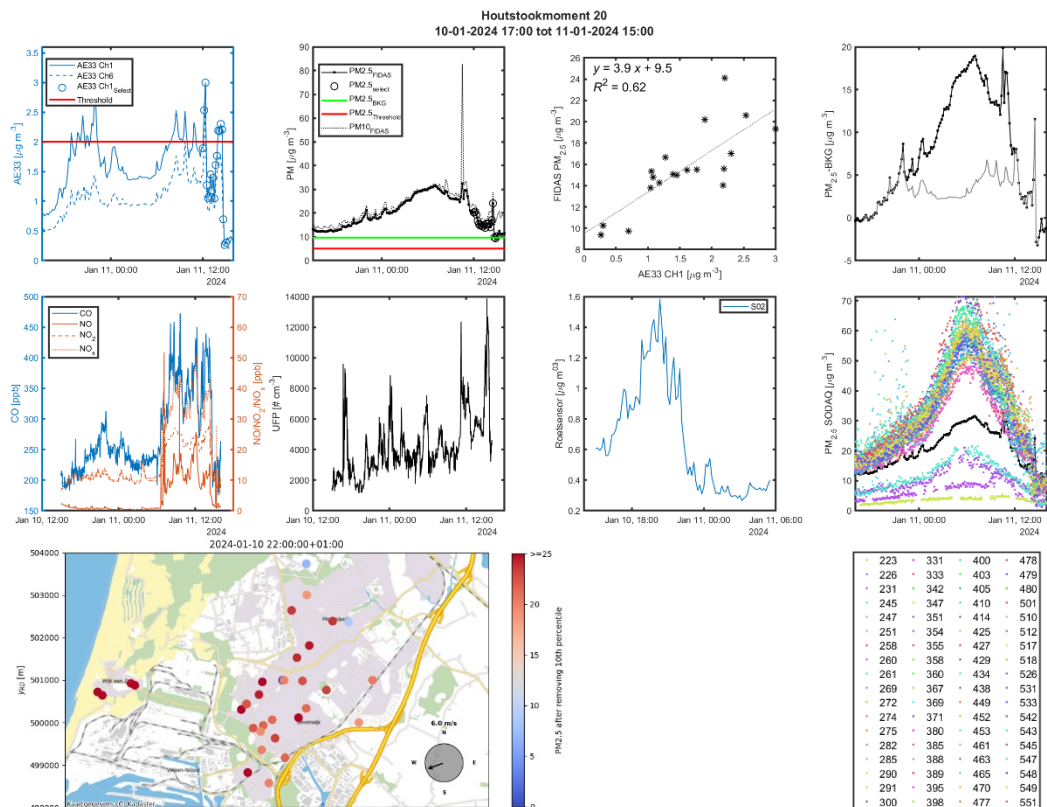




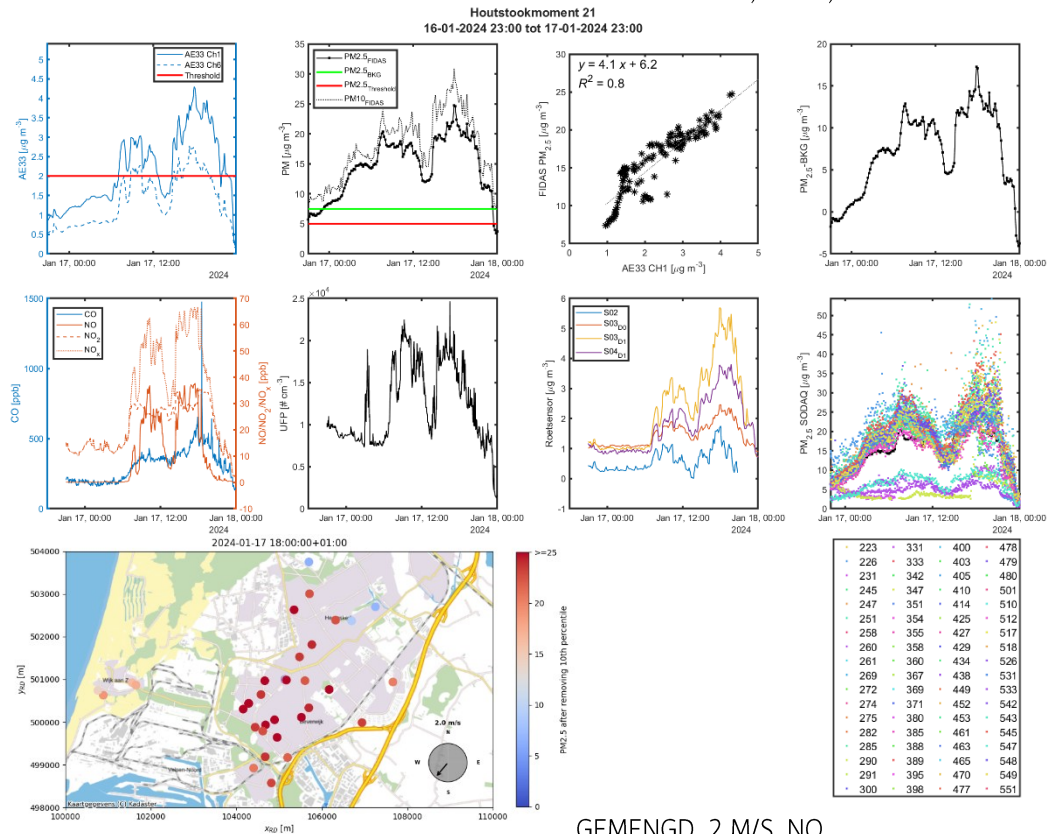




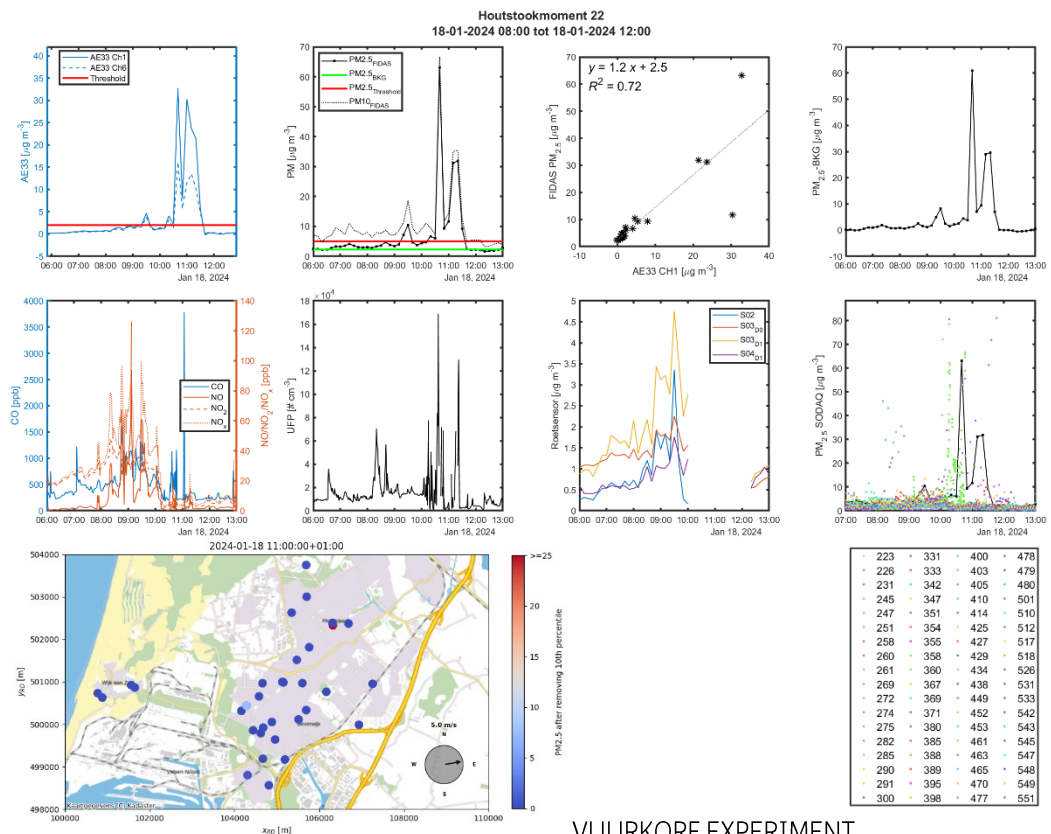




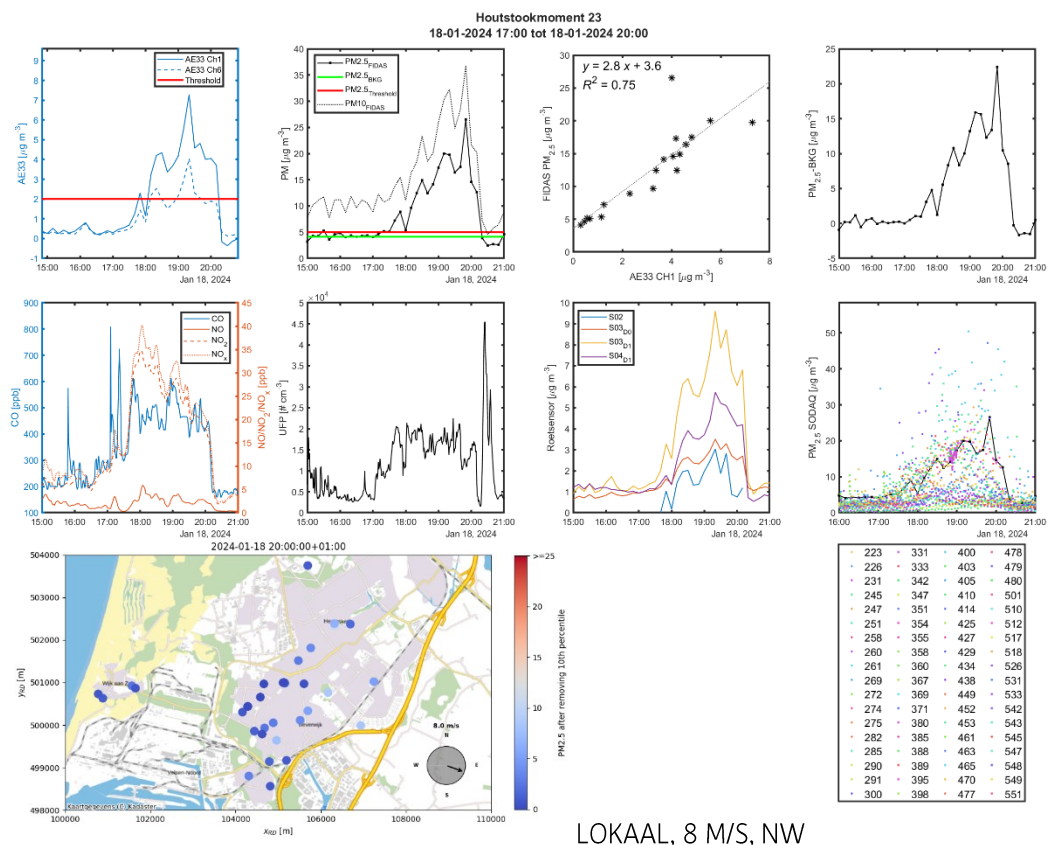
ACHTERGROND, 6 M/S, ONO



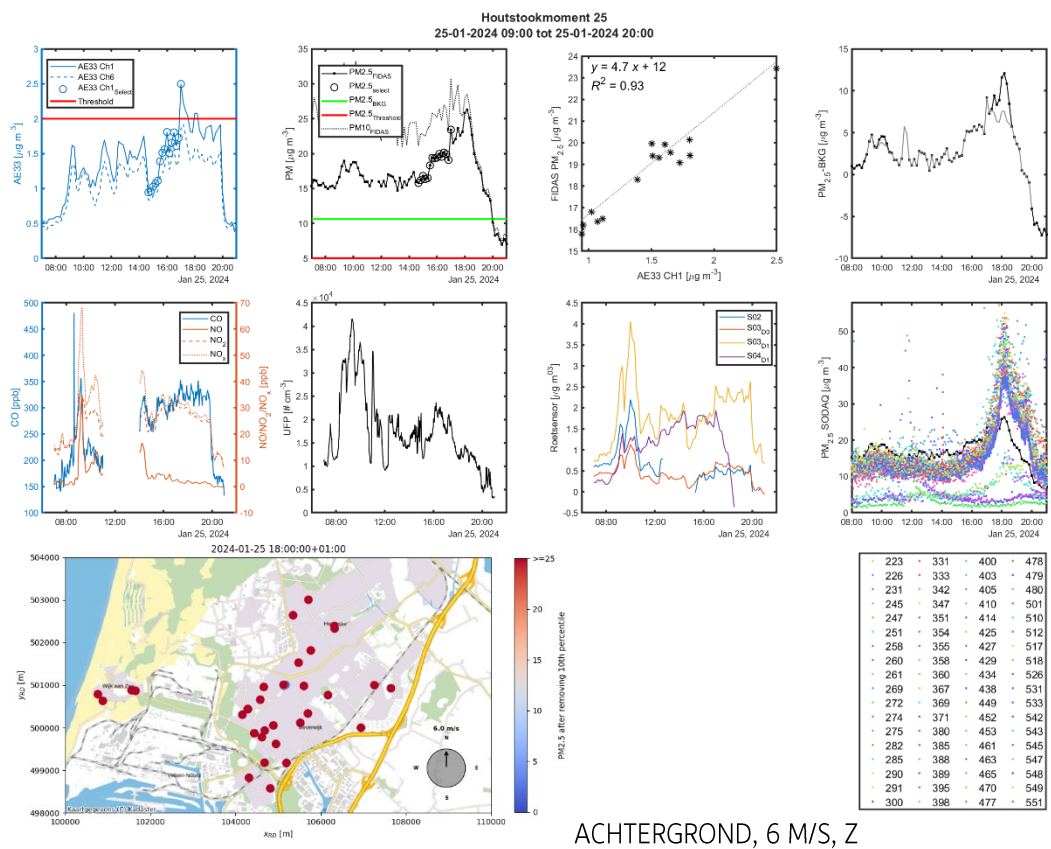
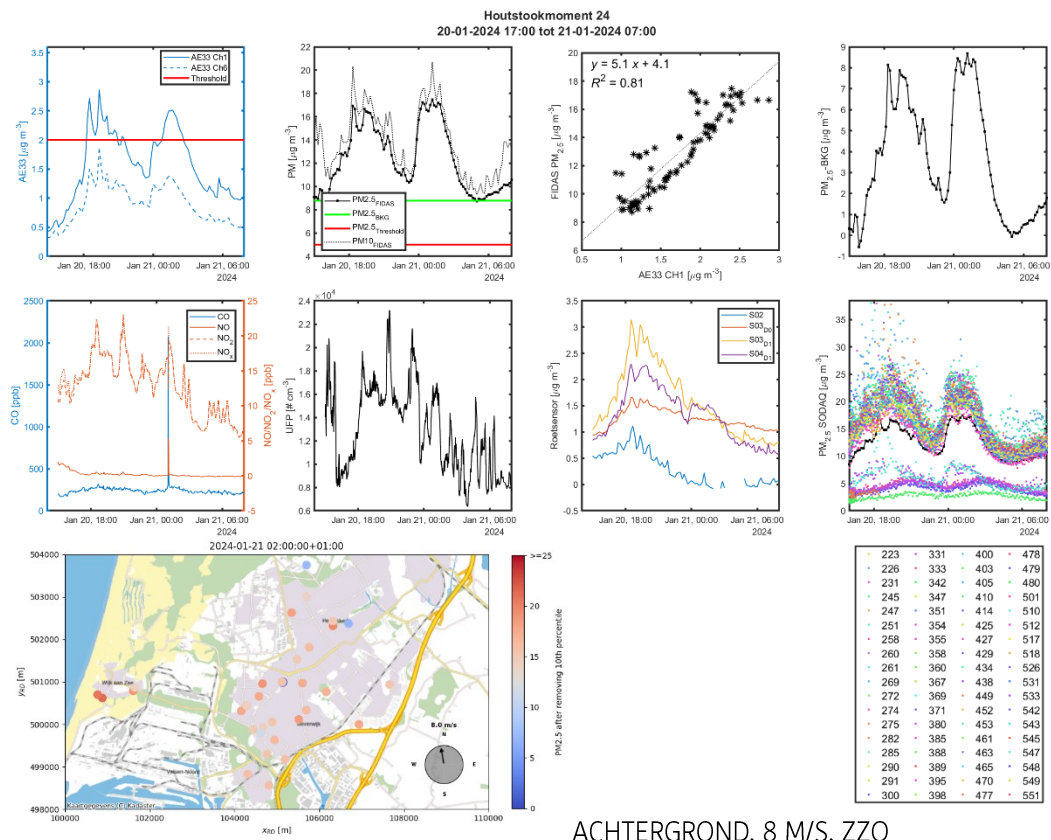
GEMENGD, 2 M/S, NO

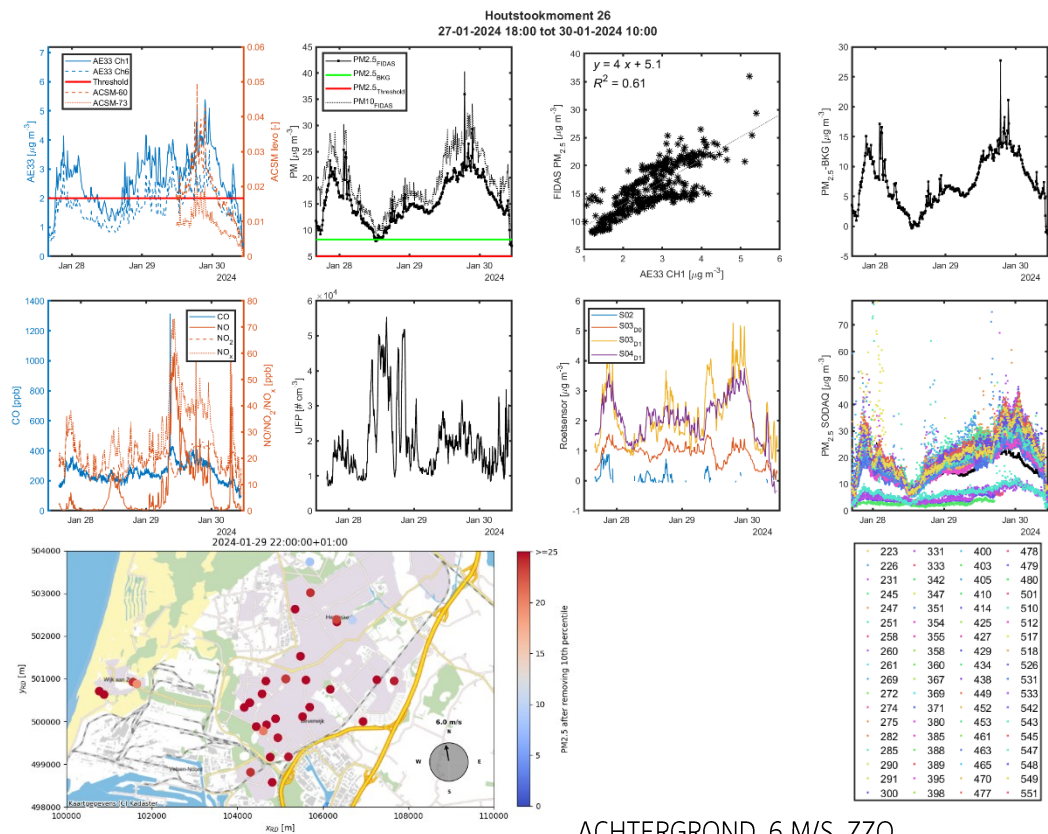


VUURKORF EXPERIMENT

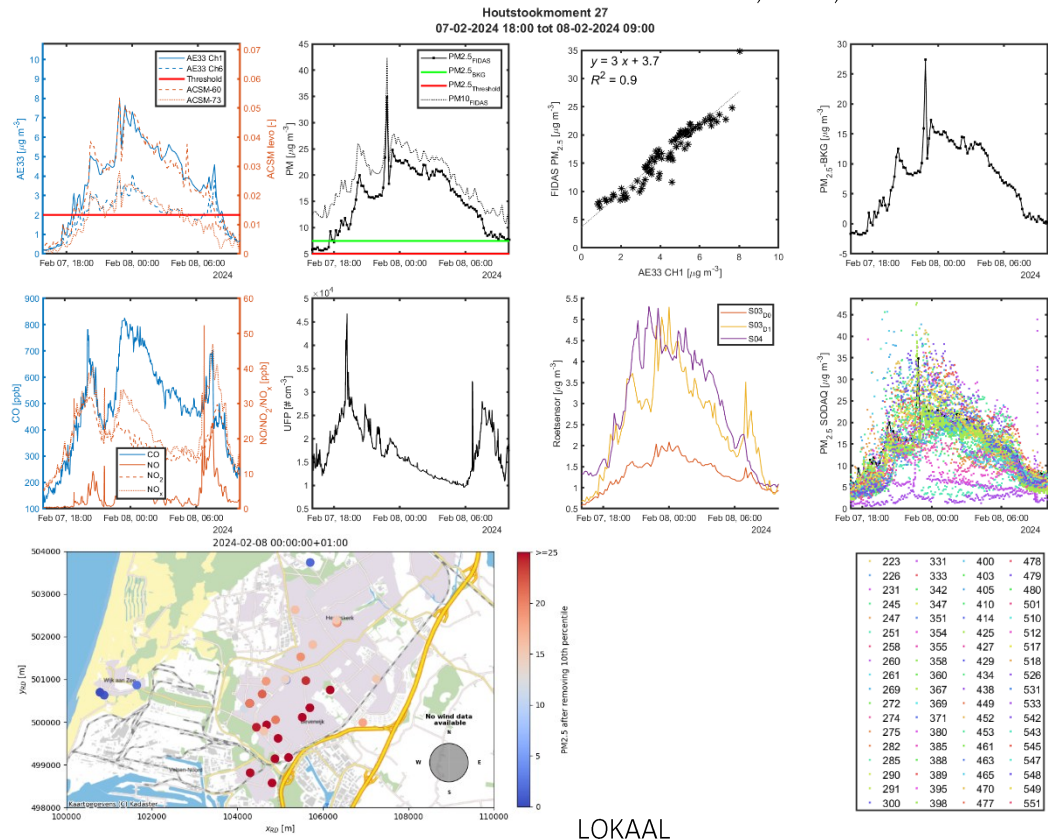


LOKAAL, 8 M/S, NW

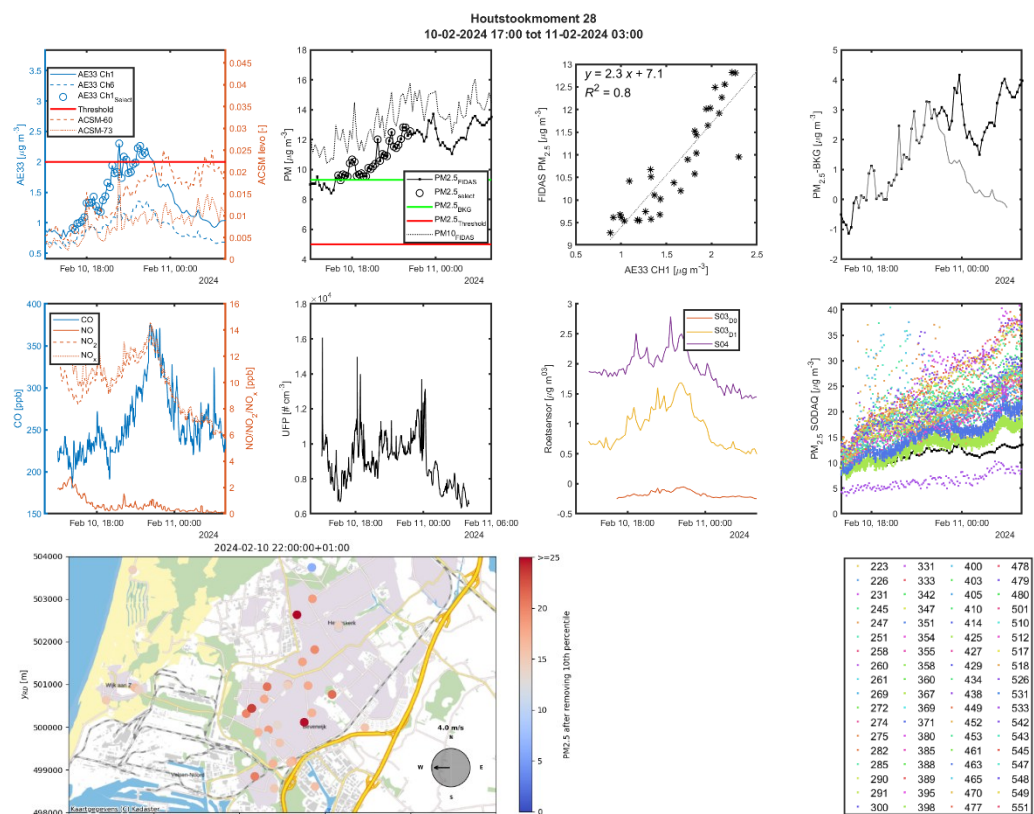




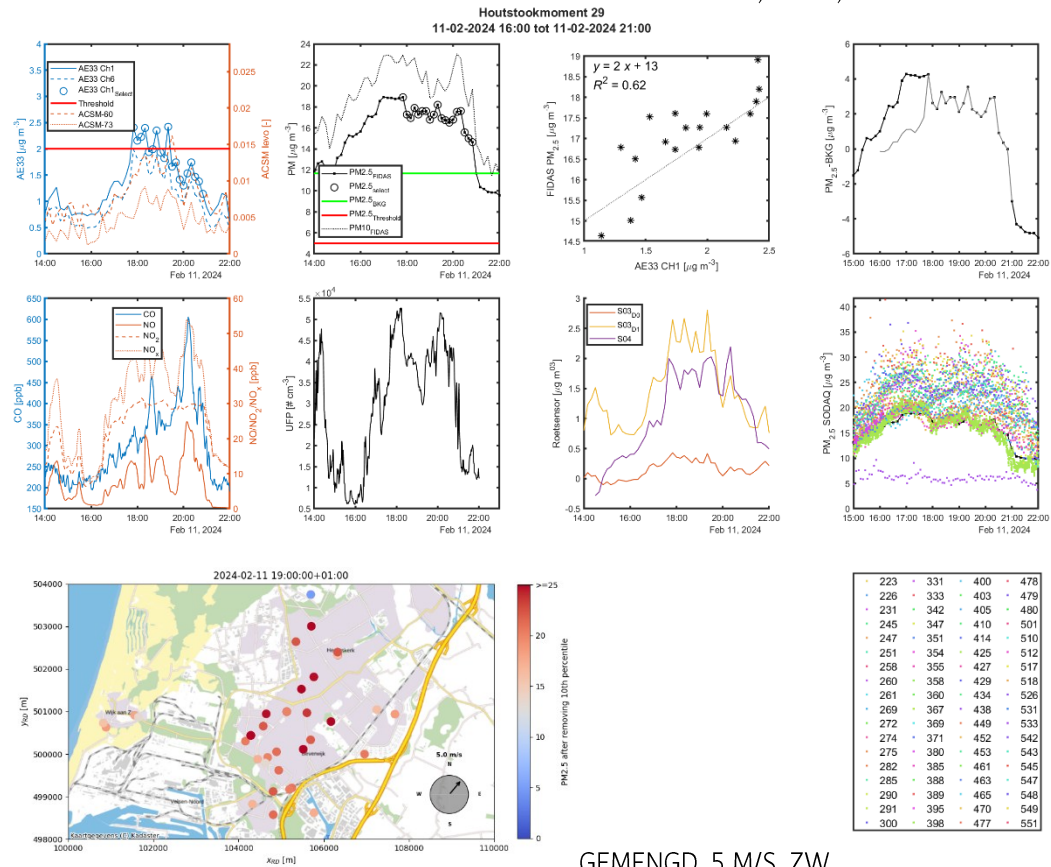
ACHTERGROND, 6 M/S, ZZO



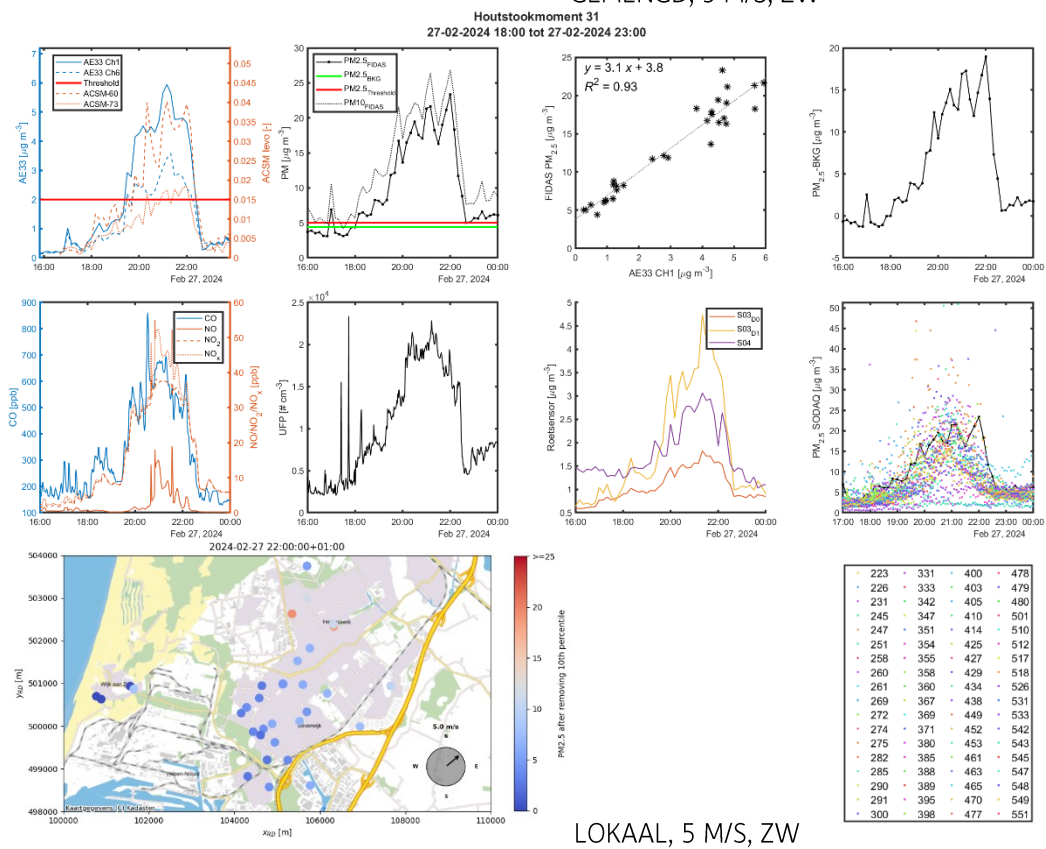
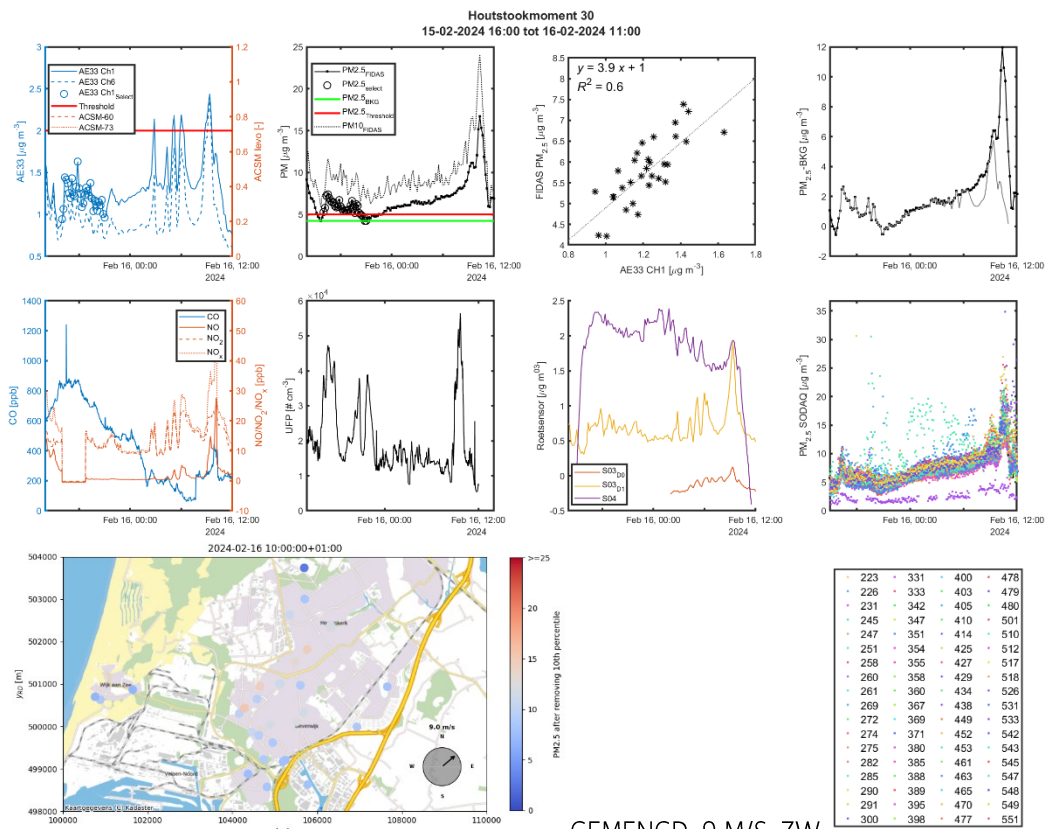
LOKAAL

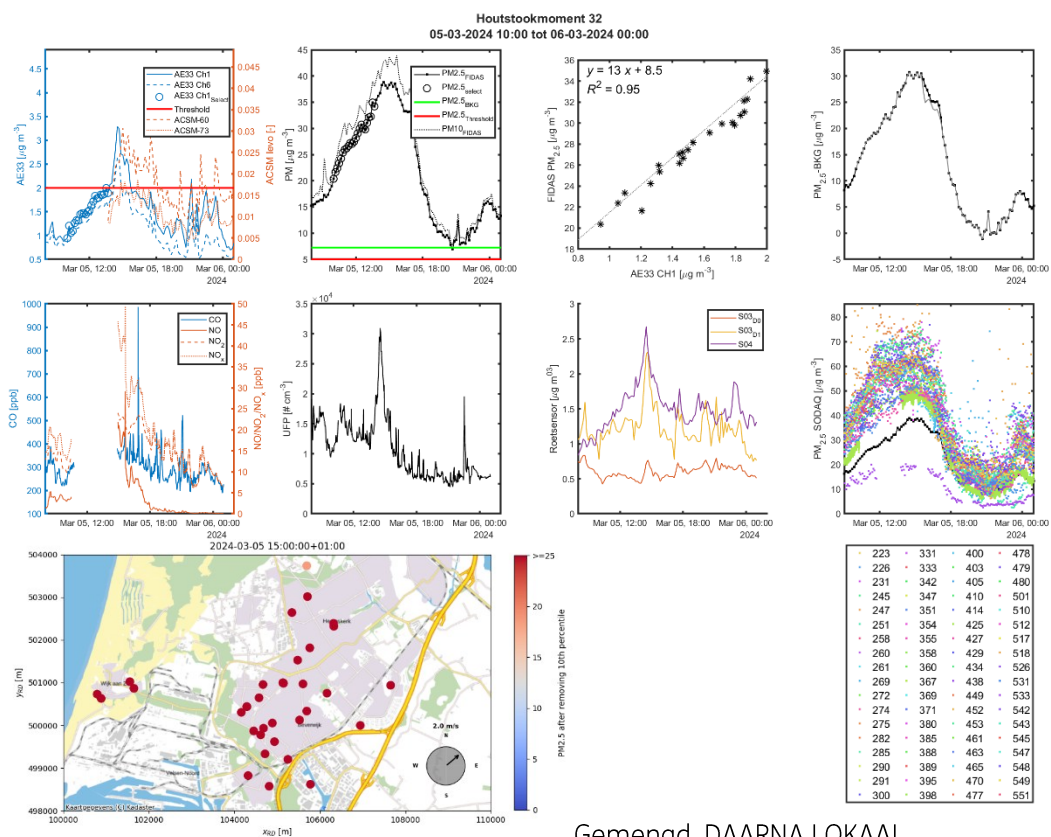


ACHTERGROND, 4 M/S, O

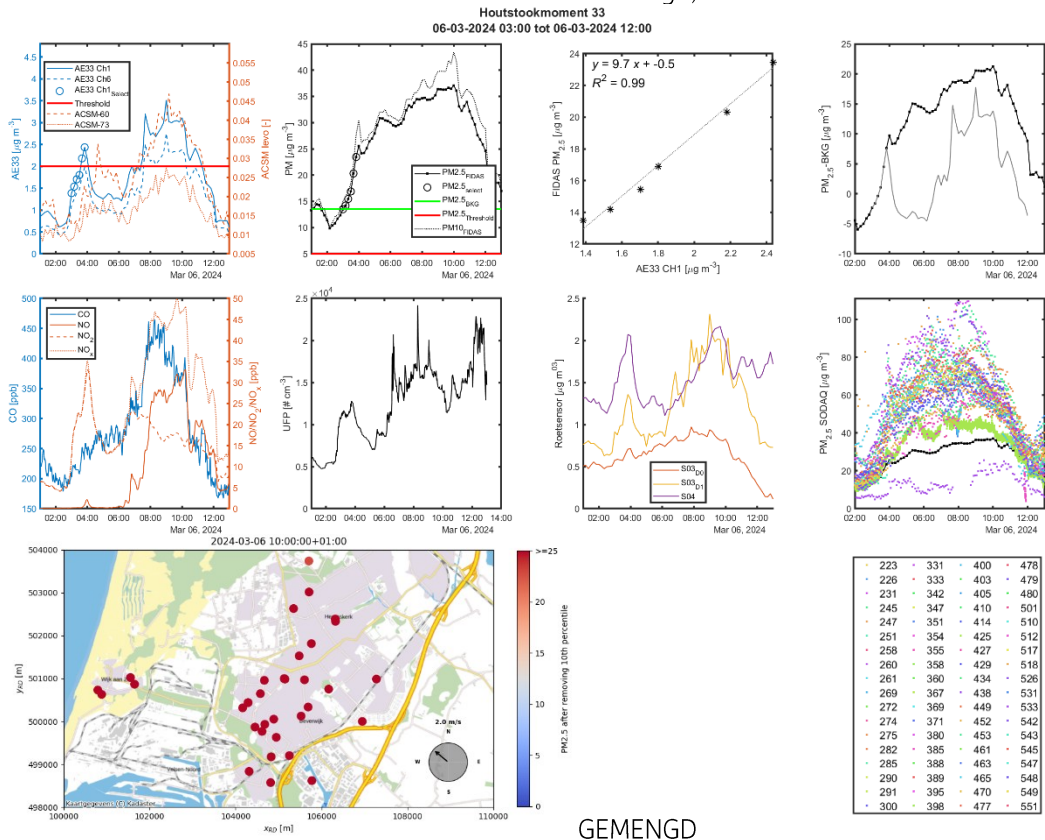


GEMENGD, 5 M/S, ZW

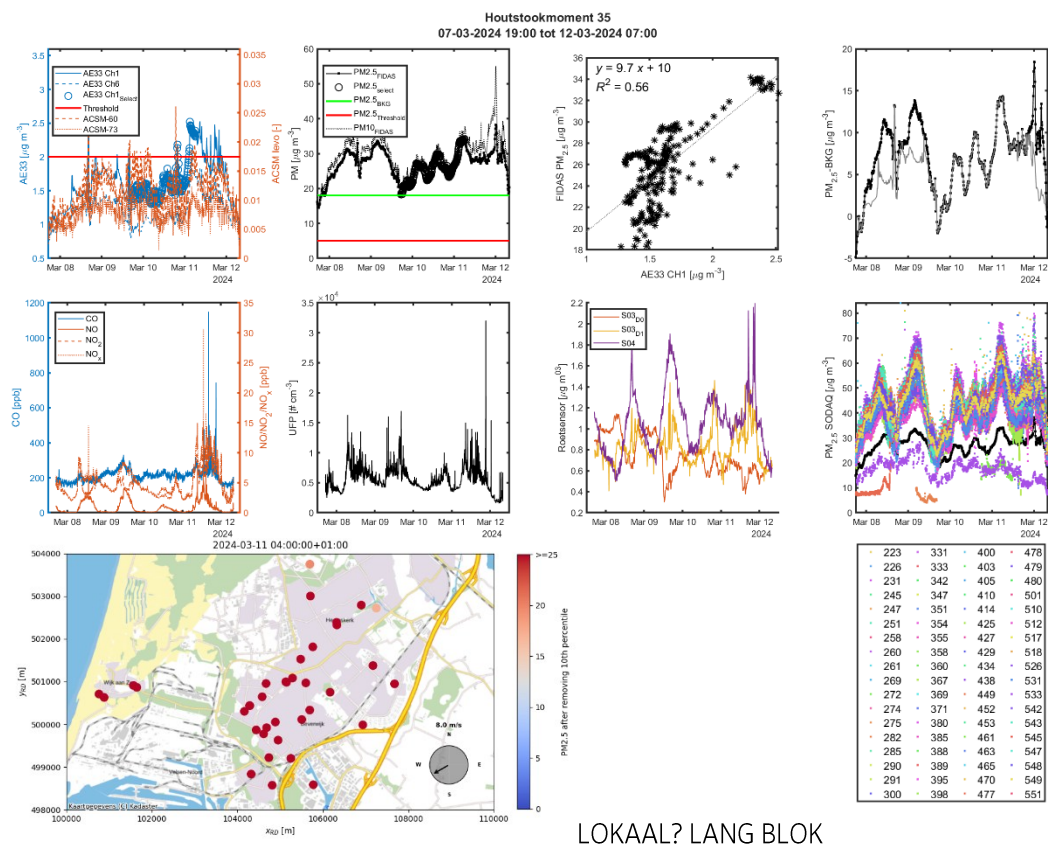
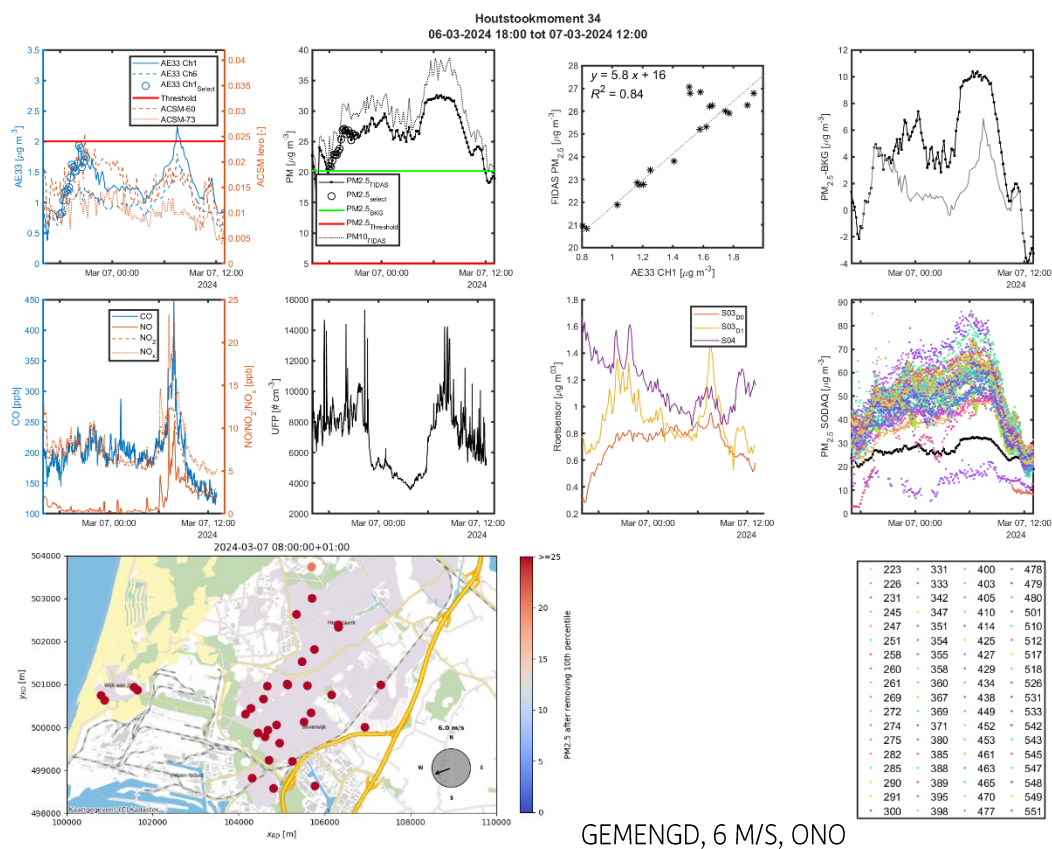


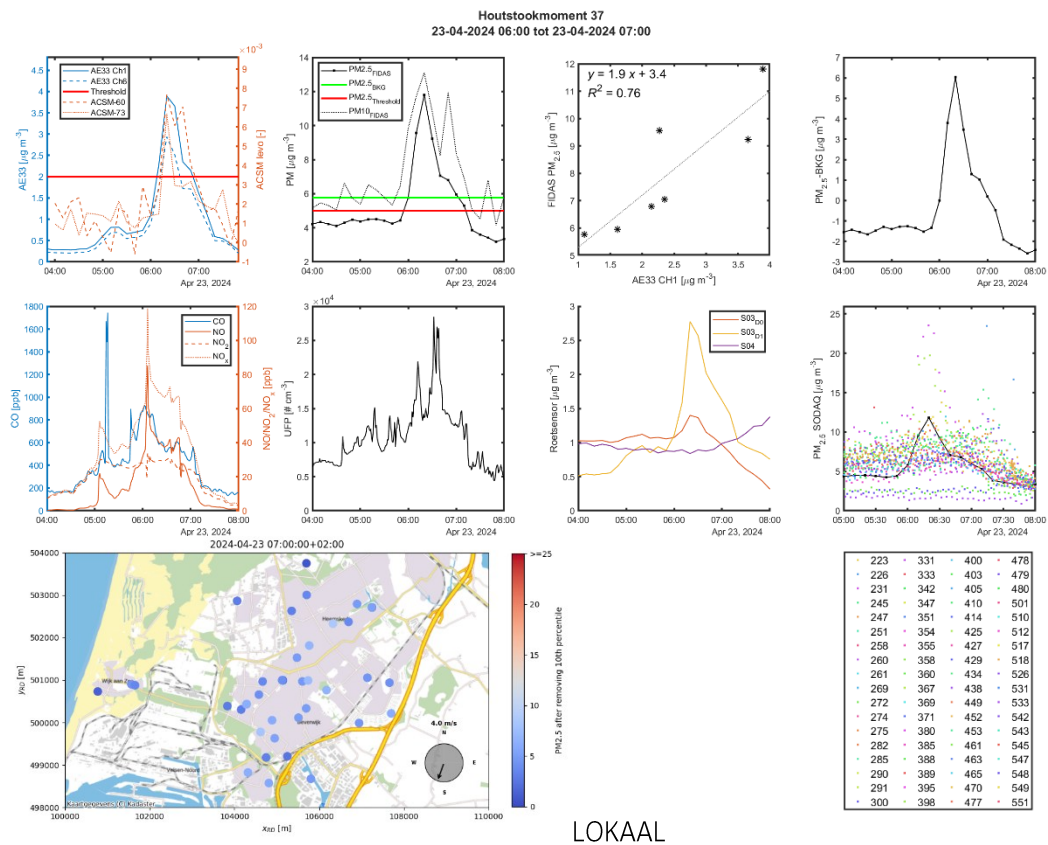
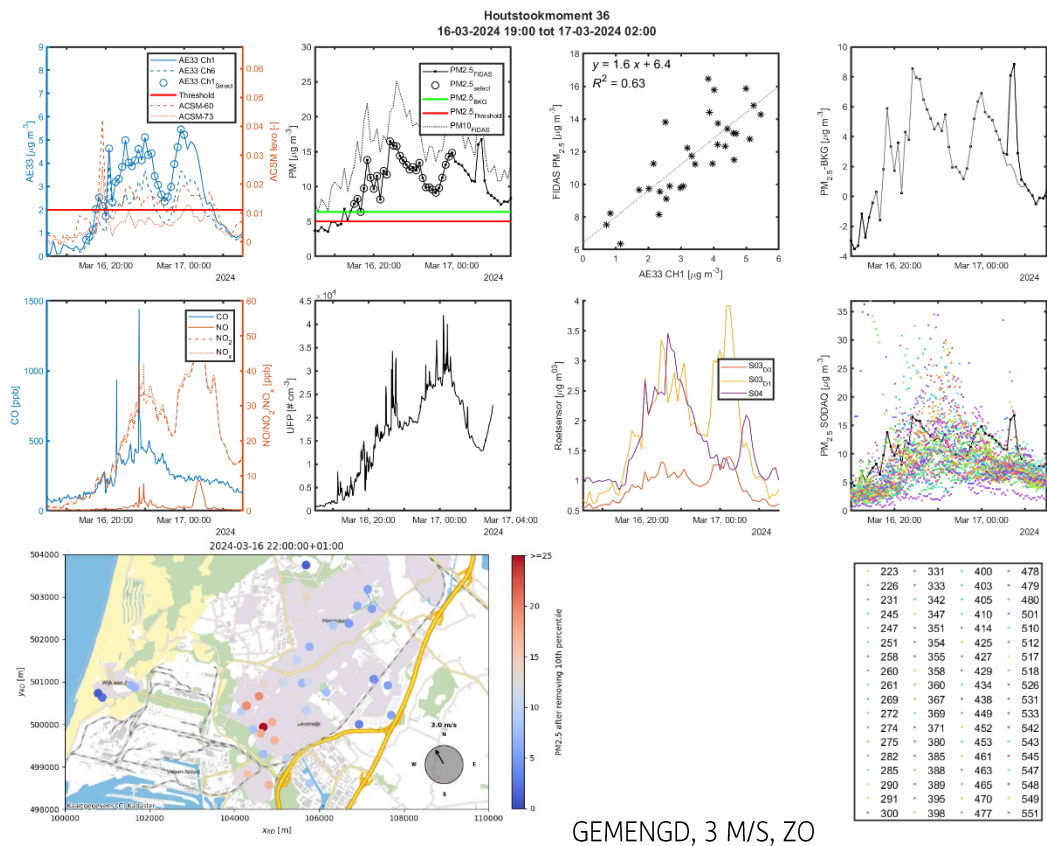


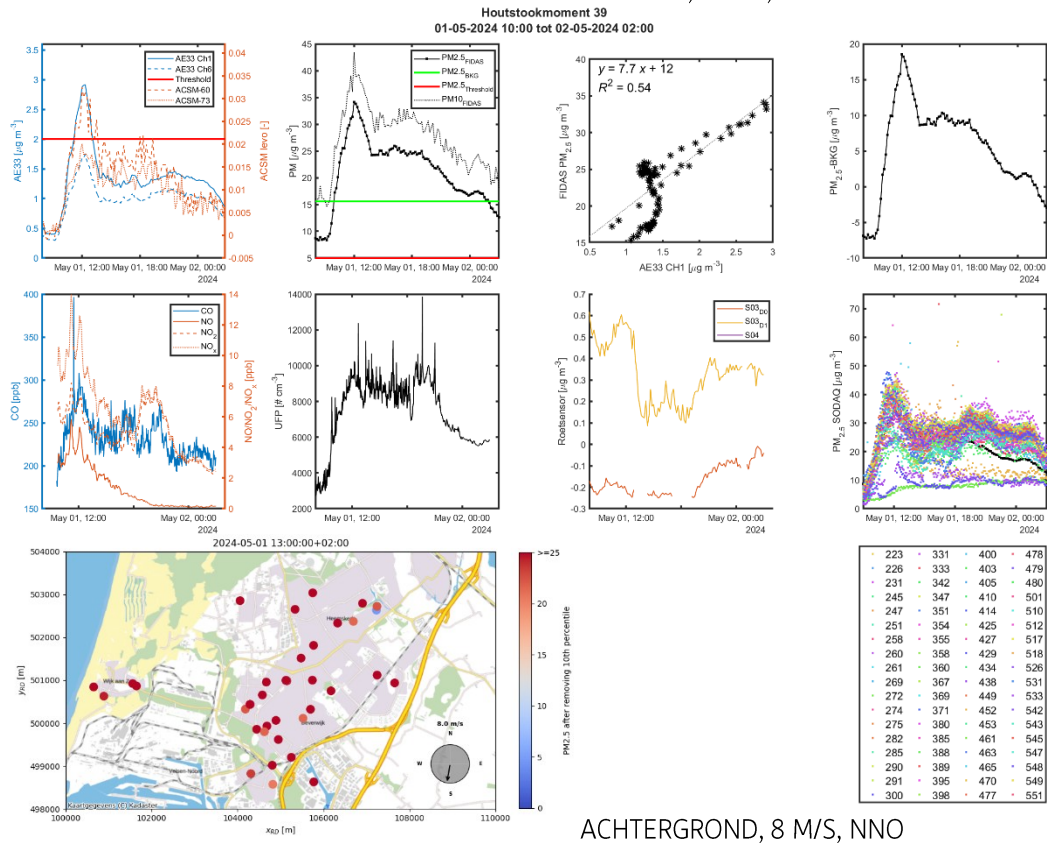
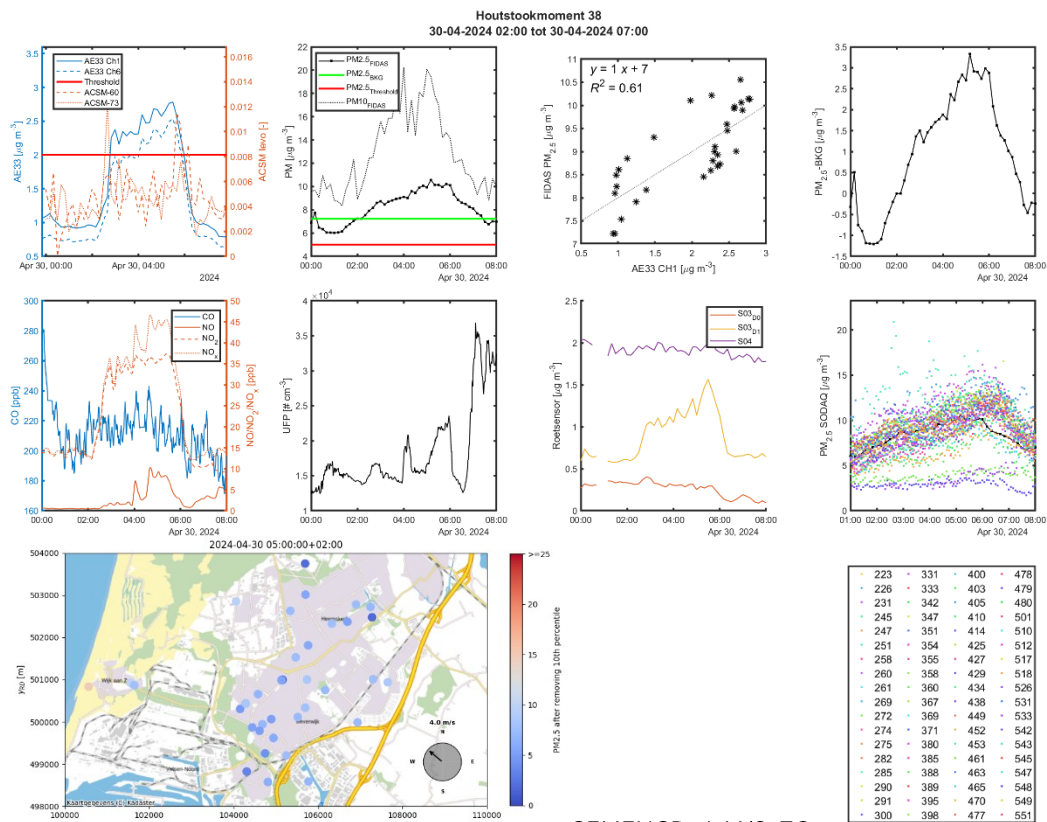
Gemengd, DAARNA LOKAAL

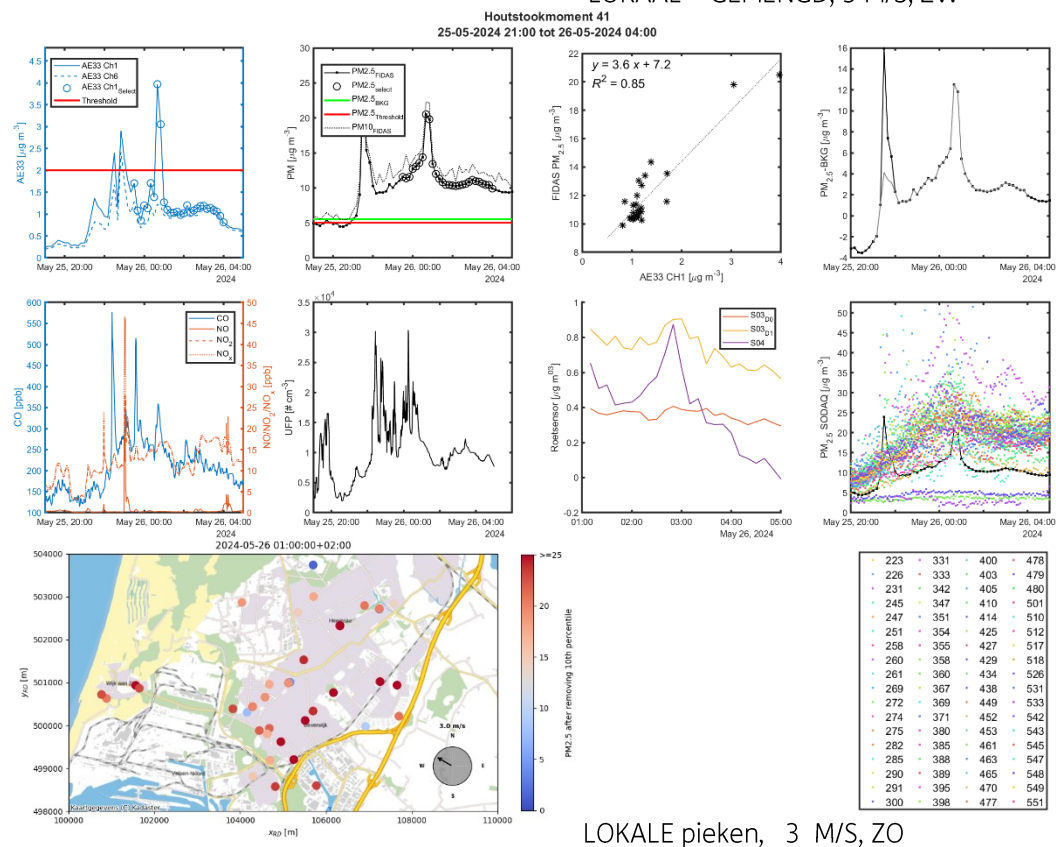
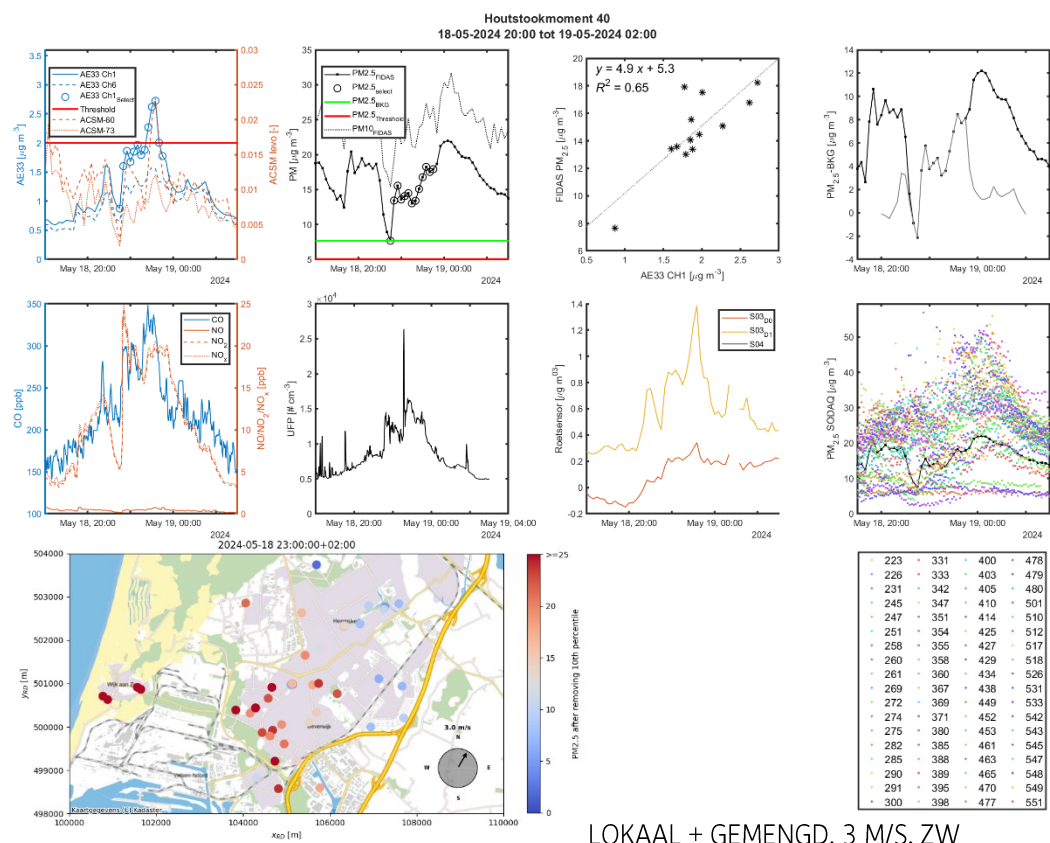


GEMENGD









Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl