TNO innovation for life

Houtstook in de provincie Utrecht

Meetcampagne winter 2025-2026



TNO Publiek ⟩ TNO-2026-18300

30 oktober 2026

www.tno.nl
+31 88 866 50 65
info@tno.nl

TNO-2026-18300 – 30 oktober 2026

Houtstook in de provincie Utrecht

Meetcampagne winter 2025-2026

Auteurs	P.C.P. Bronsveld, D. van Dinther, M. van Dijken, J.P. Lollinga, R. Moerman, S. Bakkenes, R. Goudriaan

Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Aantal pagina's	54 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Provincie Utrecht
Projectnaam	Houtstook Provincie Utrecht
Projectnummer	060.65039

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.

© 2026 TNO

Samenvatting

Houtstook in huishoudens is een belangrijke bron van fijnstof in Nederland en draagt bij aan de blootstelling van omwonenden aan luchtverontreiniging. In opdracht van de Provincie Utrecht heeft TNO, als onderdeel van het samenwerkingsproject Samen Houtstook Meten en mede gefinancierd vanuit het Schone Lucht Akkoord, gedurende het stookseizoen 2025–2026 een meetcampagne uitgevoerd in de regio Zeist, Driebergen en Amersfoort. Het onderzoek had als doel de bijdrage van houtstook aan de luchtkwaliteit en de ruimtelijke verspreiding van houtrook inzichtelijk te maken met behulp van metingen door inwoners.

De meetcampagne combineerde referentiemetingen van fijnstof, roet en levoglucosan (specifieke tracer voor houtrook) met een fijnmazig netwerk van 60 fijnstofsensoren dat bij deelnemende inwoners is geplaatst. Dankzij deze combinatie van referentiemetingen en metingen door inwoners kon niet alleen worden onderzocht wanneer houtrook aanwezig was, maar ook waar verhogingen van fijnstofconcentraties door houtstook zich binnen het onderzoeksgebied bevinden.

De kwantitatieve resultaten van de meetcampagne zijn samengevat aan de hand van kengetallen, berekend op basis van de meetdata op de referentielocaties. Er is 71 dagen gemeten op de referentielocatie in Zeist en 72 dagen op de locatie in Amersfoort. Hierbij was in Zeist op 42,7% van de uren houtrook meetbaar aanwezig en in Amersfoort op 14,1% van de uren. De geschatte bijdrage van houtstook aan al het fijnstof ($PM_{2.5}$) gedurende de hele meetperiode was duidelijk hoger in Zeist (17,4%) dan in Amersfoort (5,3%). Dit verschil hangt samen met zowel een groter aantal houtrookmomenten, 43 in Zeist en 15 in Amersfoort, als een hogere bijdrage van houtrook aan $PM_{2.5}$ tijdens die momenten (27,4% in Zeist en 17,6% in Amersfoort). Beide verschillen worden waarschijnlijk verklaard door de lagere buitentemperaturen tijdens de metingen in Zeist ten opzichte van de metingen in Amersfoort. Mogelijk speelt ook het aangepaste houtrookbeleid in Amersfoort een rol, maar dit kan op basis van alleen deze meetgegevens niet met zekerheid worden gezegd.
Met behulp van de data van de fijnstofsensoren bij inwoners is bepaald waar verhogingen in fijnstof worden gemeten tijdens houtrookdetectiemomenten op de centrale meetlocatie. Locaties waar dit het vaakst voorkomt zijn hierbij gemarkeerd als hotspots. Met name ten westen en ten zuiden van het centrum van Amersfoort (NB het onderzoeksgebied omvatte niet de gehele gemeente), en in het zuidwesten van Driebergen-Rijsenburg zijn op deze manier de meeste hotspots gevonden. Ook in Zeist waren er een aantal sensoren die bovengemiddeld vaak hoog meetten.

De in deze studie gebruikte meetaanpak, waarbij gebruik wordt gemaakt van de combinatie van fijnstof- en roetmetingen op een centraal meetpunt en fijnstofsensoren voor het verspreidingsbeeld, is oorspronkelijk ontwikkeld op basis van metingen dicht bij de kust, maar blijkt ook goed toepasbaar in een gebied meer landinwaarts.
De resultaten laten zien dat houtstook in het onderzoeksgebied een duidelijk meetbare bijdrage levert aan de fijnstofconcentraties. De sterke samenhang tussen roet en de specifieke houtrooktracer levoglucosan onderbouwt daarbij het gebruik van roet voor het identificeren van houtrookmomenten. Houtrook wordt met name waargenomen tijdens koude avonden met weinig wind en is soms meerdere dagen aantoonbaar aanwezig in de atmosfeer. Dit is te herkennen aan een verhoging van roet ook buiten de actieve stookmomenten. Hierdoor kan

de blootstelling van inwoners aan stoffen in houtrook langer aanhouden dan alleen tijdens de actieve stookmomenten.
Bij deze weerscondities kunnen verhoogde concentraties gedurende langere tijd aanwezig blijven en is er vaak ook aanvoer van achtergrondfijnstof vanaf het Europese continent. De achtergrondconcentraties van fijnstof in het onderzochte gebied zijn dan ook relatief hoog. Het nauwkeurig bepalen van de absolute, voornamelijk lokale, bijdrage van houtstook is hierdoor complexer dan bij eerdere studies. Binnen deze eerdere studies daalden achtergrondconcentraties van fijnstof en roet tussen de houtrookmomenten waardoor de bijdrage van lokale houtstook beter te onderscheiden was. De grootste onzekerheid binnen het huidige onderzoek ligt daardoor niet in het aantonen van houtrook, maar in het exact kwantificeren van de bijdrage van houtrook aan de in totaal gemeten fijnstofconcentraties tijdens houtrookmomenten.

Het burgermeetnetwerk levert belangrijke aanvullende informatie ten opzichte van één centrale meetlocatie. Lokale verschillen in houtrookfrequentie en intensiteit binnen de gemeenten worden hiermee zichtbaar, met name op momenten waarop de correlatie tussen roet- en fijnstofmetingen het hoogst is. De sensormetingen bieden gemeenten hierdoor de mogelijkheid om gebieden te identificeren waarin relatief vaak verhoogde blootstelling aan houtrook optreedt (hotspots) en waar monitoring, communicatie of maatregelen mogelijk het meest effectief zijn. De gevonden hotspots moeten daarbij worden geïnterpreteerd op buurt- of wijkniveau en kunnen niet worden herleid tot individuele stokers.
De analyse van de sensordata laat tevens zien dat de locatie van het referentiemeetpunt invloed heeft op hoe vaak op houtrookmomenten ook verhogingen in de fijnstofsensordata in de directe omgeving worden gedetecteerd. Locaties worden vaker gelabeld als hotspots wanneer het referentiemeetpunt zich dichterbij bevindt. De identificatie van houtrookmomenten op basis van roetmetingen wordt dus steeds minder representatief naarmate de afstand tot het centrale meetpunt groter is. Dit is een bevestiging dat de methode met name gevoelig is voor zeer lokale houtstook.
Tegelijkertijd geeft dit ook aan dat voor toekomstige toepassingen binnen gemeenten een combinatie van meerdere roetmeetpunten en een fijnmazig fijnstofsensornetwerk de meest kansrijke aanpak zal zijn om lokale hotspots betrouwbaar in beeld te brengen. De beschikbaarheid van betrouwbare, betaalbare roetsensoren en meer inzicht in de benodigde dichtheid van roetmeetpunten zijn hiermee belangrijke stappen in de verdere ontwikkeling van deze meetaanpak voor gemeenten.

Dit onderzoek toont aan dat houtstook een duidelijke, maar sterk ruimtelijk en temporeel variabele bijdrage levert aan de luchtkwaliteit in het onderzoeksgebied rond Zeist, Driebergen en Amersfoort in de provincie Utrecht.
De combinatie van roet- en fijnstofmetingen op een referentielocatie en een fijnmazig fijnstofsensornetwerk maken het mogelijk om zowel de aanwezigheid van houtrook als de ruimtelijke verspreiding ervan zichtbaar te maken. Daarmee biedt deze aanpak gemeenten concrete handvatten om lokale verschillen in blootstelling inzichtelijk te maken, hotspots te identificeren en toekomstige monitoring en beleidsontwikkeling gericht vorm te geven. Voor de absolute kwantificering van de houtrookbijdrage zijn verdere verbeteringen van de achtergrondcorrectie nog nodig.

Inhoudsopgave

Samenvatting 3
Terminologie 6
1 Inleiding 8
2 Opzet van de metingen 10
2.1 Onderzoeksgebied en meetperiode 10
2.2 Referentiemetingen 12
2.3 Fijnstofmetingen van inwoners 14
3 Resultaten 16
3.1 Metingen op de referentielocaties 16
3.2 Verspreiding van fijnstof 23
4 Discussie 30
4.1 Bijdrage van houtrook aan fijnstof en variatie in de tijd 30
4.2 Toegevoegde waarde fijnstofsensoren van inwoners bij herkennen lokale verschillen 30
4.3 Bruikbaarheid meetaanpak in een gebied verder van de kust 31
4.4 Toekomstige toepassing van de methode 31
5 Conclusies en aanbevelingen 33
Referenties 35
Ondertekening 54

Bijlagen
Bijlage A: Referentiemeetapparatuur 36
Bijlage B: Referentiemeetapparatuur 36
Bijlage C: Alle houtrookmomenten 39

Terminologie

Fijnstof (PM)	Fijnstof is een vorm van luchtvervuiling die bestaat uit deeltjes die blijven zweven. De afkortingen PM_1, $PM_{2.5}$ en PM_{10} staan voor de fijnstoffracties met deeltjesgroottes kleiner dan respectievelijk 1; 2,5; en 10 µm. Roet bestaat ook uit deeltjes en is daarmee onderdeel van de totale hoeveelheid fijnstof.
Roet	Roet (black carbon of BC) bestaat uit zeer kleine koolstofdeeltjes, meer of minder bedekt met een schil van andere stoffen, die ontstaan bij onvolledige verbranding van brandstoffen, zoals hout, diesel en andere biomassa. In dit onderzoek wordt roet, gedetecteerd met een aethalometer, gebruikt als belangrijke indicator voor houtrook.
NO_2	Stikstofdioxide. Deze stof komt vooral in de lucht terecht door uitlaatgassen van verkeer en industrie.
Levoglucosan	Levoglucosan is een chemische verbinding die vrijkomt bij de verbranding van cellulose, een belangrijk bestanddeel van hout. Omdat levoglucosan specifiek verbonden is aan biomassaverbranding, wordt het wereldwijd gebruikt als tracer voor houtrook in de atmosfeer.
Houtrook	Houtrook is het mengsel van gassen en fijnstofdeeltjes dat vrijkomt bij de verbranding van hout. Houtrook bevat onder andere fijnstof, roet en diverse organische stoffen en kan bijdragen aan de blootstelling van omwonenden aan luchtverontreiniging.
Houtstook	Houtstook is het verbranden van hout voor verwarming of sfeer, bijvoorbeeld in houtkachels, pelletkachels of open haarden. Houtstook is een belangrijke bron van houtrook en fijnstof in de leefomgeving.
Sensoren	In dit onderzoek zijn fijnstofsensoren gebruikt die verdeeld zijn door Samen Meten en worden beheerd door inwoners. Deze meten continu de $PM_{2.5}$-concentratie op verschillende locaties in het onderzoeksgebied en geven inzicht in ruimtelijke verschillen in fijnstofconcentraties. Ze zijn veel minder nauwkeurig dan de referentie-instrumenten in de meettrailer.
Meettrailer (referentielocatie)	De meettrailer is een mobiele meetopstelling met referentieapparatuur voor luchtkwaliteitsmetingen. In de trailer zijn instrumenten aanwezig voor het meten van het weer, fijnstof, roet en filtermonstername voor de levoglucosananalyses. De meettrailer dient als referentiepunt voor de identificatie van houtrookmomenten en de kalibratie van sensoren.
Grenslaag (hoogte)	Ook wel menglaag genoemd. In deze onderste laag van de atmosfeer is de invloed van het aardoppervlak direct merkbaar en zorgen turbulente wervels voor transport en menging van luchtverontreinigende stoffen. De grenslaaghoogte is de bovenkant van de grenslaag.
Hotspot	Locatie of gebied waar tijdens houtrookmomenten relatief vaak verhoogde fijnstofconcentraties worden gemeten ten opzichte van andere meetlocaties in het onderzoeksgebied. Een hotspot duidt niet noodzakelijk op één specifieke schoorsteen, maar betreft doorgaans een buurt of gebied waar de houtrookconcentratie relatief hoog is.
EU-grenswaarden (huidig)	Deze wettelijke normen geven aan tot welke concentraties luchtverontreinigende stoffen, zoals fijnstof en stikstofdioxide, beperkt moeten worden door de overheid. De huidige wettelijke EU-

	grenswaarden betreffen de volgende maximale jaargemiddelde concentraties: $PM_{2.5}$: 25 µg m^{-3}, PM_{10}: 40 µg m^{-3}, NO_2: 40 µg m^{-3}.
EU-grenswaarden (2030)	In 2030 worden de normen aangescherpt op grond van de Europese AQ Directive 2024/2881 van 23 oktober 2024. De toekomstige wettelijke EU-grenswaarden betreffen maximale jaargemiddelde concentraties van: $PM_{2.5}$: 10 µg m^{-3}, PM_{10}: 20 µg m^{-3}, NO_2: 20 µg m^{-3}. De EU hanteert ook 24-uursgemiddelde grenswaarden die slechts 18 dagen per jaar overschreden dienen te worden: $PM_{2.5}$: 25 µg m^{-3}, PM_{10}: 45 µg m^{-3}, NO_2: 50 µg m^{-3}.
WHO-advieswaarden	De WHO-advieswaarden uit 2021 zijn gezondheidskundige richtwaarden, waaronder de risico's voor de volksgezondheid zo laag mogelijk zijn. Deze zijn strenger dan de wettelijke EU-grenswaarden (zowel de huidige als de nieuwe). De WHO-advieswaarden van 2021 betreffen maximale jaargemiddelde concentraties van: PM2.5: 5 µg m^{-3}, PM10: 15 µg m^{-3}, NO_2: 10 µg m^{-3}, maar de WHO hanteert ook 24-uursgemiddelde advieswaarden die slechts vier dagen per jaar overschreden dienen te worden: $PM_{2.5}$: 15 µg m^{-3}, PM_{10}: 45 µg m^{-3}, NO_2: 25 µg m^{-3}.

1 Inleiding

Houtstook in huishoudens vormt een belangrijke bron van luchtverontreiniging in Nederland. Bij het stoken van hout in kachels en open haarden komt rook vrij die zich in de directe leefomgeving kan verspreiden. Deze rook bevat onder meer fijnstof (PM_{10} en $PM_{2.5}$), dat schadelijk kan zijn voor de gezondheid en kan bijdragen aan luchtwegklachten. Voor fijnstof gelden wettelijke normen en inzicht in bronnen van en blootstelling aan fijnstof is van groot belang voor beleid en maatregelen. Naar schatting is circa 23% van de Nederlandse primaire fijnstofemissie afkomstig van houtstook. Beheersing van fijnstofemissie is complex en een onderwerp dat maatschappelijk sterk leeft.

In opdracht van de Provincie Utrecht, met deelname van de gemeenten Amersfoort, Zeist en Utrechtse Heuvelrug, en met ondersteuning door inwoners van deze gemeenten via Samen Meten, heeft TNO een onderzoek uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de intensiteit en verspreiding van houtrook. De Provincie Utrecht wil daarnaast graag weten op welke manier de participatie van inwoners met metingen en kennisuitwisseling binnen gemeenten kan bijdragen aan het verbeteren van de luchtkwaliteit in de provincie.
De in dit rapport beschreven meetcampagne vond plaats in een gebied rondom Zeist, Driebergen en Amersfoort. Hierbij is gebruik gemaakt van een eerder ontwikkelde meet- en analyseaanpak voor houtrook, toegepast in de IJmondregio [1]. Het doel van de campagne was om met behulp van deze aanpak beter te begrijpen waar en wanneer houtrook optreedt, om daarmee handvatten te bieden voor gemeenten bij het gericht ontwerpen van beleid op dit thema.

Voor deze meetcampagne zijn zeer nauwkeurige metingen uitgevoerd op een centrale meetlocatie, de referentielocatie, en met fijnstofsensoren bij inwoners thuis. Op de referentielocatie, die halverwege de meetcampagne is verplaatst van Zeist naar Amersfoort, zijn continue metingen uitgevoerd van fijnstof en roet. Op basis hiervan zijn perioden met detecteerbare aanwezigheid van houtrook geïdentificeerd. In de rest van dit rapport worden deze perioden “houtrookmomenten” genoemd. Daarnaast is de bijdrage van houtstook aan de continu gemeten fijnstofconcentraties op de referentielocatie geschat door op de houtrookmomenten de verhouding tussen de gemeten roet- en fijnstofconcentraties te bepalen en vervolgens de gemeten roetconcentraties hiermee te schalen. Deze methode wordt in het volgende hoofdstuk in meer detail uitgelegd. Ten slotte zijn op de referentielocatie ook iedere 24 uur filtermonsters genomen, op basis waarvan na afloop in het laboratorium de concentratie levoglucosan in de lucht tijdens de meetdagen is bepaald. Levoglucosan is een specifieke tracer voor houtrook, waarmee de aanwezigheid van houtrook per dag gecontroleerd kan worden.
Met het netwerk van 60 fijnstofsensoren van inwoners in het onderzoeksgebied is de ruimtelijke variatie in totale fijnstofconcentraties, en daarmee de verspreiding van houtrook tijdens houtrookmomenten in beeld gebracht. Hiermee is onderzocht of en in welke mate verschillen tussen door sensoren gemeten fijnstofwaarden inzicht geven in lokale verschillen in blootstelling binnen en tussen gemeenten. Ook was het een experiment om te onderzoeken wat nodig is om als gemeente sensoren actief in te zetten voor detectie van houtrook.

De centrale onderzoeksvragen bij deze studie waren:

- Wat is de bijdrage van houtstook aan de fijnstofconcentraties op de referentielocaties in Zeist en Amersfoort?
- Hoe varieert deze bijdrage over de tijd?
- Zijn er lokale verschillen zichtbaar in de fijnstofmetingen van het sensornetwerk tijdens houtrookmomenten, en kunnen deze worden gebruikt om de verspreiding te duiden?
- In hoeverre blijkt, op basis van de bevindingen in dit project, de toegepaste meetmethode geschikt voor detectie van houtrook in dit type bosrijk, landinwaarts gelegen gebied?

Deze studie biedt daarmee een beter onderbouwd inzicht in de rol van houtstook in de lokale luchtkwaliteit in de provincie Utrecht en legt een basis voor verdere monitoring en beleidsontwikkeling.

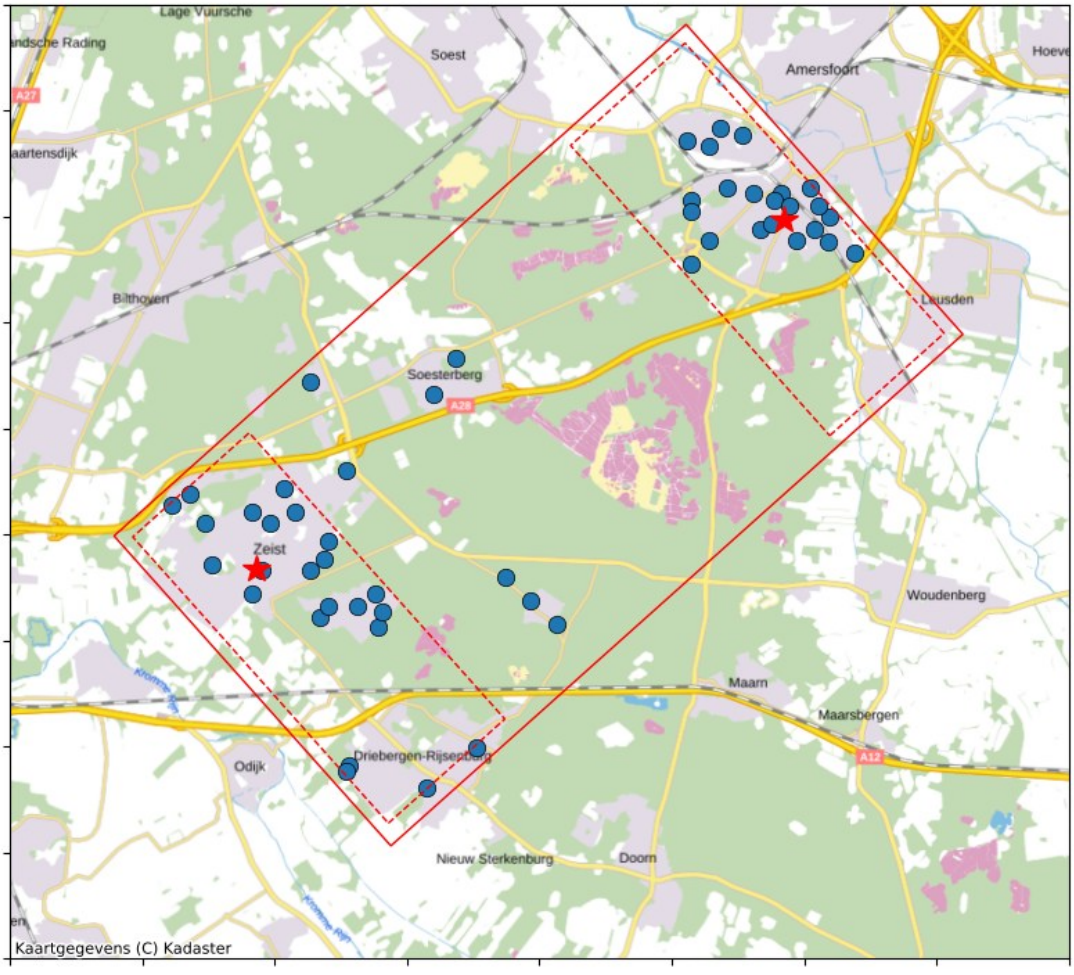
Samenwerking Samen Houtstook Meten

Dit project is onderdeel van Samen Houtstook Meten, een initiatief van de Provincie Utrecht, de gemeenten Amersfoort, Zeist en Utrechtse Heuvelrug, TNO en Samen Meten Utrecht. Het project wordt mede gefinancierd vanuit het Schone Lucht Akkoord. Het project is een vorm van “citizen science”: inwoners en wetenschappers werken samen aan onderzoek. Door gegevens te verzamelen op veel verschillende plekken tegelijk, krijgen we beter inzicht in de lokale luchtkwaliteit. De resultaten helpen inwoners én beleidsmakers om stappen te zetten richting een schonere en gezondere leefomgeving.

2 Opzet van de metingen

2.1 Onderzoeksgebied en meetperiode

Het onderzoek is uitgevoerd in de provincie Utrecht, met specifieke focus op de regio rondom Zeist, Driebergen en Amersfoort, te zien in Figuur 2.1. Dit gebied kenmerkt zich door een combinatie van stedelijke en meer landelijke, bosrijke omgevingen. Hiermee vormt het een geschikt studiegebied om de verspreiding van houtrook in een verder van de kust gelegen gebied met variërende dichtheid van bewoning en natuur te bestuderen.



Figuur 2.1: Het projectgebied omvat (delen van) Zeist, Driebergen en Amersfoort. De referentielocatie is gedurende de meetperiode verplaatst van Zeist naar Amersfoort (rode sterren, onder en boven respectievelijk). De $PM_{2.5}$-sensoren (blauwe bolletjes) hebben fijnstof gemeten gedurende de volledige meetperiode van half november 2025 tot en met half april 2026.

De meetcampagne vond plaats in het stookseizoen 2025–2026. TNO heeft hierbij referentiemetingen uitgevoerd op twee opeenvolgende referentielocaties. Aan de Steniaweg in Zeist (Figuur 2.2) zijn metingen verricht van 13 november 2025 tot 3 februari 2026. Tijdens

deze 82 dagen is de buitentemperatuur overwegend onder de 10 ºC geweest en de windsnelheid onder de 2 m/s. Zie voor het verloop van windsnelheid en temperatuur ook de figuren in Bijlage A. Bij dergelijke weerscondities wordt er over het algemeen meer gestookt en blijft de rook lokaal ook meer hangen [2], [3]. Hierdoor wordt er een relatief hoog aantal houtrookmomenten verwacht in deze meetperiode. Na de metingen in Zeist is de meetopstelling verplaatst naar de Graaf Hendriklaan in Amersfoort. Hier zijn metingen uitgevoerd van 3 februari 2026 tot en met 14 april 2026. Tijdens de 71 meetdagen aan de Graaf Hendriklaan in Amersfoort was de windsnelheid vergelijkbaar met die in Zeist, maar vanaf half februari ging de temperatuur omhoog. Hierdoor worden er op de locatie in Amersfoort minder houtrookmomenten verwacht. Gedurende de volledige periode van 13 november 2025 tot en met 14 april 2026 is er ook gemeten met $PM_{2.5}$ sensoren op circa 60 meetlocaties in het onderzoeksgebied. Zowel de metingen op de centrale meetlocaties als de sensormetingen worden in de volgende secties verder toegelicht.



Figuur 2.2: Foto van de meettrailer op de meetlocatie in Zeist.

De detecteerbaarheid van houtrook, zowel door de sensoren als op de referentielocatie, hangt niet alleen af van de stookintensiteit, maar ook van het weer. Bij sterke wind zijn de fijnstof- en roetconcentraties in de lucht lager, doordat de verontreinigende stoffen in de lucht meer verdund worden. Dit soort momenten vallen buiten de criteria van houtrookmomenten[1], zoals hierna beschreven wordt in §2.2. Tegelijkertijd is ook de blootstelling van de inwoners daadwerkelijk lager op deze momenten door de lagere concentraties fijnstof. Omdat deze aanpak met name bedoeld is om de houtrookbijdrage aan de blootstelling van inwoners te bepalen, is de onderschatting van de totale duur van de houtrookemissies die hierdoor ontstaat gerechtvaardigd. Echter, als op basis van deze data een vergelijking gemaakt zou worden met

[1] De criteria voor de houtrookmomenten zijn op basis van concentratiegrenswaarden van met name roet.

emissiewaarden voor houtstook dan is een correctie voor de gemiste houtstookbijdragen bij harde wind noodzakelijk [2].

2.2 Referentiemetingen

De centrale meetlocatie vervult meerdere functies binnen de meetopzet. Ten eerste dient deze als referentie voor de identificatie van houtrookmomenten in het gebied op basis van betrouwbare metingen van roet en fijnstof. Ten tweede wordt de combinatie van roet- en fijnstofmetingen gebruikt om de bijdrage van houtrook aan de gemeten fijnstofconcentraties ($PM_{2.5}$) te kwantificeren. Ten derde worden de metingen gebruikt voor de kalibratie en interpretatie van de data van de (bij het project behorende) fijnstofsensoren in het omliggende meetnetwerk. Tot slot borgt de analyse van de op de centrale locatie genomen filtermonsters de aanwezigheid van de houtrooktracer levoglucosan op houtrookmomenten als onafhankelijke controle. De exacte instrumentatie en inname en gebruik van filters worden verder toegelicht in Bijlage A.

Identificatie van houtrookmomenten

In de houtrookmeetaanpak die door TNO in de afgelopen jaren is ontwikkeld, worden houtrookmomenten geïdentificeerd op basis van een combinatie van continue metingen van fijnstof ($PM_{2.5}$) en roetconcentraties (black carbon) [1]. Voor elk uur wordt, op basis van een uurgemiddelde drempelwaarde van 5 µg/m^3 voor $PM_{2.5}$ en 2 µg/m^3 voor roet [3], bepaald of er sprake is van een houtrookmoment. Vervolgens wordt voor de uren direct voor en direct na een als houtrookmoment gelabeld uur gecheckt of de roetwaarde nog boven de 1 µg/m^3 is. De uren waarvoor dit het geval is, worden vervolgens toegevoegd aan het houtrookmoment om de volle breedte van de houtrookpiek in beeld te krijgen.

De selectie van houtrookmomenten op basis van dit criterium is gecontroleerd op basis van een vergelijking met levoglucosan (zie §3.1.4). Op dagen dat roet boven de 2 µg/m^3 uitkwam was er ook een duidelijke verhoging in levoglucosan te zien. Dit geeft verdere onderbouwing van de betrouwbaarheid van de selectiemethode.

Bepaling van de bijdrage van houtrook aan fijnstof ($PM_{2.5}$) per houtrookmoment

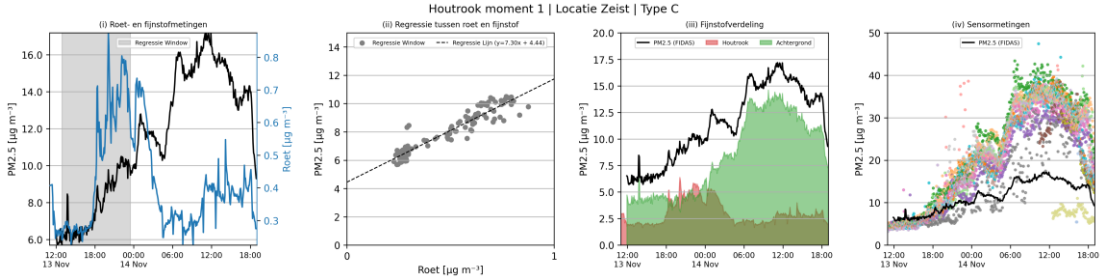
Als de houtrookmomenten zijn geïdentificeerd wordt voor elk houtrookmoment de bijdrage van houtrook aan de gemeten $PM_{2.5}$-concentraties bepaald, zie ook Figuur 2.3. De roetconcentraties worden hierbij geschaald om de bijdrage van houtrook aan de $PM_{2.5}$-concentraties te schatten. Deze aanpak is gebaseerd op de aanname dat emissies uit dezelfde bron over het algemeen een vergelijkbaar patroon in de tijd laten zien. Bij een verhoging of verlaging van roet uit houtstook zullen ook de fijnstofconcentraties die afkomstig zijn uit houtstook meebewegen.

De roetconcentraties moeten echter niet geschaald worden op basis van een gedeelte van het houtrookmoment waarvoor de bijdragen van andere bronnen aan de fijnstofconcentraties dominanter zijn dan houtrook. Daarom is voor elk houtrookmoment eerst bepaald op welk stukje in de tijd binnen het hele houtrookmoment de trends van roet en fijnstof het beste overeenkomen. Soms is dit het gehele houtrookmoment, maar het kan ook slechts een korte periode zijn, die meestal samenvalt met de tijdstippen waarop de roetconcentraties het hoogst

[2] De gemeten concentraties worden niet alleen beïnvloed door de wind, maar door het geheel aan meteorologische en ruimtelijke condities, ook bijvoorbeeld de hoogte van de atmosferische menglaag en de aanwezigheid van lokale grote obstakels in de directe omgeving spelen een rol in de verplaatsing van de lucht en de daaraan gerelateerde concentraties. Al deze effecten moeten meegenomen worden bij de koppeling van concentraties naar emissies.

[3] Hierbij wordt kanaal BC1 van de AE33 aethalometer gebruikt als typisch kanaal voor roet uit houtstook. De schaling van de roetwaarden wordt gedaan op het verschil tussen kanaal BC1 en BC6 van de aethalometer om te corrigeren voor eventuele bijdragen van verkeer aan roet.

zijn. In het voorbeeld in Figuur 2.3 en in Bijlage B zijn deze geselecteerde periodes, waarin de correlatie tussen roet en fijnstof het beste, is in grijs aangegeven.



Figuur 2.3: Voorbeeld van een houtrookmoment en de bijbehorende methode voor de achtergrondcorrectie. De hele tijdspanne van deze grafieken wordt beschouwd als één houtrookmoment. **(i)** Voor verkeer gecorrigeerde roetmetingen en fijnstofmetingen op de referentielocatie. In het grijze gebied komen de trends van roet en fijnstof ($PM_{2.5}$) het beste overeen. Dit gedeelte van de data wordt gebruikt voor het schalen van de roetmetingen om vervolgens de bijdrage van houtrook aan fijnstof te kunnen bepalen. **(ii)** Lineaire regressie voor het deel van de data in het grijze gebied in figuur (i). **(iii)** Fijnstofmetingen ($PM_{2.5}$, zwarte lijn). Het rode gevulde gebied is de geschatte bijdrage van houtrook aan de fijnstofconcentraties, bepaald op basis van schaling van de roetdata. Het groene gebied is de bijdrage van andere bronnen aan de fijnstofconcentraties. **(iv)** Fijnstofwaarden gemeten door de sensoren verspreid over het gebied (gekleurde stippen), vergeleken met de fijnstofmetingen op het referentiepunt (zwarte lijn).

Bij het zoeken naar het beste deel van het houtrookmoment om de roetwaarden te schalen is in eerste instantie gekeken of er een stukje is waar de determinatiecoëfficiënt (R^2) van de lineaire regressie van fijnstof tegen roet hoger is dan 0,8 (zie de tweede grafiek in Figuur 2.3). Voor de gevallen waarbij de selectie niet samenvalt met de roetpiek, is met de hand een selectie rondom de roetpiek gemaakt. Daarna is de fijnstofbijdrage van houtrook bepaald door de roetconcentraties te schalen met de verhouding fijnstof/roet in het geselecteerde gebied, bepaald aan de hand van de richtingscoëfficiënt van de lineaire regressie van fijnstof tegen roet. Het rode gebied in Figuur 2.3 paneel iii, toont de op deze manier geschaalde houtrookbijdrage voor dit specifieke houtrookmoment. Het groen gekleurde deel is het deel van de $PM_{2.5}$-concentraties dat achterblijft na aftrek van de houtrookbijdrage. Dit wordt toegekend aan de achtergrond/andere bronnen. Meer details over de manier van schalen, ook voor momenten waar geen goede correlatie op een deel gevonden werd en hoe dit opgelost is, zijn te vinden in Bijlage C. Na bepaling van de houtrookbijdragen voor de individuele houtrookmomenten kunnen vervolgens ook kengetallen voor de hele meetcampagne worden berekend, bijvoorbeeld het aantal dagen met daggemiddelde overschrijding van de EU-grenswaarden of WHO-advieswaarde van $PM_{2.5}$. Ook kan bijvoorbeeld bepaald worden op welke dagen er zonder de bijdrage van houtrook geen overschrijding was geweest.

2.3 Fijnstofmetingen van inwoners

Naast metingen op de referentielocaties is gebruikgemaakt van een netwerk van ongeveer 60 fijnstofsensoren van SODAQ Air. Deze zijn onder coördinatie van Samen Meten Utrecht geplaatst bij inwoners in het onderzoeksgebied rondom Zeist, Driebergen en Amersfoort (zie ook Figuur 2.1 en het kader hieronder). De sensoren hebben continu de $PM_{2.5}$-concentratie gemeten, met een tijdsresolutie van 5 minuten. Dit meetnetwerk is gebruikt om inzicht te krijgen in verschillen in houtrook gerelateerde fijnstofconcentraties voor verschillende wijken binnen de gemeenten Zeist, Amersfoort en Utrechtse Heuvelrug.

De fijnstofmeetwaarden van de referentielocatie zijn gevalideerd met onafhankelijke wegingen van de filters. De onzekerheid hierin is minimaal (zie Bijlage B). De fijnstofsensoren van inwoners meten echter een factor 1,5 tot 2 hogere waarden, ondanks dat het globale verloop van de gemeten fijnstofconcentraties met de SODAQ-sensoren wel vergelijkbaar is.
Om zoveel mogelijk te voorkomen dat een vaak voorkomende hoge meetwaarde van een fijnstofsensor op een bepaalde locatie niet het gevolg is van een verkeerde kalibratie is extra aandacht besteed aan de kalibratie van de sensoren op basis van de metingen op de referentielocatie.
Deze kalibratie is gedaan door een lineaire regressie uit te voeren tussen data van de sensoren en het referentie-instrument op momenten dat de concentraties over het gehele onderzoeksgebied onderling weinig verschilden (lage variantie). Dit zijn momenten waarop de sensoren bij benadering dezelfde uitslag zouden moeten geven. Daarnaast is bij de kalibratie rekening gehouden met temperatuur en luchtvochtigheid. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van deze aanpak zie Bijlage D.

Om inzicht te krijgen in de verspreiding van houtrook, is de tijdens de houtrookmomenten op de referentielocatie gemeten fijnstofdata vergeleken met gelijktijdige metingen van de sensoren in het netwerk (plaatje iv in Figuur 2.3). Op deze manier ontstaat een ruimtelijk beeld van de verspreiding van fijnstof uit houtrook in het onderzoeksgebied. De sensordata worden hierbij alleen gebruikt voor het identificeren van trends in ruimte en tijd, en niet zozeer voor de kwantitatieve bepaling van houtrook gerelateerde fijnstofconcentraties. Ook is gekeken of het algehele houtrookbeeld in een gemeente hetzelfde was op houtrookmomenten waarbij het centrale meetpunt in dezelfde gemeente geplaatst was en op houtrookmomenten waarop dit niet het geval was. Op deze manier kan ingeschat worden in hoeverre er op een locatie houtrookmomenten gemist worden als het centrale meetpunt verder weg staat. Dit geeft een indicatie hoeveel roetmeetpunten er in de toekomst nodig zouden zijn bij gebruik van deze methode om alle lokale stookmomenten op te pikken.

Samenwerking met inwoners
Binnen het project *Samen Houtstook Meten* hebben inwoners uit de gemeenten Amersfoort, Zeist en Utrechtse Heuvelrug bijgedragen aan het onderzoek door in de periode van november 2025 tot en met april 2026 fijnstof te meten. De samenwerking met inwoners werd tot stand gebracht dankzij ondersteuning van Samen Meten Utrecht.

In totaal meldden 238 inwoners zich aan voor deelname aan het project. Daarvan zijn 66 inwoners uit de drie gemeenten geselecteerd. Bij de selectie is onder meer gekeken naar de postcode van de deelnemers, zodat rekening kon worden gehouden met de afstand tot de TNO-meetkar en een goede spreiding van de meetlocaties over het onderzoeksgebied kon worden gerealiseerd. De deelnemers ontvingen op een locatie in hun eigen gemeente een SODAQ Air-meetsensor in bruikleen. Zij plaatsten de sensor zelf buitenshuis, bijvoorbeeld in de tuin, aan de gevel van een woning of op een balkon. De sensor meet continu de fijnstofconcentratie en stuurde de meetgegevens automatisch door naar het Samen Meten-portaal van het RIVM. Het RIVM heeft vervolgens ook de gedetailleerde sensordata ter beschikking gesteld aan TNO voor dit onderzoek.

Naast een startbijeenkomst in december 2025 vond op 5 maart 2026 een deelnemersbijeenkomst plaats met actieve inbreng van alle betrokkenen: inwoners, beleidsmakers en wetenschappers kwamen hier samen om kennis en ervaringen uit te wisselen en met elkaar in gesprek te gaan over houtstook en de mogelijke gevolgen daarvan voor de luchtkwaliteit.

Het project is een vorm van *citizen science*, waarbij inwoners en wetenschappers gezamenlijk bijdragen aan wetenschappelijk onderzoek. Door op veel verschillende locaties tegelijkertijd meetgegevens te verzamelen, ontstaat een beter beeld van de lokale luchtkwaliteit en de verschillen tussen locaties. De verzamelde gegevens en de resultaten van het onderzoek kunnen inwoners en beleidsmakers helpen om beter inzicht te krijgen in de luchtkwaliteit en om, waar nodig, stappen te zetten naar een schonere en gezondere leefomgeving.

3 Resultaten

Dit hoofdstuk is onderverdeeld in twee delen. In §3.1 worden achtereenvolgens de resultaten van de centrale meetpunten in Zeist en Amersfoort gepresenteerd. Hierbij wordt ingegaan op de selectie van de houtrookmomenten, de bepaling van het aandeel van houtrook in fijnstof en de kengetallen. In §3.2 wordt dieper ingegaan op de metingen van inwoners waarbij met name wordt gekeken naar de verspreiding van houtrook in de gemeenten Utrechtse Heuvelrug, Zeist en Amersfoort.

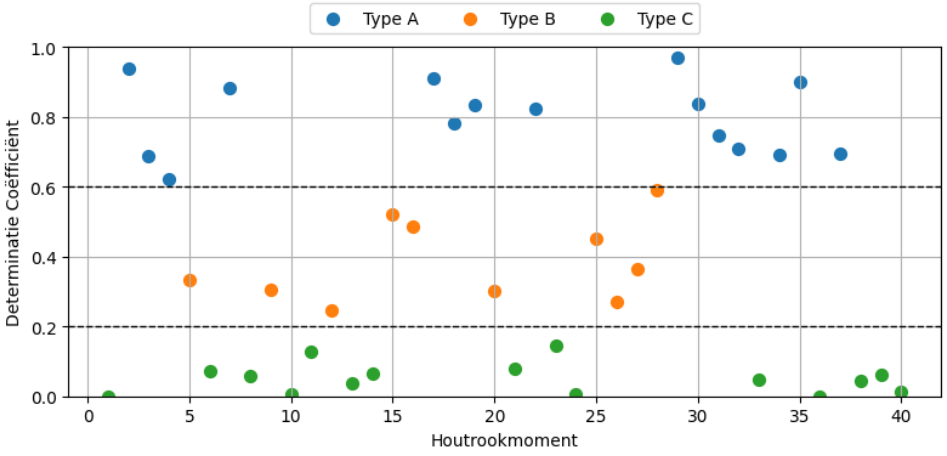
3.1 Metingen op de referentielocaties

3.1.1 Selectie houtrookmomenten

In totaal zijn er tijdens de meetperiode 40 houtrookmomenten geïdentificeerd, waarvan 28 tijdens de meetperiode in Zeist en 12 in Amersfoort. Een aantal van deze houtrookmomenten is daarna opgeknipt in kortere momenten (zie §3.1.2). Zoals eerder beschreven betreffen dit momenten waarop de uurgemiddelde drempelwaarde van 5 µg/m^3 voor $PM_{2.5}$ en 2 µg/m^3 voor roet (voor verkeerscorrectie, zie Bijlage C) worden overschreden, aangevuld met de omliggende uren waarvoor de roetconcentratie boven de 1 µg/m^3 is.

Op basis van hoe goed deze correlatie is tussen fijnstof en roet, konden de houtrookmomenten gesorteerd worden in drie categorieën A, B en C:

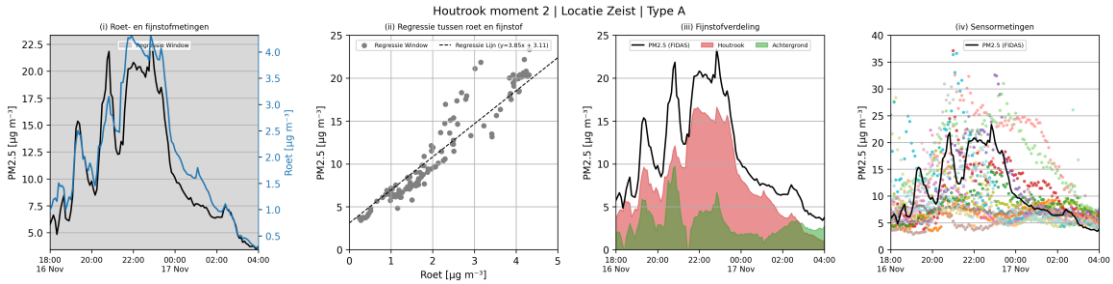
- Op **type A momenten** is de correlatie tussen de roet- en fijnstofdata gedurende vrijwel het gehele houtrookmoment hoog. De determinatiecoëfficiënt R^2 voor de lineaire regressie van fijnstof tegen roet ligt boven de 0,6.
- Voor **type B momenten** zijn er ook verhogingen van fijnstof zichtbaar die niet overeenkomen met de trend in de roetconcentraties. Deze zijn waarschijnlijk afkomstig uit andere bronnen. De determinatiecoëfficiënt R^2 ligt tussen de 0,2 en 0,6.
- Op **type C-momenten** is de waarde van de determinatiecoëfficiënt R^2 zeer laag (≤0,2). Roet en fijnstof vertonen gedurende een groot deel van de periode niet hetzelfde verloop, maar roet ligt wel boven de drempelwaarde. Fijnstof vanuit andere bronnen levert een relatief grote bijdrage.



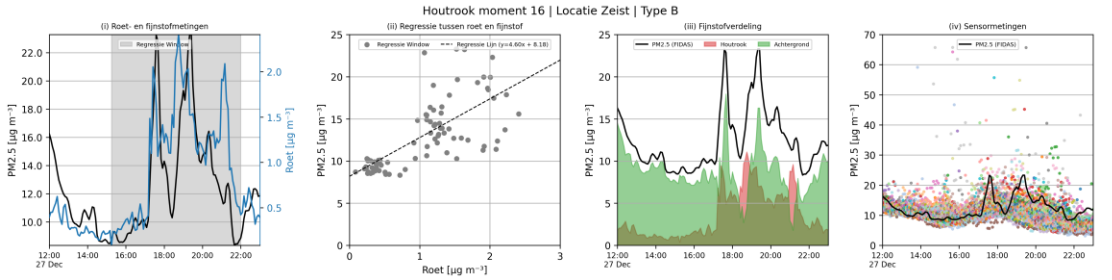
Figuur 3.1: Verdeling van determinatiecoëfficiënten (R^2) voor alle houtrookmomenten per type.

Dit resulteert in de verdeling van typen houtrookmomenten gegeven in Figuur 3.1. De verdeling over de verschillende typen is ongeveer gelijk. In Figuur 3.2 zijn enkele voorbeelden gegeven van de meetgegevens op houtrookmomenten tijdens deze meetcampagne verdeeld naar type om inzichtelijk te maken wat een goede en slechte correlatie in de praktijk betekent.

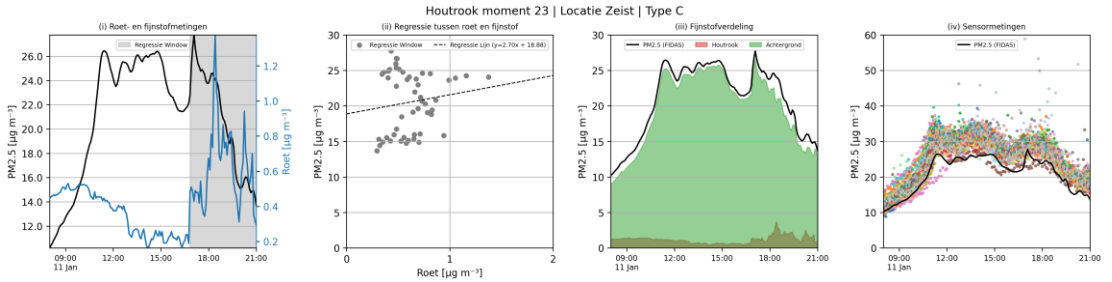
Type A: Alle fijnstofmeetwaarden correleren goed met roet



Type B: De correlatie tussen roet en fijnstof is voor een deel goed



Type C: Houtrookmoment op basis van roet, correlatie met fijnstof is zeer beperkt



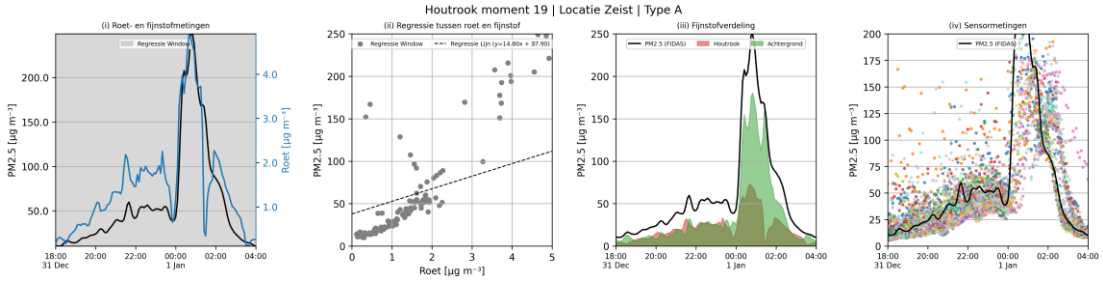
Figuur 3.2: Voorbeelden van drie verschillende typen houtrookmomenten tijdens de campagne in Zeist. Er zijn kwalitatief drie typen momenten te onderscheiden. **Type A:** goede correlatie voor het hele moment. **Type B:** goede correlatie voor een deel van het moment, genoeg voor schaling. **Type C:** goede correlatie voor maar een zeer beperkt aantal meetpunten. Voor toelichting van de verschillende grafieken zie §2.2.

3.1.2 Beoordeling houtrookmomenten

Na selectie zijn de 40 gevonden houtrookmomenten kwantitatief en kwalitatief beoordeeld, zoals eerder beschreven in §2.2. Voor het merendeel van de waargenomen gebeurtenissen kon er een plausibel onderscheid worden gemaakt tussen de bijdrage van houtrook en van andere bronnen aan de $PM_{2.5}$-concentraties, op basis waarvan het houtrookpercentage in fijnstof bepaald kon worden.

Een kwalitatieve beoordeling van de houtrookmomenten laat zien dat de meeste houtrookmomenten passen binnen het verwachte stookgedrag. In 38 van de 40 gevallen wordt een verhoging van het roetsignaal waargenomen in de avonduren, vanaf ongeveer 18:00 uur, gevolgd door een geleidelijke afname gedurende de nacht en vroege ochtend.

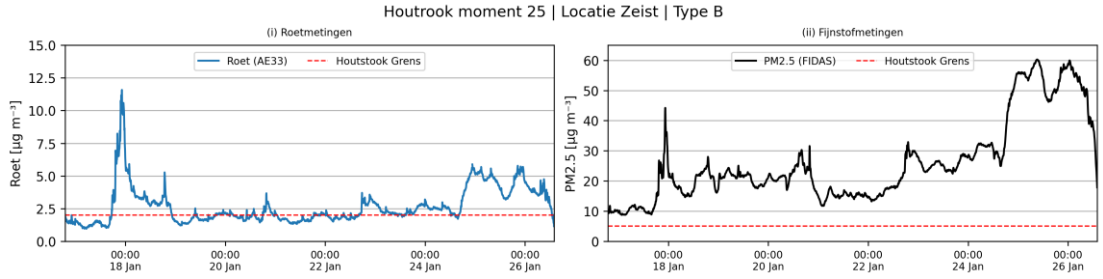
Tijdens de meetcampagne zijn er een aantal incidenten geweest die mogelijk ook invloed hebben gehad op de gemeten roetconcentraties. Dit zijn een brand in een stapel toiletrollen in Zeist op 24 november 2025 (houtstookmoment 9), de nasleep van een grote brand bij een metaalverwerkingsbedrijf in Bunnik in december 2025 (houtstookmoment 13), de vuurwerkemissies tijdens de jaarwisseling (houtstookmoment 19, zie Figuur 3.3) en een woningbrand in Amersfoort op 5 februari 2026 (houtstookmoment 30). De gebruikte methode is in principe gevoelig voor alle soorten brand en niet uitsluitend voor residentiële houtrook. De invloed van deze incidenten is inderdaad zichtbaar in het verloop van de gemeten roetconcentraties in genoemde periodes.



Figuur 3.3: Tijdens de meetcampagne zijn er mogelijk een aantal andersoortige bronnen die eveneens een bijdrage kunnen leveren aan de gemeten roetconcentraties. Een goed voorbeeld hiervan is de vuurwerkpiek tijdens oud en nieuw.

Daarnaast zijn bij zes gebeurtenissen duidelijke ochtendpieken van roet waargenomen, die mogelijk samenhangen met verkeer of andere lokale bronnen, waarvan vijf tijdens de meetperiode in Amersfoort. De meettrailer stond daar langs de relatief drukke Leusderweg, in een omgeving met winkels en logistieke activiteiten. Hierdoor is het waarschijnlijk dat incidentele verkeersbronnen, zoals laad- en losactiviteiten van vrachtverkeer, hebben bijgedragen aan de gemeten roetpieken. Deze observatie benadrukt het belang van een zorgvuldige locatiekeuze voor toekomstige metingen met roetsensoren.

Bij vijf houtrookmomenten zijn meerdere opeenvolgende dagen met verhoogde concentraties aan elkaar gekoppeld doordat tussen de pieken de roetconcentraties continu boven de 1 µg/m^3 waren. Zowel binnen de Type B- als Type C-categorie komen dergelijke meerdaagse houtrookmomenten voor. Om deze houtrookmomenten toch kwantitatief te kunnen analyseren zijn ze handmatig opgeknipt in losse dagen, met telkens de knip op 12:00 uur ‘s middags.



Figuur 3.4: Voorbeeld van een houtrookmoment waarbij meerdere dagen aan elkaar gekoppeld zijn. Hier is dit meer dan een week het geval. Ook levoglucosan is tijdens deze periode verhoogd, zie §3.1.4, dus het is wel degelijk houtrook. Dit is uitzonderlijk, maar laat wel zien dat houtrook lang aanwezig kan zijn in de leefomgeving.

3.1.3 Kengetallen voor houtrookbijdrage aan fijnstof

Na de bepaling van de bijdrage van houtrook aan fijnstof per houtrookmoment kunnen kengetallen berekend worden voor de hele meetperiode door de bijdragen bij elkaar op te tellen. De set van gevonden houtrookmomenten is hiervoor eerst opgeschoond:

- De 4 momenten (9, 13, 19, 30) die duidelijk werden gedomineerd door externe bronnen zoals branden of vuurwerk zijn niet meegenomen als bijdragen van houtrook in het totaal.
- Voor de mogelijke verkeersinvloeden (op 6 momenten), zichtbaar door verhoogde roetconcentraties in de ochtend, is gecorrigeerd door gebruik te maken van het verschil tussen twee roetmeetkanalen bij de bepaling van de fijnstofbijdrage. Zie Bijlage C voor meer detail over deze correctie.
- De overlappende meerdaagse gebeurtenissen zijn opgesplitst in 24-uursblokken van 12:00 tot 12:00 uur ‘s middags en vervolgens als losse houtrookmomenten geanalyseerd voor de bepaling van de kengetallen.

Bij de optelling is verder aangenomen dat alle houtrookbijdragen aan de fijnstofconcentratie volledig binnen de geïdentificeerde houtrookmomenten vallen en het totaal aan mogelijke gemiste houtrookuren verwaarloosbaar is[4].

Tabel 3.1: Algemene kengetallen van het centrale meetpunt in Zeist en Amersfoort.

Kengetallen	**Steniaweg, Zeist**	**Graaf Hendriklaan, Amersfoort**
Aantal meetdagen [5]	71 dagen	72 dagen
Aantal houtrookmomenten (incl. opgesplitste momenten)	43	15
Percentage uren met houtrookdetectie op totaal aantal uren	42,7%	14,1%
Gemiddeld percentage $PM_{2.5}$ door houtrook op houtrookmomenten	27,4%	17,6%
Percentage $PM_{2.5}$ door houtrook in alle $PM_{2.5}$	17,4%	5,3%

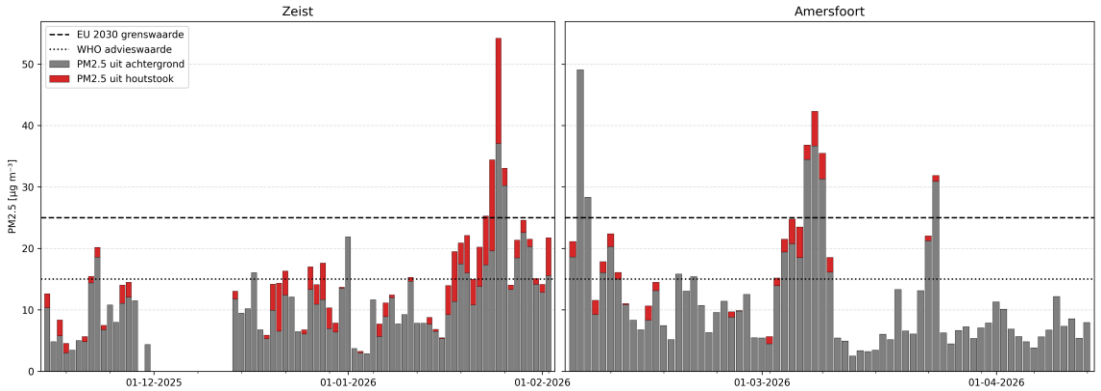
Tabel 3.1 geeft de kengetallen van de metingen op de referentielocaties. Tijdens de koudere periode in Zeist zijn meer houtrookmomenten geïdentificeerd dan in de wat warmere periode daarna in Amersfoort. De gemiddelde berekende houtrookbijdrage aan de fijnstofconcentraties op een houtrookmoment is ook hoger aan de Steniaweg in Zeist dan aan de Graaf Hendriklaan in Amersfoort, respectievelijk 27,4% en 17,6%. Het verschil is nog groter voor de totale bijdrage van houtstook aan $PM_{2.5}$ in de hele periode, waarbij er een bijdrage van 17,4% gevonden wordt op de referentielocatie in Zeist en 5,3% in Amersfoort.
Het lagere totaalpercentage in Amersfoort is op basis van de cijfers te wijten aan een combinatie van een lager aantal stookmomenten, waarschijnlijk door hogere buitentemperatuur, en een lager aandeel van houtrook in de fijnstofconcentraties op de houtrookmomenten, door lagere stookintensiteit in de nabije omgeving van de twee meetlocaties. Beide effecten zijn mogelijk indirect het gevolg van de hogere buitentemperatuur, maar een lager aantal stookmomenten en de lagere intensiteit kunnen mogelijk ook het gevolg

[4] In eerder werk [1] werd dit geschat op minder dan 5% van de houtrookuren aan mogelijk gemiste uren en minder dan 2% van de integrale aan houtrook toekenbare fijnstofconcentraties.
[5] Dit is het aantal dagen dat er ook $PM_{2.5}$-metingen beschikbaar waren.

zijn van het beleid in Amersfoort om stoken bij code rood te verbieden. Echter, omdat meerdere factoren van invloed kunnen zijn op gemeten concentraties, kan het verschil niet eenduidig enkel hieraan toegekend worden.
Door de selectiecriteria voor de houtrookmomenten en de relatief ruime achtergrondcorrectie is het de verwachting dat de methode een lichte onderschatting van de daadwerkelijke bijdrage van houtrook aan het fijnstof geeft. In eerder werk werd de onzekerheid van de berekende houtstookbijdrage aan fijnstof ingeschat op ongeveer 30% relatief [1]. Door de hogere achtergrondbijdrage in dit gebied zal deze onzekerheid naar verwachting nog iets hoger zijn. Verder onderzoek is gaande om de bepaling van absolute waarden met de methode verder aan te scherpen.

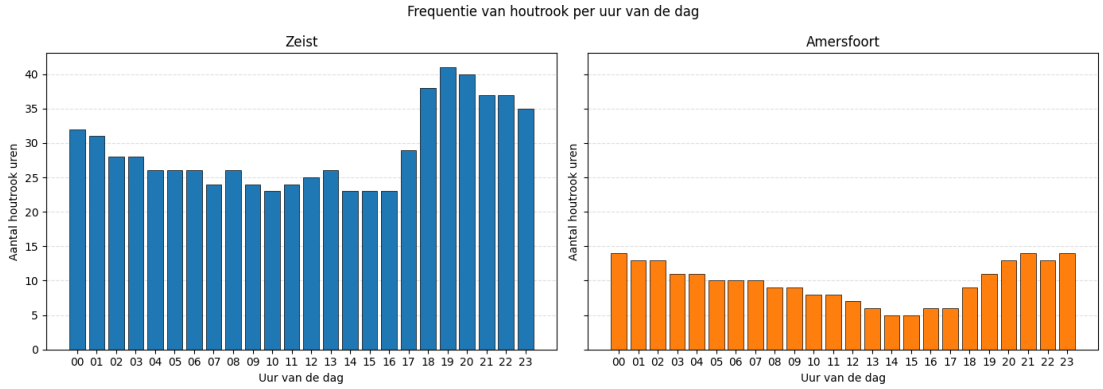
Tabel 3.2: Overschrijdingen van de EU- en WHO-grenswaarden in Zeist en Amersfoort.

	Steniaweg, Zeist		**Graaf Hendriklaan, Amersfoort**	
	Totaal	**Door houtstook**	**Totaal**	**Door houtstook**
Aantal overschrijdingen van de daggemiddelde 2030 EU-grenswaarde voor $PM_{2.5}$ (25 µg/m^3)	4	2	6	0
Aantal overschrijdingen van de daggemiddelde WHO-advieswaarde voor $PM_{2.5}$ (15 µg/m^3)	22	9	18	1



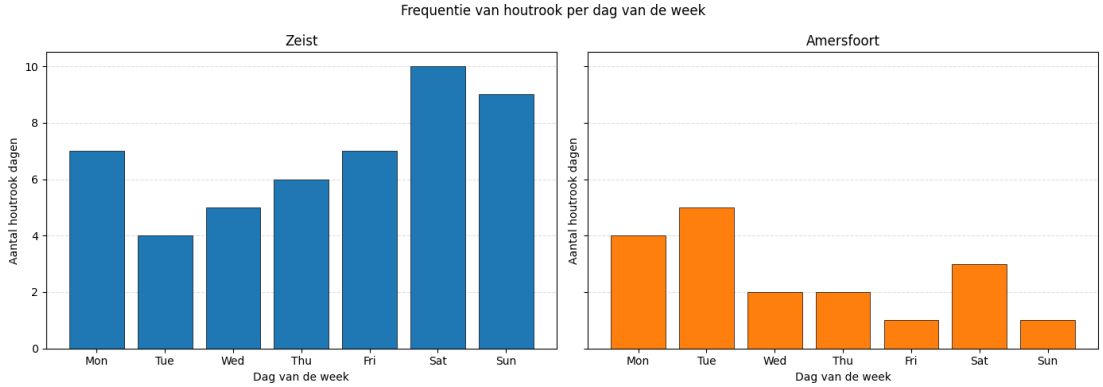
Figuur 3.5: Gemiddelde dagelijkse $PM_{2.5}$ concentraties gemeten aan de Steniaweg in Zeist (links) en aan de Graaf Hendriklaan in Amersfoort (rechts) gedurende de campagne. Grijs laat de gemiddelde achtergrondconcentratie zien, en rood de gemiddelde concentratie uit houtrook.

Het is echter duidelijk dat een aantal overschrijdingen van de EU-norm of de WHO-advieswaarde voor $PM_{2.5}$ er niet was geweest zonder de bijdrage van houtstook, zie Tabel 3.2 Zonder de in Figuur 3.5 rood gemarkeerde houtrookbijdragen zou de fijnstofconcentratie in de lucht voor een deel van de dagen tijdens de campagne onder de WHO-advieswaarde en, in sommige gevallen, zelfs onder de EU-norm vallen.



Figuur 3.6: Aantal als houtrook geïdentificeerde uren gedurende de hele campagne als functie van het uur van de dag. Links voor Zeist en rechts voor Amersfoort.

Figuur 3.6 laat het verloop zien van de detectiefrequentie van houtrook voor de verschillende uren van de dag over de hele meetcampagne. Voor al deze uren is de gemiddelde roetconcentratie boven de 1 µg/m^3. Voor Zeist en Amersfoort is een vergelijkbare trend zichtbaar: rond 17:00 uur begint de houtrookfrequentie op te lopen, waarna deze rond 22:00 uur 's avonds weer langzaam begint te dalen. Dit is consistent met het aansteken van de kachel in de avonduren, waarna de kachels langzaam uitdoven maar roet nog langer in de lucht blijft hangen.



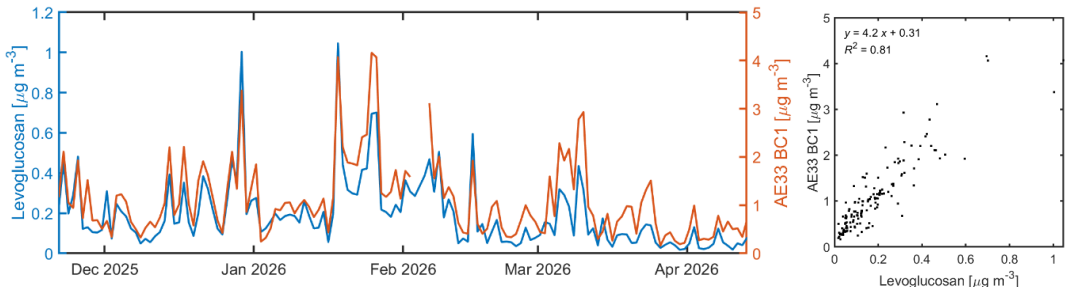
Figuur 3.7: Aantal dagen met geïdentificeerde houtrookmomenten gedurende de hele campagne per dag van de week. Links voor Zeist en rechts voor Amersfoort.

Figuur 3.7 geeft de verdeling van houtrookmomenten over de dagen van de week. De verdeling over de dagen laat voor de meetperiode in Zeist het verwachte patroon zien, waarbij met name in de weekenden gestookt wordt. Voor de meetperiode in Amersfoort wijkt het patroon af, hier zijn maandag en dinsdag de meest voorkomende weekdagen. Dit kan verschillende redenen hebben. Mogelijk is de statistiek niet toereikend, omdat in de periode in Amersfoort in totaal minder houtrookmomenten zijn geïdentificeerd. Een andere mogelijke verklaring is dat in Amersfoort meer wordt gekeken naar de stookwijzer, waardoor de stookmomenten meer gaan correleren met de weersomstandigheden dan met de dag van de week (weekend of geen weekend). Dit laatste maakt de weektrend willekeuriger van vorm.

3.1.4 Controle op de aanwezigheid van levoglucosan

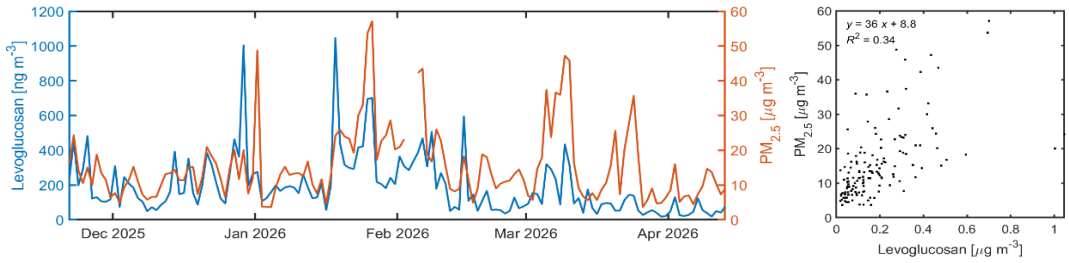
Zoals eerder beschreven zijn er tijdens de meetcampagne iedere dag filters beladen met $PM_{2.5}$. Deze filters zijn vervolgens, na weging ter ijking van de fijnstofmetingen op de referentielocatie,

gebruikt om de hoeveelheid levoglucosan in het fijnstof te bepalen. Levoglucosan wordt vaak gezien als de belangrijkste tracer voor biomassaverbranding in de atmosfeer [2], [3].
De houtrookmomenten binnen deze studie worden (met name) geselecteerd op basis van de aanwezige roetconcentratie. Om te controleren of deze selectie op basis van roet gerechtvaardigd is voor de identificatie van houtrookmomenten, zijn de daggemiddelde waarden van roet- en levoglucosan met elkaar vergeleken, zie Figuur 3.8. Levoglucosan en roet laten een hoge onderlinge correlatie zien ($R^2 > 0,8$). Dit ondersteunt het gebruik van roet als vervangende houtrooktracer voor levoglucosan, wat de detectie van houtrook aanzienlijk vereenvoudigt. Indien andere roetbronnen een substantiële en onafhankelijk variërende bijdrage aan het gemeten roetsignaal zouden leveren, zou deze correlatie naar verwachting aanzienlijk lager zijn.
De sterke correlatie kan worden verklaard doordat zowel veel levoglucosan als roet vrijkomt bij houtverbranding [4]. Bij gelijktijdige houtstook in meerdere woningen zullen onder stabiele meteorologische omstandigheden gedurende meerdere uren verhoogde concentraties van beide componenten ontstaan. Roet uit verkeer vertoont doorgaans pieken tijdens de ochtend- en avondspits, maar is veel minder aanwezig gedurende de rest van de dag. Houtstook domineert hiermee klaarblijkelijk de tijdsafhankelijkheid van roetconcentraties in de winter. Voor toepassing van roet als houtrooktracer blijft het echter wenselijk om roetmeetpunten niet direct langs drukke verkeerswegen te plaatsen.



Figuur 3.8: Vergelijking van filtermetingen van levoglucosan en daggemiddelde waarden van roet (AE33 BC1). **Links:** tijdsserie van beide meetwaarden. **Rechts:** regressieanalyse van roet vs. levoglucosan.

Ter illustratie is eenzelfde vergelijking gemaakt voor levoglucosan en $PM_{2.5}$ (zie Figuur 3.9). Doordat $PM_{2.5}$ ook veel andere bronnen heeft, naast houtstook, is hierbij de correlatie veel minder ($R^2 = 0,34$)[6].

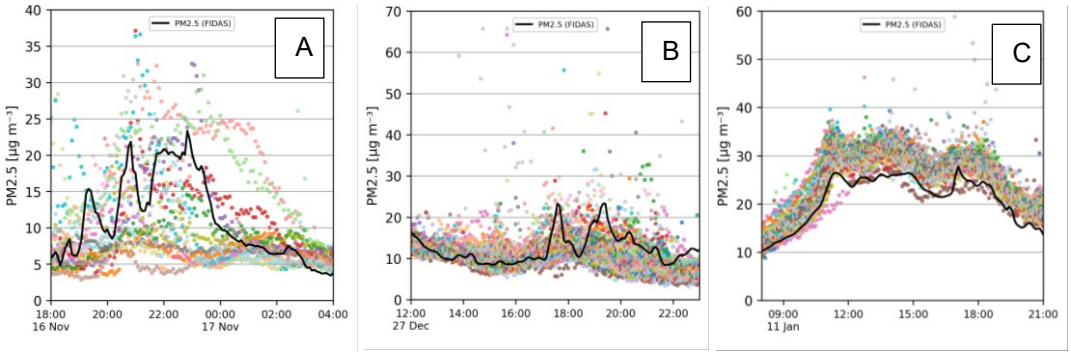


Figuur 3.9: Vergelijking van filtermetingen van levoglucosan en daggemiddelde waarden van $PM_{2.5}$. **Links:** tijdsserie van beide meetwaarden. **Rechts:** regressieanalyse van $PM_{2.5}$ vs. levoglucosan. De correlatie tussen levoglucosan en $PM_{2.5}$ is duidelijk lager dan voor levoglucosan en roet.

[6] De correlatie met $PM_{2.5}$ is wel hoger dan in eerdere houtrookmeetcampagnes [1}. Dit komt waarschijnlijk doordat de vorige campagnes dichter bij de kust zijn uitgevoerd, waar het harder waait. In Utrecht blijft de lucht meer hangen waardoor er zich ook meer houtrook in de vlakkere achtergrondconcentraties buiten de piekmomenten zal bevinden. Dit komt ook naar voren in §**Error! Reference source not found.**.

3.2 Verspreiding van fijnstof

3.2.1 Verspreiding van houtrook op de verschillende typen houtrookmomenten

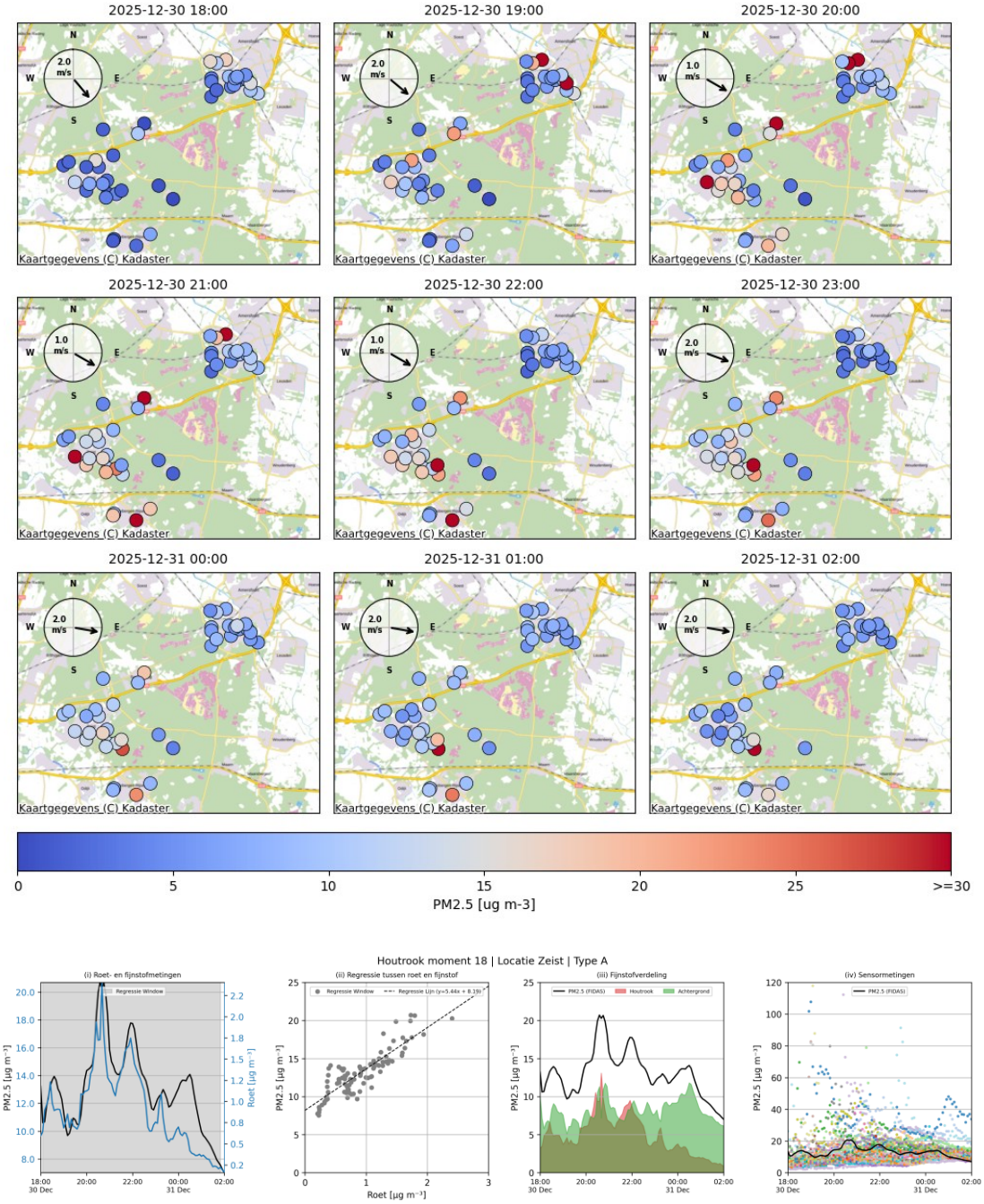


Figuur 3.10: Metingen van de fijnstofsensoren van inwoners (verschillende kleuren) vergeleken met de fijnstofmetingen op het centrale meetpunt (zwarte lijn, FIDAS). Van links naar rechts voor een type A, B en C moment. Dit zijn de houtrookmomenten uit Figuur 3.2.

In Figuur 3.10, en in de meest rechtse grafiek van alle weergaven van houtrookmomenten, zijn met verschillende kleuren de gekalibreerde $PM_{2.5}$ metingen van de fijnstofsensoren in het gebied weergegeven, met in zwart de $PM_{2.5}$-referentiewaarden. Globaal laten de sensoren hetzelfde verloop van de $PM_{2.5}$ concentraties in de tijd zien als het referentie instrument, met een bandbreedte van ongeveer 7 µg/m^3. Boven op dat verloop is echter in bepaalde perioden een grote variatie in de fijnstofwaarden te zien, met uitschieters tot wel 50 µg/m^3 boven de bandbreedte. Dit effect is het grootst voor het type A moment, maar ook voor de type B en C momenten in Figuur 3.10 zijn dit soort uitschieters goed te onderscheiden, met name tijdens typische houtstookuren. De hoogte van de lokale fijnstofconcentratie is op deze momenten (zeer waarschijnlijk) afhankelijk van het stookgedrag in de directe omgeving van de sensor, waardoor er een grote spreiding in de door omwonenden gemeten fijnstofconcentraties ontstaat. Door de spreiding in de fijnstofwaarden op deze tijdstippen op een kaart weer te geven, kunnen locaties die vaak aan houtrook blootgesteld worden in beeld gebracht worden. In deze paragraaf wordt het ruimtelijke beeld dat hierbij voor de drie typen houtrookmomenten ontstaat in meer detail toegelicht.

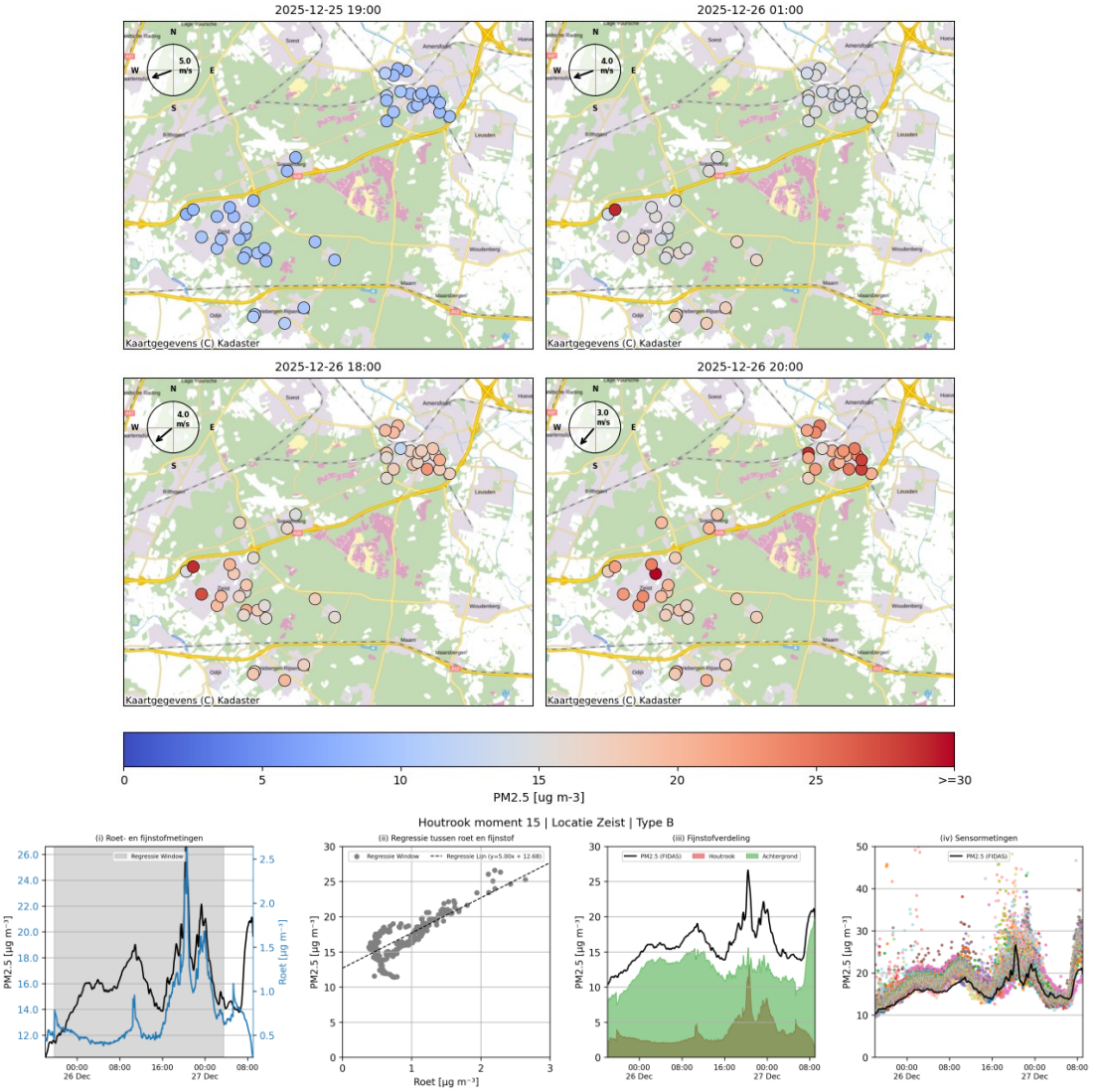
Figuur 3.11 (hieronder) laat een doorloop per uur zien van de verdeling van de sensorwaarden over het onderzoeksgebied voor een **type A** houtrookmoment (nummer 18). Tijdens deze periode is een groot deel van het gemeten fijnstof toe te kennen aan houtrook en is er een grote spreiding van de sensormeetwaarden te zien met veel hoge uitschieters. Dit was waarschijnlijk een avond waarop het aantrekkelijk was om de kachel aan te steken. De geobserveerde spreiding correspondeert vervolgens met wanneer er in de buurt van een sensor één of meerdere kachels aangestoken worden.
Het was inderdaad koud op de dag van het voorbeeld, rond de 1 ºC. Gedurende het hele houtrookmoment was de windsnelheid laag met 1-2 m/s. Dit heeft tot gevolg dat de rook blijft hangen en de fijnstofconcentraties oplopen. De fijnstofconcentraties lopen tijdens dit houtrookmoment ook inderdaad op specifieke locaties op (rood), waarna ze aan het eind van het houtrookmoment weer dalen (blauw).
Direct na het aansteken van een kachel komt een flinke fijnstofemissie vrij, die langzaam afneemt in de tijd, en kort toeneemt als er een extra blok hout op het vuur gegooid wordt. Aangezien niet alle kachels op hetzelfde moment worden aangestoken en dit ook nog op

verschillende locaties plaatsvindt, zorgt dit voor het geobserveerde chaotische spreidingspatroon in de sensormetingen.



Figuur 3.11: Uur-tot-uurweergave van de fijnstofmetingen in het gebied aan de hand van de sensoren van inwoners voor een **type A** moment op de avond van 30 december.

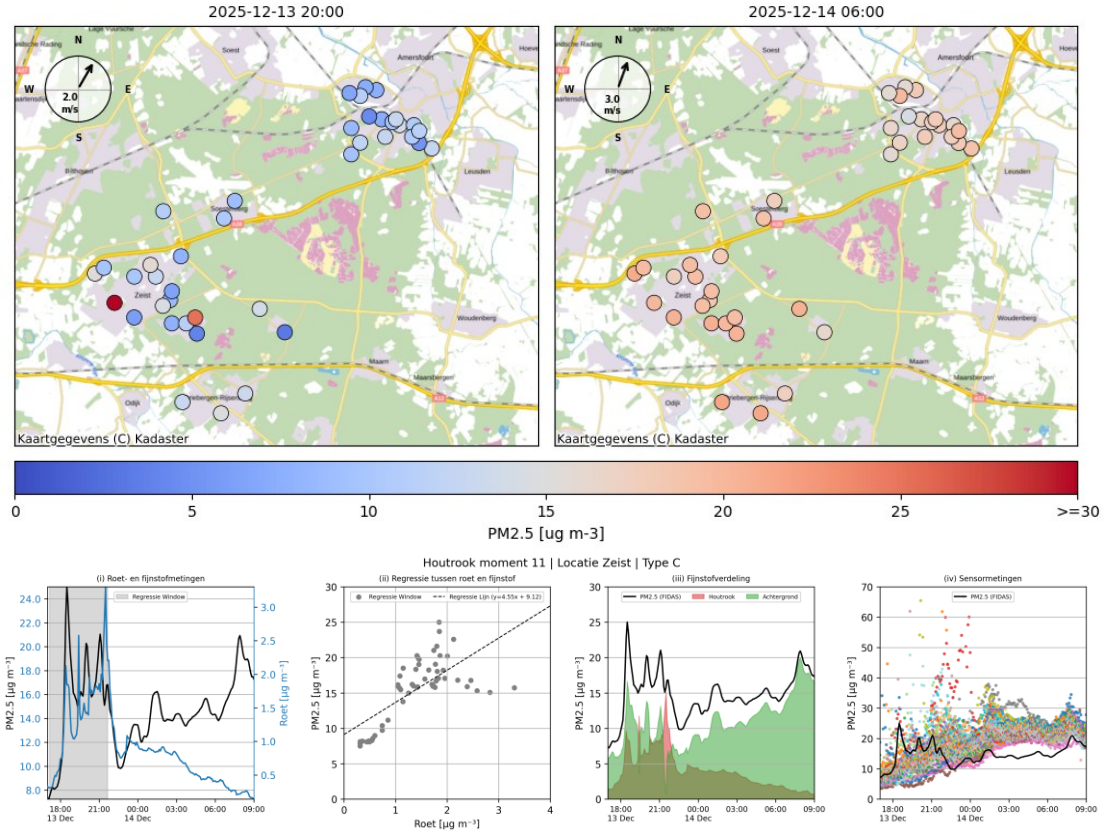
Op type A-momenten is op deze manier de verdeling van “lokale houtrook” over de gemeenten in kaart te brengen. Qua tijdstip van de dag vallen de momenten met hoge spreiding in de sensorwaarden over het algemeen samen met de tijden waarop houtrook wordt verwacht (zie ook Figuur 3.6), namelijk van het einde van de middag tot en met kort na middernacht.



Figuur 3.12: Tijdstippen waarop lokale maxima te zien zijn in de gemeenten op 25 en 26 december 2025 (het type B moment). De bovenste twee opnames zijn van de (late) avond van 25 december en de onderste twee van de avond van 26 december.

Het **type B** moment in Figuur 3.12 is veel langer dan het hierboven beschouwde type A moment en beslaat een periode van bijna 2 dagen waarop de temperatuur rond het vriespunt was. Het gaat hier om 25 en 26 december 2025 (kerstmis). Op beide dagen is vanaf een uur of vier ’s middags tot vlak na middernacht een duidelijke spreiding waar te nemen in de sensoren in het burgermeetnetwerk, een bevestiging dat hier sprake is van lokale houtrook. Het moment is zo lang omdat gedurende langere tijd de roetwaarde boven de 1 µg/m^3 blijft.
De intensiteit van de piek in de avond op 25 december is zowel in de roetmetingen als in de sensormetingen lager dan op 26 december. Het meest opvallende aan dit houtrookmoment is dat het achtergrondfijnstofniveau continu hoog is. De meest waarschijnlijke reden hiervoor is dat er veel fijnstof komt overwaaien uit een ander gebied, wat samenhangt met de oostelijke windrichting. Deze verhoging is op alle sensoren gelijktijdig te zien. De wind is met 5 m/s veel harder op 25 december dan op 26 december (3 m/s), waardoor op de 25ste in de avond slechts op enkele plekken een lokale fijnstofpiek wordt waargenomen. In de nacht en vroege ochtend van 26 december worden geen lokale uitschieters waargenomen, waarna er begin van de

avond, weliswaar op een sterk verhoogde achtergrond, weer roet- en fijnstofpieken zichtbaar zijn.
Het houtrookmoment op de avond van 26 december is dus in essentie vergelijkbaar met dat van 30 december (het type A moment). Alleen doordat de roetconcentratie tussen 25 en 26 december niet meer daalt tot onder de 1 µg/m^3 wordt dit moment “gekoppeld” aan de stookuren de dag ervoor. Het is echter niet juist om de roetconcentraties in de tussenperiode als “niet van houtstook” te beschouwen. Dat is ook in tegenspraak met de goede geobserveerde correlatie tussen levoglucosan en roet (Figuur 3.8). Het roet blijft gedurende deze periode in de lucht hangen en het effect van houtstook op de fijnstofconcentraties is daarmee langdurig aanwezig.

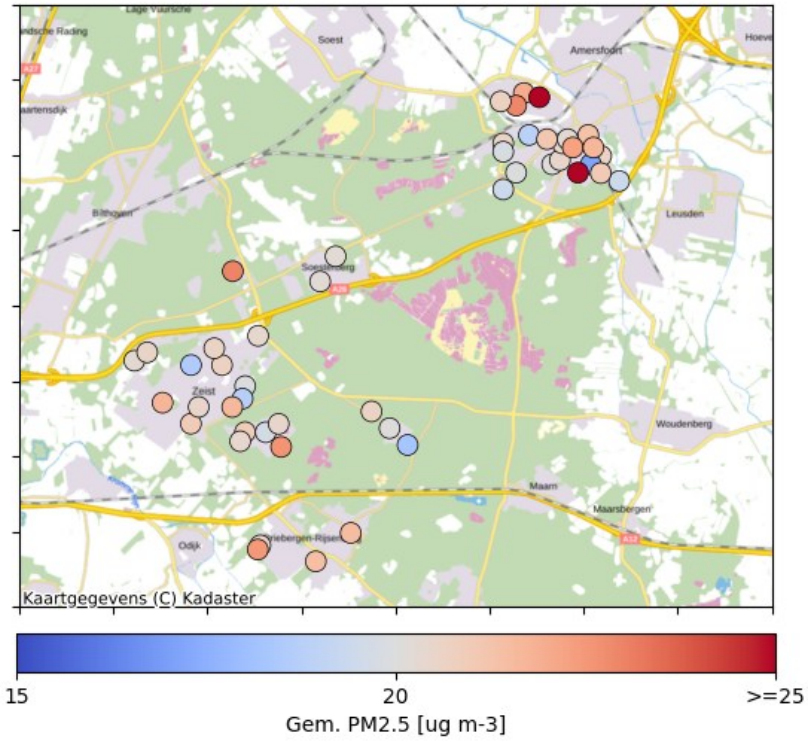


Figuur 3.13: Lokale maxima tijdens het type C moment op 13 en 14 december. Alleen in Zeist zijn twee verhogingen zichtbaar.

Figuur 3.13 geeft een voorbeeld van een **type C** moment waarbij op twee locaties fijnstofverhogingen te zien zijn in Zeist in de avond. Zaterdag 13 december was een dag met een milde temperatuur van 8-10 ºC, waarop normaal gesproken niet veel houtrook verwacht wordt. Met een lage windsnelheid van 2 m/s die enkele uren aanhoudt, loopt met het vallen van de avond de (achtergrond)fijnstofconcentratie langzaam op, terwijl de roetconcentratie van houtrook langzaam afneemt. Het is daarom voor dit type houtrookmomenten, waarop lokale houtstook niet meer de dominante bron van fijnstof is, lastig om de houtrookbijdrage goed van de achtergrond te onderscheiden. Aan de andere kant is de houtrookbijdrage aan $PM_{2.5}$ op deze momenten redelijk beperkt, waardoor dit soort momenten ook veel minder bijdragen aan de totale fractie houtrook in $PM_{2.5}$ en daarmee ook weinig effect hebben op de onzekerheid in de kengetallen. De waarnemingen van losse verhogingen in de avond dragen wel bij aan de waarnemingen van hotspots.

3.2.2 Bepaling hotspots

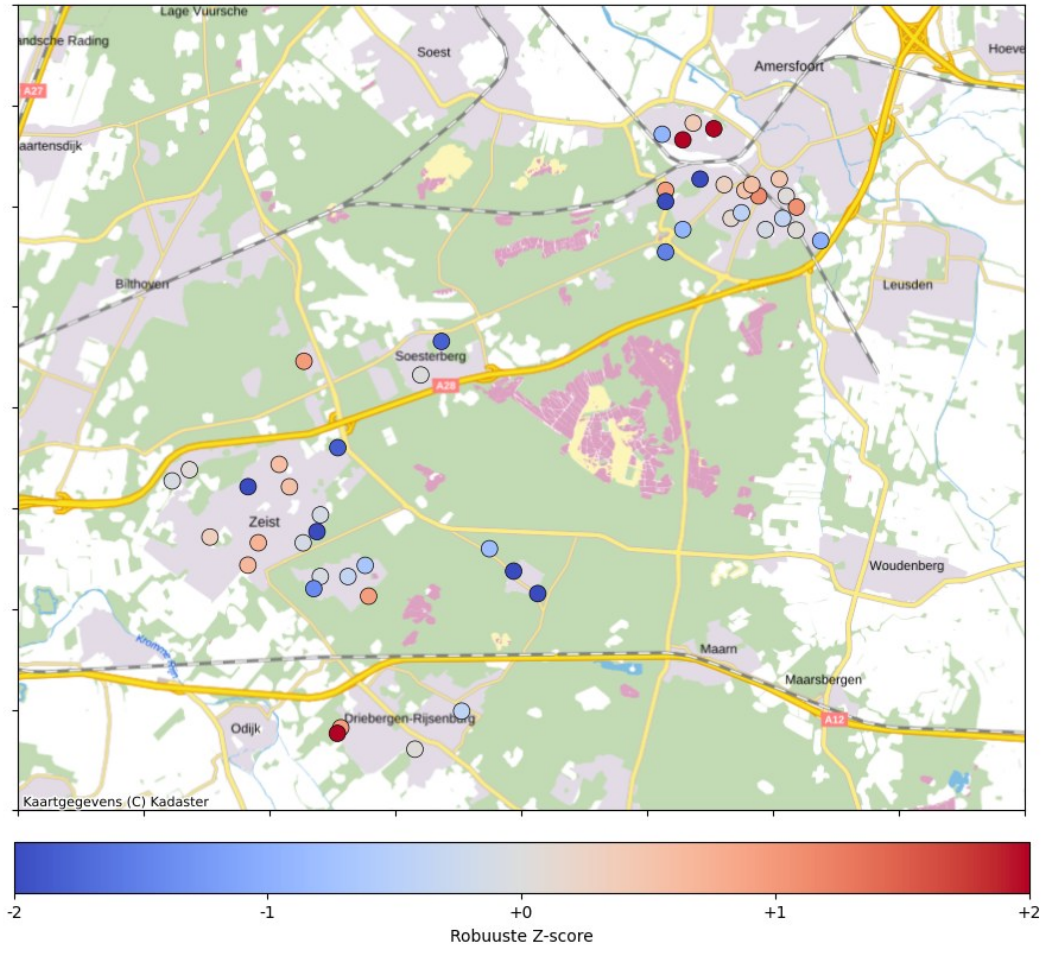
Hoewel de sensoren niet worden gebruikt om kwantitatieve conclusies te trekken over houtrook in bepaalde gebieden, kunnen ze wel worden gebruikt om iets te zeggen over plekken waar relatief vaak houtrook aanwezig is. Zo kan worden aangewezen waar kritieke plekken liggen binnen gemeenten die verdere aandacht verdienen. In de rest van de tekst worden deze plekken voor het gemak aangeduid als “hotspots”. Over het algemeen representeren deze hotspots niet één enkele stoker. Ze zijn een aanduiding dat de blootstelling aan houtrook uit de omgeving, vaak door meerdere bronnen in een wijk, op dit meetpunt regelmatig sterk oploopt.
Figuur 3.14 geeft de fijnstofconcentraties per sensor weer (na kalibratie en op vier sensoren na, zie Bijlage D) gemiddeld over de geselecteerde houtrookmomenten. Hoewel er verschillen in gemiddelde fijnstofconcentraties zichtbaar zijn, biedt deze weergave weinig contrast voor de identificatie van hotspots. Eén van de mogelijke oorzaken hiervoor is dat sommige sensoren op hotspots gemiddeld laag uitkomen als ze ook op een aantal houtrookmomenten een relatief lage waarde geven. Daarnaast bestaat een belangrijk deel van de gemiddelde fijnstofconcentraties uit achtergrondfijnstof dat door alle sensoren wordt gemeten, waardoor lokale afwijkingen relatief klein zijn op het totaal.



Figuur 3.14: $PM_{2.5}$ concentratie per sensor gemiddeld over alle houtrookmomenten in de campagne.

De onderlinge verhouding van de fijnstofconcentraties gemeten door de sensoren, gemiddeld per individueel houtrookmoment, geeft daarentegen wel meer inzicht. Een sensor die tijdens veel houtrookmomenten één van de hoogste fijnstofwaarden meet, kan worden gezien als hotspot. Om hier meer grip op te krijgen is de “gemiddelde onderlinge ranking” methode bedacht. Deze methode houdt in dat sensoren binnen een houtrookmoment een onderlinge ranking krijgen op basis van de door hen gemeten gemiddelde $PM_{2.5}$ concentratie tijdens het houtrookmoment. Deze rankinggetallen voor losse houtrookmomenten worden voor iedere sensor vervolgens gemiddeld over alle houtrookmomenten. Een sensor die tijdens veel

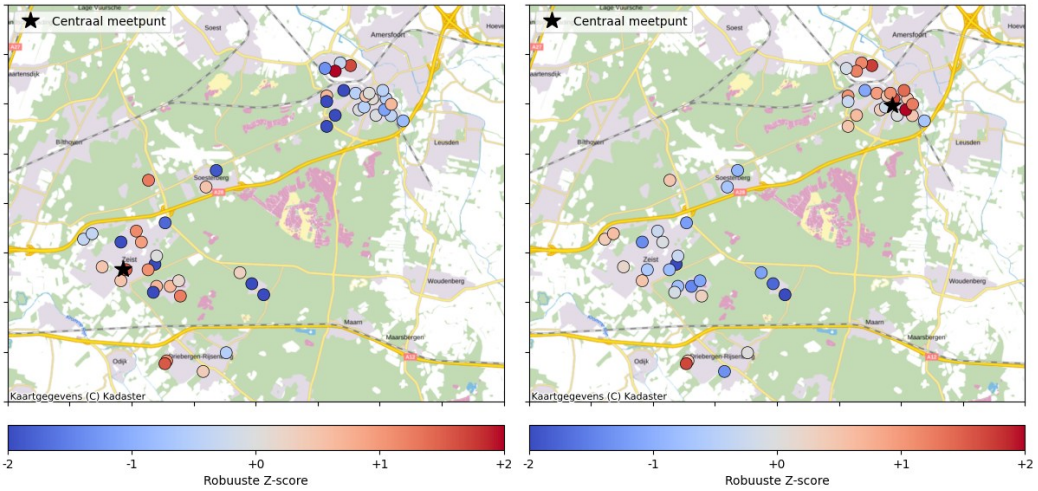
houtrookmomenten hoger meet dan andere sensoren, zal op deze manier ook gemiddeld een hogere ranking krijgen. Ten slotte wordt deze gemiddelde ranking voor elke sensor omgezet in een score die aangeeft hoeveel de rankingscore van de sensor afwijkt van de mediaan van de ranking van alle sensoren.
Het resultaat van deze benadering is te zien in Figuur 3.15. De donkerrode punten zijn hierbij de sensoren die gemiddeld over alle houtrookmomenten het vaakst relatief hoog meten, dit zijn de hotspots. Deze hotspots liggen met name in het westen en centrum van Amersfoort, en in het zuidwesten van Driebergen-Rijsenburg. Ook in Zeist zijn er een aantal sensoren gevonden die bovengemiddeld vaak hoog meten.



Figuur 3.15: Houtrook hotspots, gebaseerd op hoe vaak een sensor hoog meet tijdens alle houtrookmomenten gedurende de gehele campagne.

3.2.3 Plaatsing van de referentiemetingen

Eerder is de vraag gesteld of de positie van de referentiemetingen uitmaakt voor het vinden van houtrookmomenten binnen en buiten dezelfde gemeente. Met andere woorden, worden er minder houtrookmomenten in Amersfoort gevonden wanneer het referentiemeetpunt in Zeist staat en andersom.



Figuur 3.16: Houtrook hotspots, gebaseerd op de periode met de locatie van het referentiemeetpunt in Zeist (links) en in Amersfoort (rechts).

Dit is onderzocht door de posities van hotspots te vergelijken voor de perioden waarin de trailer in Zeist dan wel in Amersfoort stond. Figuur 3.16 toont hiervan de resultaten. Er is duidelijk te zien dat in het linkerpaneel, met het referentiepunt in Zeist, meer hotspots in Zeist gevonden zijn, en in het rechterpaneel, met referentiepunt in Amersfoort, meer hotspots in Amersfoort. Dit laat zien dat de plaatsing van het referentiemeetpunt inderdaad invloed heeft op het effectief identificeren van lokale houtrookmomenten.
De houtrook hotspots in Amersfoort liggen wat verder weg van het centrale meetpunt en worden ook gezien in de periode dat het referentiemeetpunt in Zeist stond. Dit verklaart waarom de sterkste hotspots in Amersfoort gevonden worden, terwijl de op de referentielocatie gevonden houtrookintensiteit in Amersfoort lager was dan in Zeist (Tabel 3.1). Om het houtrookbeeld in een gemeente goed te begrijpen is het dus belangrijk om niet alleen hele nauwkeurige metingen op één punt te hebben, maar ook de plaatsafhankelijke frequentie van houtrook goed in beeld te hebben.
Wanneer het referentiemeetpunt verder weg staat van een sensor neemt namelijk de kans toe dat zeer lokale houtrookmomenten in de buurt van die sensor niet als houtrookmomenten geïdentificeerd worden op het referentiepunt. Het gedrag van stokers is nu eenmaal niet overal exact gelijktijdig. Om met deze methode in de toekomst binnen gemeenten nauwkeuriger frequente stooklocaties te kunnen aanwijzen, zullen er dus meerdere roetmeetpunten in de gemeente aanwezig moeten zijn.

4 Discussie

4.1 Bijdrage van houtrook aan fijnstof en variatie in de tijd

De metingen laten zien dat houtrook vooral voorkomt tijdens koude avonden met weinig wind. Tijdens deze omstandigheden kunnen zowel roet- als fijnstofconcentraties gedurende meerdere uren en zelfs dagen verhoogd blijven en is een grote spreiding te zien in de fijnstofsensordata. Deze omstandigheden kwamen vaker voor in de eerste meetperiode van de meetcampagne in Zeist dan tijdens de latere meetperiode in Amersfoort. Dit is waarschijnlijk een groot deel van de verklaring waarom in Zeist een groter aantal houtrookmomenten is geïdentificeerd. Gedurende de meetperiode in Zeist zijn er tijdens houtrookmomenten op de kaart ook altijd lokale verhogingen in Amersfoort gezien, wat ook indirect blijkt uit de ranking in Figuur 3.15. Er kan dus niet op basis van alleen deze dataset geconcludeerd worden dat de stookintensiteit in Amersfoort over het algemeen lager (of hoger) is.

Opvallend is dat verhoogde roetconcentraties vaak langdurig aanwezig blijven nadat de individuele stookpieken al zijn verdwenen, zie ook de verdeling van houtrookuren in Figuur 3.6. Dit resulteert ook in de lange type B en C momenten van meerdere dagen: op basis van de verdeling van de roetpieken, de tijdstippen en de momenten van sterke spreiding van sensormeetwaarden mag voor deze momenten geconcludeerd worden dat hier actieve stookmomenten aan elkaar gekoppeld worden, omdat de roetconcentratie tussentijds niet daalt tot onder het drempelniveau. Op basis van de geleidelijk dalende trend en het feit dat roet met name vrijkomt bij het echte branden van de kachel is het onwaarschijnlijk dat dit komt doordat gedurende de hele nacht door actief gestookt zou worden. Er ontstaat hierdoor een situatie waarbij houtrook wel aantoonbaar aanwezig blijft in de atmosfeer, maar niet meer het directe resultaat is van gelijktijdige emissies.

Deze bevinding benadrukt het verschil tussen emissies en blootstelling: de inwoners worden veel langer aan houtrook blootgesteld dan alleen gedurende de actieve stookmomenten. De rook kan in het stookseizoen dagen achter elkaar blijven hangen. Zie bijvoorbeeld houtrookmoment nummer 39, dat loopt van 7 t/m 10 maart 2026, wat waarschijnlijk wordt veroorzaakt door een lage windsnelheid tijdens dit moment (<2 m/s met een gemiddelde windsnelheid van slechts 0,6 m/s). Vanuit gezondheidskundig perspectief is dit lang blijven hangen van verhoogde concentraties zeer relevant. Daarnaast komen dergelijke windsnelheden vaker voor bij oostenwind. Dan is het ook kouder en wordt er meer fijnstof vanaf het continent aangevoerd.

4.2 Toegevoegde waarde fijnstofsensoren van inwoners bij herkennen lokale verschillen

De fijnstofsensoren komen als een belangrijke aanvulling op de referentiemetingen naar voren. Tijdens de houtrookmomenten laten de sensoren grote ruimtelijke verschillen zien in gemeten concentraties. Hierdoor ontstaat een beeld van de lokale verspreiding van houtrook dat met uitsluitend één centrale meetlocatie niet verkregen kan worden en wordt duidelijk dat er grote verschillen zijn in de blootstelling aan houtrook afhankelijk van waar je bent.

Type A-momenten zijn daarbij het meest geschikt voor het opsporen van hotspots. Tijdens deze momenten is de bijdrage van houtstook dominant en ontstaan duidelijke verschillen

tussen sensoren. Deze verschillen zijn plausibel te verklaren door lokale variaties in stookgedrag en verspreidingsomstandigheden. Bij type B en type C momenten wordt dit beeld diffuser, doordat regionale achtergrondconcentraties een groter aandeel van het gemeten fijnstof vormen.
Daarnaast laat de hotspotanalyse zien dat het waardevol is om te kijken naar hoe vaak een sensor tijdens houtrookmomenten relatief hoge waarden meet. Op basis daarvan konden meerdere locaties worden aangewezen waar regelmatig relatief hoge concentraties voorkomen tijdens geïdentificeerde houtrookmomenten op de referentielocatie.
Deze resultaten laten zien dat een fijnmazig sensornetwerk bijdraagt aan het in beeld brengen van lokale verschillen. Hierdoor kunnen overheden gericht aan de slag met locaties waar regelmatig verhogingen van fijnstof zichtbaar zijn die naar alle waarschijnlijkheid samenhangen met houtstook. Dit is bijvoorbeeld geschikt om verschillen tussen wijken in beeld te brengen. De sensoren zijn niet geschikt voor het identificeren van individuele stokers, omdat de rook al tot op leefniveau is gedaald tegen de tijd dat deze gemeten wordt en daardoor vaak een mengeling is van rook uit meerdere bronnen in de omgeving. Ook wordt een lokale hoge bijdrage niet altijd opgepikt als de wind net anders staat.

4.3 Bruikbaarheid meetaanpak in een gebied verder van de kust

Een belangrijke vraag in deze studie was of de eerder in de IJmond ontwikkelde houtrookmeetaanpak ook toepasbaar is in een meer binnenlands gelegen bosrijk gebied. De resultaten laten zien dat dit inderdaad mogelijk is.
Het gevonden verloop van de roetmetingen over de dag en over de week is zoals verwacht wordt voor houtstook. Dat verhoogde roetwaarden ook hier in belangrijke mate samenhangen met houtrook, wordt onderbouwd door de sterke correlatie tussen de daggemiddelde levoglucosan-concentraties en de gemeten roetconcentraties. Daarmee is roet ook in een meer landinwaarts gelegen gebied een bruikbare indicator voor de detectie van houtrookmomenten.
Tegelijkertijd blijkt dat een aanzienlijk deel van de houtrookmomenten wordt gekenmerkt door een beperkte correlatie tussen roet en $PM_{2.5}$ (type B en vooral type C). De bijdrage van andere fijnstofbronnen en verhoogde achtergrondconcentraties in het Utrechtse onderzoeksgebied is groter dan aan de kust. Hierdoor wordt het moeilijker om de fijnstofbijdrage van houtstook van andere bronnen te scheiden, wat de onzekerheid van de berekende bijdrage vergroot.

4.4 Toekomstige toepassing van de methode

Dit onderzoek laat zien dat de positie van de referentiemeetlocatie invloed heeft op welke houtrookmomenten worden gedetecteerd. Wanneer de meettrailer in Zeist stond, werden relatief meer hotspots in Zeist gevonden, terwijl tijdens de meetperiode in Amersfoort juist meer hotspots in Amersfoort zichtbaar werden.
Dit suggereert dat een deel van de houtrookmomenten niet altijd wordt waargenomen als het referentiemeetpunt op grotere afstand staat. Voor een toekomstige toepassing van deze methode binnen gemeenten betekent dit dat één centraal roetmeetpunt waarschijnlijk onvoldoende is om alle houtrookmomenten binnen de gemeente te detecteren. Een netwerk van meerdere roetmeetpunten, gecombineerd met een fijnmazig sensornetwerk voor fijnstof, lijkt daarom een logische vervolgstap. Daarbij is het, als er in de toekomst zonder centraal fijnstofmeetpunt gewerkt wordt, voor de berekening van de bijdrage van houtrook aan fijnstof essentieel om de fijnstofsensoren goed en regelmatig te kalibreren. Voor het identificeren van hotspots lijkt de methode echter ook in haar huidige vorm al vrij goed bruikbaar.

Daarnaast vragen langdurige perioden met verhoogde roet- en fijnstofniveaus om een verdere verdieping met betrekking tot de achtergrondcorrectie en daarmee om een verfijning van de kwantificering van het aandeel houtrook in gemeten concentraties fijnstof.

5 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de uitgevoerde meetcampagne kan worden geconcludeerd dat houtstook in de winter een duidelijke en meetbare bijdrage levert aan de fijnstofconcentraties in het projectgebied en dat deze bijdrage sterk varieert in tijd en ruimte.
Op de referentielocatie in Zeist werd een duidelijk hogere bijdrage van houtstook aan $PM_{2.5}$ vastgesteld dan op de referentielocatie in Amersfoort. De geschatte bijdrage van houtstook aan de totale concentratie $PM_{2.5}$ bedroeg per meetperiode 17,4% in Zeist en 5,3% in Amersfoort. Het verschil komt door zowel een groter aantal houtrookmomenten als door een hogere houtstookbijdrage aan fijnstof tijdens deze momenten. Dit is mogelijk het gevolg van het verschil in buitentemperatuur, deze was regelmatig boven de 10ºC toen de referentielocatie in Amersfoort was, waardoor het in die periode minder aantrekkelijk is om te stoken.
Met behulp van fijnstofsensoren bij inwoners is onderzocht waar in de gemeenten het vaakst sterke fijnstofverhogingen worden gezien op momenten waarop de referentielocatie houtrook detecteert. Deze hotspots liggen met name ten westen en ten zuiden van het centrum van Amersfoort (NB het onderzoeksgebied omvatte niet de gehele gemeente), en in het zuidwesten van Driebergen-Rijsenburg. Ook in Zeist zijn er een aantal sensoren die bovengemiddeld vaak hoog meten.

De belangrijkste **conclusies**:

- De **toegepaste meetaanpak**, gebaseerd op een combinatie van roet- en fijnstofmetingen op een centrale locatie, is, met enige aanpassingen, ook geschikt voor het identificeren van houtrookmomenten in een landinwaarts gelegen gebied, zoals de provincie Utrecht.

- **Houtrookmomenten gedetecteerd op de referentielocatie** kunnen worden onderscheiden in verschillende typen, waarbij vooral momenten met een sterke correlatie tussen roet en fijnstof (type A) betrouwbaar aan houtrook zijn toe te schrijven. Voor andere typen houtrookmomenten, zijn de echte stookbijdragen lastiger te onderscheiden van de achtergrond. Ook is zichtbaar dat roet en fijnstof uit houtstook langdurig in de lucht aanwezig blijven. Hoge achtergrondconcentraties komen vaker voor in het binnenland dan aan de kust, wat leidt tot een hogere onzekerheid in de kwantificering van de lokale houtrookbijdrage.

- Het **netwerk van sensoren bij inwoners** biedt waardevolle aanvullende informatie over de ruimtelijke verspreiding van fijnstof en kan gebruikt worden voor het identificeren van houtrook-hotspots. Een sterke spreiding in door fijnstofsensoren gemeten concentraties is een sterke indicator voor de aanwezigheid van houtrook binnen een gebied. Op vier sensoren na, hebben alle sensoren bruikbare data geleverd tijdens de meetcampagne.
  De identificatie van een hotspot is afhankelijk van de nabijheid van roetmetingen: wanneer een sensor dichter bij het centrale meetpunt is, worden hotspots vaker gedetecteerd. De sensorresultaten laten ook zien dat metingen op het centrale meetpunt niet noodzakelijk representatief zijn voor de omringende wijken. In Amersfoort zijn bijvoorbeeld de op het centrale meetpunt gemeten waarden waarschijnlijk een onderschatting ten opzichte van de houtrookbelasting op de hotspots met de hoogste ranking ten noordwesten van het centrale meetpunt.

Op basis van deze studie worden de volgende **aanbevelingen** gedaan:

- Voor beleidsdoeleinden is het, voor het verlagen van de gezondheidseffecten, met name relevant om te focussen op het identificeren van **lokale hotspots en perioden met verhoogde blootstelling**. Beide is mogelijk met de in dit onderzoek gebruikte meetaanpak.
- Verdere verfijning van de methode voor **achtergrondcorrectie** en selectie van houtrookmomenten is wenselijk om de nauwkeurigheid van de kwantitatieve resultaten te verbeteren.
- **Kalibratie van de fijnstofsensoren** is essentieel om de betrouwbaarheid van het sensornetwerk te waarborgen en om in de toekomst de methode toe te kunnen passen zonder referentielocatie. De binnen dit onderzoek toegepaste kalibratiemethode is daarvoor een bruikbare eerste aanzet, maar kalibratie vooraf op een centrale locatie geeft doorgaans betere resultaten met minder spreiding.
- De **inzet van roetsensoren** op meerdere referentiepunten in de gemeente wordt sterk aangeraden bij toepassing van deze methode om te corrigeren voor de positieve bias (minder houtrook) die ontstaat als het roetmeetpunt verder weg is. Daarbij zijn de roetsensoren ook een goedkoper alternatief voor de kostbare plaatsing van een meettrailer.

Concluderend is de inzet van (meerdere) referentiepunt(en) voor roetmetingen in combinatie met een fijnmazig fijnstofsensornetwerk een geschikt instrument om inzicht te verkrijgen in de intensiteit en de verdeling van houtrookconcentraties in een gemeente. Dit biedt een waardevolle basis voor verdere houtrookmonitoring en -beleidsontwikkeling.

Referenties

[1] P. Bronsveld, D. van Dinther, J. Fabriek, G. J. de Bruin-Hoegee, S. Kaandorp, M. Blom en H. v. Mansom, „Houtrookpilot IJmond 2023–2024: Een meetaanpak voor het bepalen van de verspreiding van houtrook in gemeenten.," TNO, Petten, 2025.

[2] B. R. Simoneit, J. J. Schauer , C. G. Nolte, D. R. Oros, V. O. Elias, M. P. Fraser, W. F. Rogge en G. R. Cass, „Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning," *Atmospheric Environment ,* nr. 33, pp. 173-182, 1999.

[3] C. Piot, J. -L. Jaffrezo, J. Cozic, N. Pissot, I. El Haddad, N. Marchaud en J. -L. Besombes, „Quantification of levoglucosan and its isomers by High Performance," *Atmospheric Measurement techniques,* nr. 5, pp. 141-148, 2012.

[4] T. Nussbaumer, „Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction," *Energy & Fuels,* vol. 17, nr. 6, pp. 1510-1521, 2003.

[5] J. Sandradewi, A. Prevot, M. Alfarra, S. Szidat, M. Wehrli, M. Ruff, S. Weimer, V. Lanz, E. Weingartner, N. Perron, A. Caseiro, A. Kasper-Giebl, H. Puxbaum, L. Wacker en U. Baltensperger, „Comparison of several wood smoke markers and source apportionment methods for wood burning particulate mass.," *Atmospheric Chemistry and Physics,* nr. 8, p. 8091–8118, 2008.

[6] S. Van den Elshout en P. van Breugel, „Metingen aan houtstook in de stad," *Tijdschrift Lucht,* nr. 3, pp. 8-11, 2018.

[7] S. Teeuwisse, A. Woutersen en G. de Boer, „Herziening criteria Stookwijzer," 2024.

[8] Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), „Samenvatting Samenwerking Houtrookonderzoek RIVM | TNO | GGD Amsterdam | UU," Bilthoven, 2022.

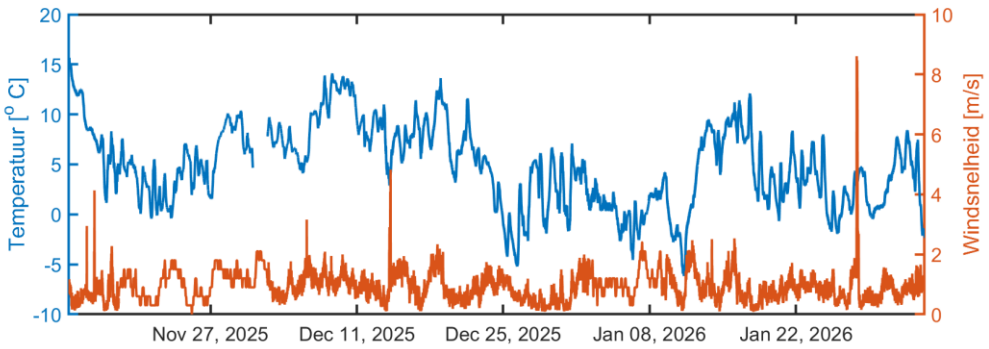
Bijlage A
Referentiemeetapparatuur

De gebruikte meetapparatuur binnen dit onderzoek is vergelijkbaar met de meetopzet zoals eerder toegepast in houtrookmeetcampagnes in Bergen en Heemskerk (Noord-Holland). Het gaat daarbij om de volgende apparatuur:

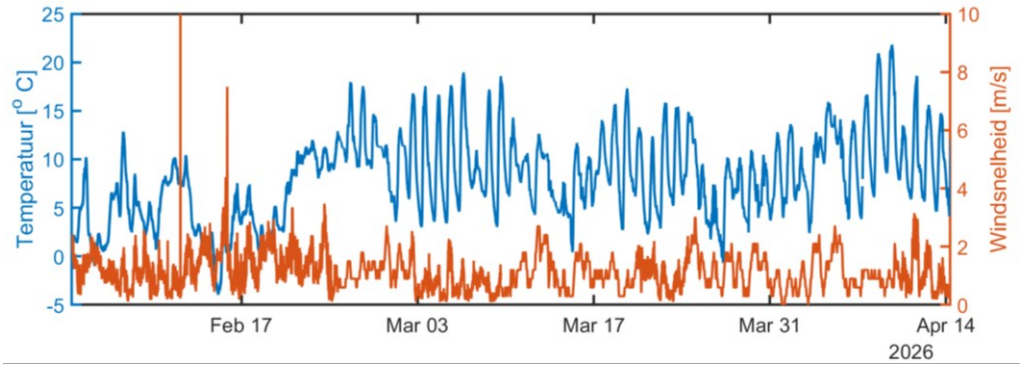
Fijnstofmetingen (PM_1, $PM_{2.5}$, PM_{10})
De concentraties van fijnstof (PM_1, $PM_{2.5}$, PM_{10}) zijn continu gemeten met een FIDAS-instrument van het merk Palas. Met dit instrument is de massaconcentratie van deze verschillende fijnstoffracties als functie van de tijd bepaald met hoge tijdsresolutie (1 minuut). Dit is nodig voor het kalibreren van de sensoren en voor het kwantificeren van de bijdrage van houtrook aan de totale fijnstofbelasting tijdens houtrookmomenten.

Roetmetingen (black carbon)
Voor de realtime identificatie van houtrook is gebruikgemaakt van de AE33 aethalometer van het merk Magee Scientific. Dit instrument bepaalt de zwarting van fijnstof op een filtertape op basis van de absorptie van zeven verschillende golflengten licht (de kanalen) op hoge tijdsresolutie (1 seconde). Zodra de absorptie te hoog wordt, wordt het filter gewisseld door de filtertape door te schuiven. Door metingen met meerdere golflengten uit te voeren, kan onderscheid worden gemaakt tussen roet afkomstig van houtverbranding en andere bronnen. In deze studie is met name het signaal op het kortgolvige kanaal (BC1) gebruikt als indicator voor houtrook, omdat dit kanaal het best overeenkomt met organische koolstofverbindingen [5].

Wind- en temperatuurmetingen
Om te kunnen bepalen of de houtrookmomenten overeenkomen met periodes met lage windsnelheid, oftewel met code rood en oranje van de stookwijzer, en voor meer informatie over de bronnen van fijnstofpieken, is ook een Vaisala weerstation ingezet. Dit instrument karakteriseert de lokale windcondities met een tijdsresolutie van 1 minuut (10-20 Hz) en meet gelijktijdig de windcomponenten in oost-west (u) en noord-zuid (v), waardoor zowel windsnelheid als windrichting continu kunnen worden bepaald. Daarnaast meet het instrument ook continu de buitentemperatuur in ºC. Ook de FIDAS heeft een eenvoudig eigen weerstation dat de temperatuur en luchtvochtigheid meet.
Door problemen met dataopslag was de tijdserie van de Vaisala niet geheel compleet. Voor temperatuur is deze tijdserie opgevuld met de temperatuur bemeten door de FIDAS en voor windsnelheid met die van KNMI de Bilt, waarbij de laatste gecorrigeerd is voor een andere meethoogte. Het resultaat is te zien in Figuur 5.1 en Figuur 5.2.



Figuur 5.1: Temperatuur en windsnelheid op 10 minuten basis gedurende de meetperiode in Zeist (Vaisala).

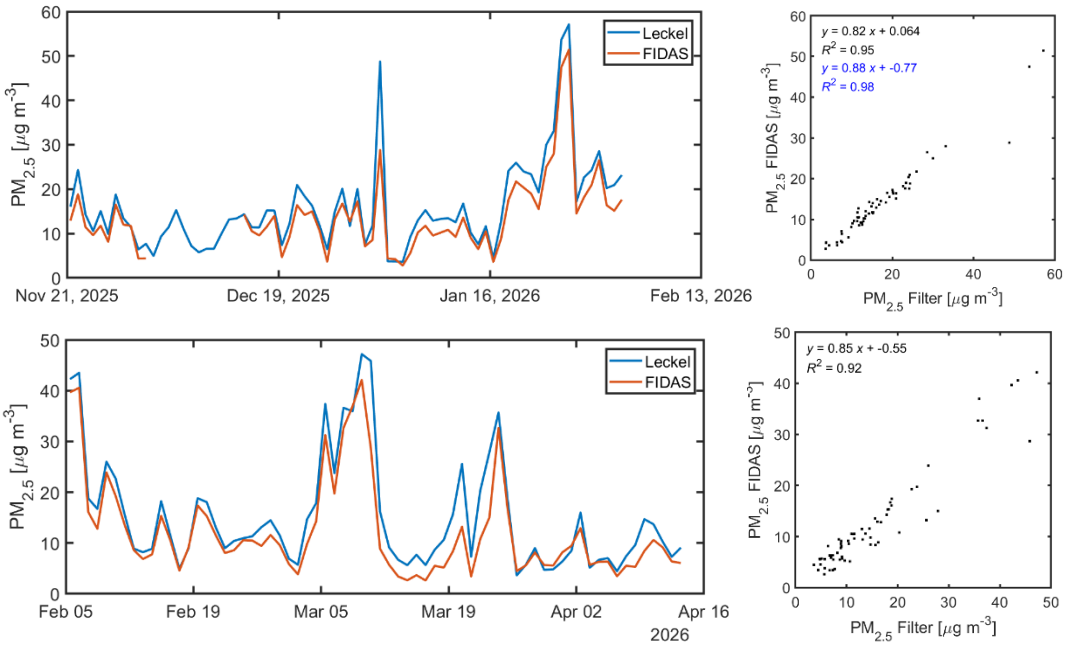


Figuur 5.2: Temperatuur en windsnelheid op 10 minuten basis gedurende de meetperiode in Amersfoort.

Filters voor fijnstof en levoglucosan

Ter validatie zijn ook de op dagbasis met de FIDAS gemeten massaconcentraties vergeleken met filterwegingen van fijnstof. De filters zijn verzameld met een Leckel SEQ 47/50, met een kritisch capillair voor $PM_{2.5}$. De filters zijn altijd genomen over de periode van 12.00 uur in de middag tot 12.00 uur de volgende dag. Omdat houtstook vaak in de avond plaatsvindt zorgt dit ervoor dat het volledige houtrookmoment op één filter wordt verzameld. Zowel voor Zeist als Amersfoort komen de FIDAS-metingen goed overeen met de filterwegingen (Figuur 5.3). Dezelfde filters zijn gebruikt voor chemische analyse om de concentratie van levoglucosan in de lucht te bepalen ter verificatie van de aanwezigheid van houtrook.

De laboratoriumanalyse om de concentratie levoglucosan te bepalen is uitgevoerd door CNRS Grenoble. Levoglucosan is in de lucht een relatief stabiele chemische component van fijnstof en komt vrij bij de verbranding van cellulose. Het wordt daarom gezien als de meest betrouwbare indicator voor de aanwezigheid van houtrook [2].



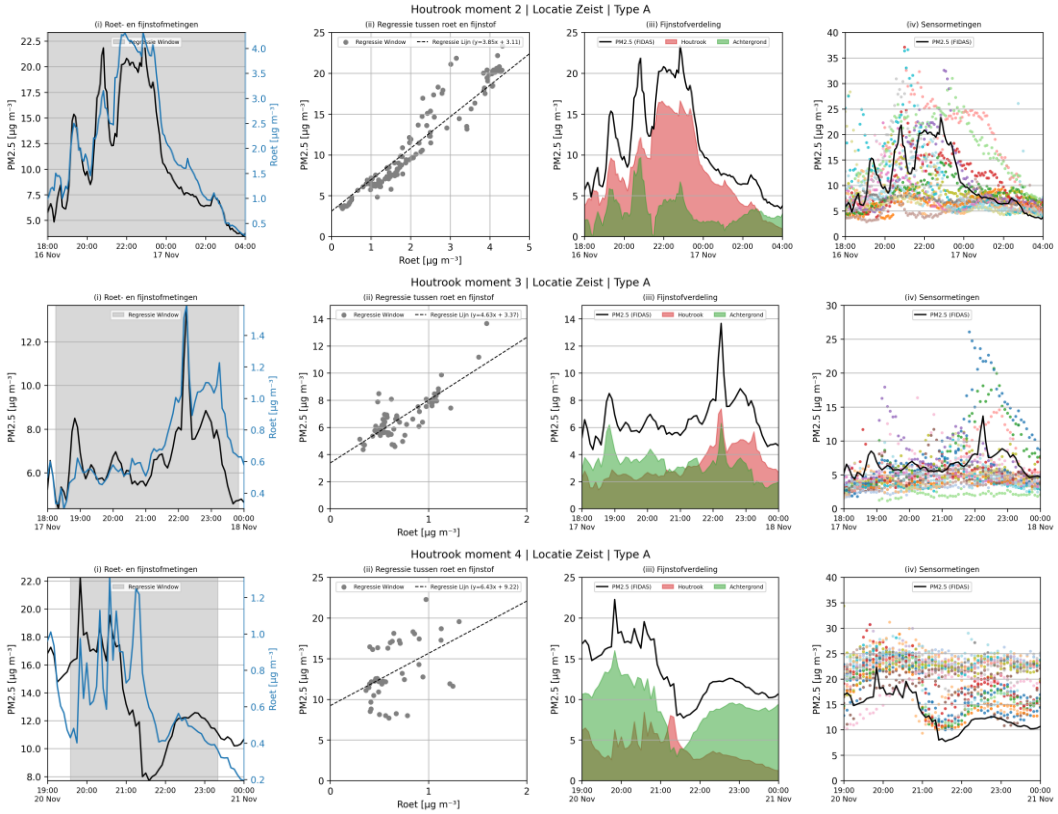
Figuur 5.3: Vergelijking van $PM_{2.5}$ op 24-uursbasis voor filter (Leckel) en FIDAS. **Links:** tijdsserie van beide meetwaarden. **Rechts:** regressieanalyse van roet vs. levoglucosan. **Boven:** Voor locatie Zeist, met in blauw regressieanalyse waarvoor oud en nieuw niet is meegenomen. **Onder:** Voor locatie Amersfoort.

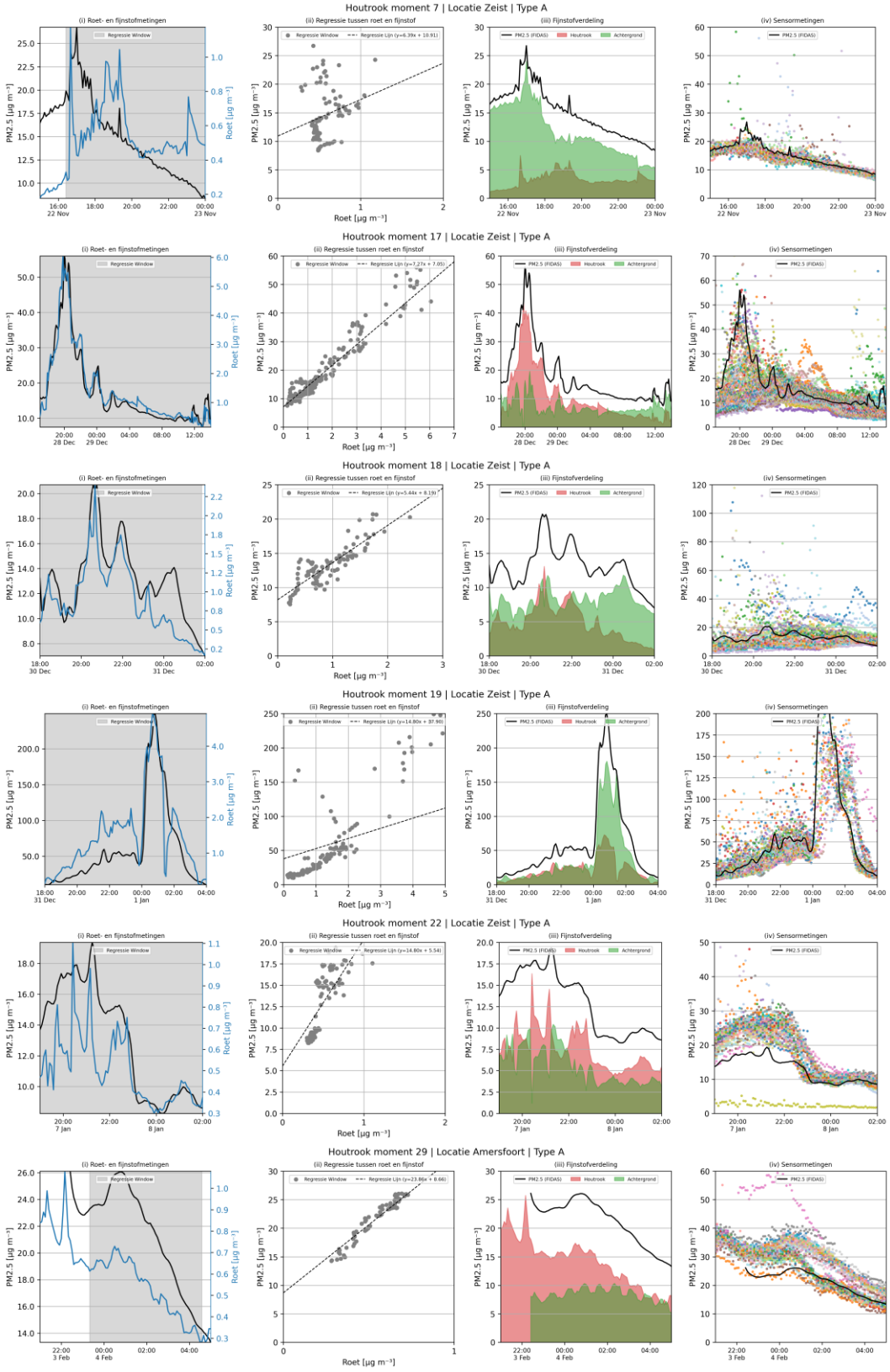
Bijlage B
Alle houtrookmomenten

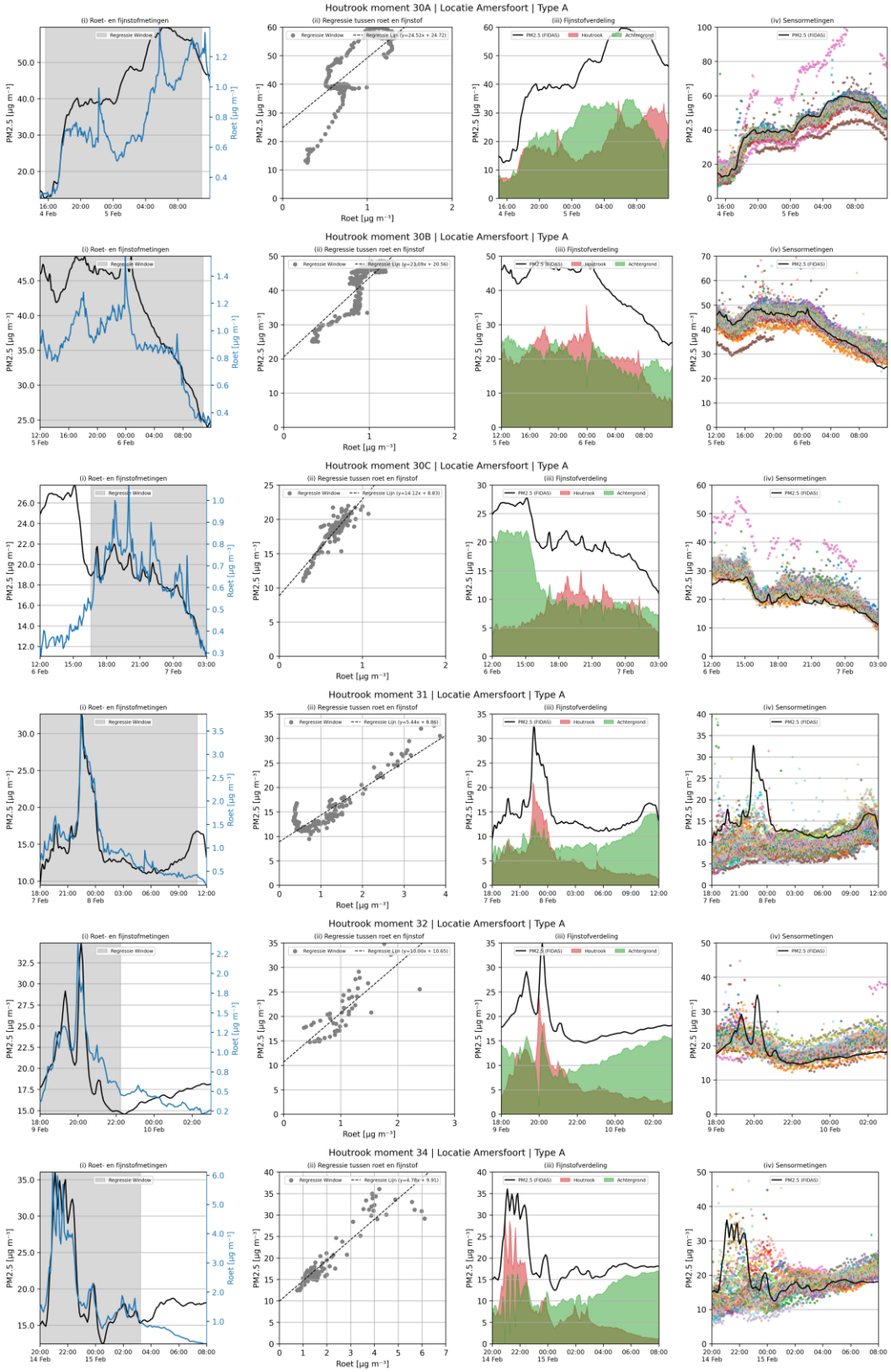
In deze bijlage staan de grafieken van alle houtrookmomenten, gegroepeerd op type A, B of C (gebaseerd op de mate van correlatie tussen roet en fijnstof). Binnen elk type staan de houtrookmomenten in volgorde gesorteerd op datum/momentnummer. De hieronder gegeven roetwaarden zijn gelijk aan kanaal BC1 – kanaal BC6, wat wordt gebruikt voor de schaling.

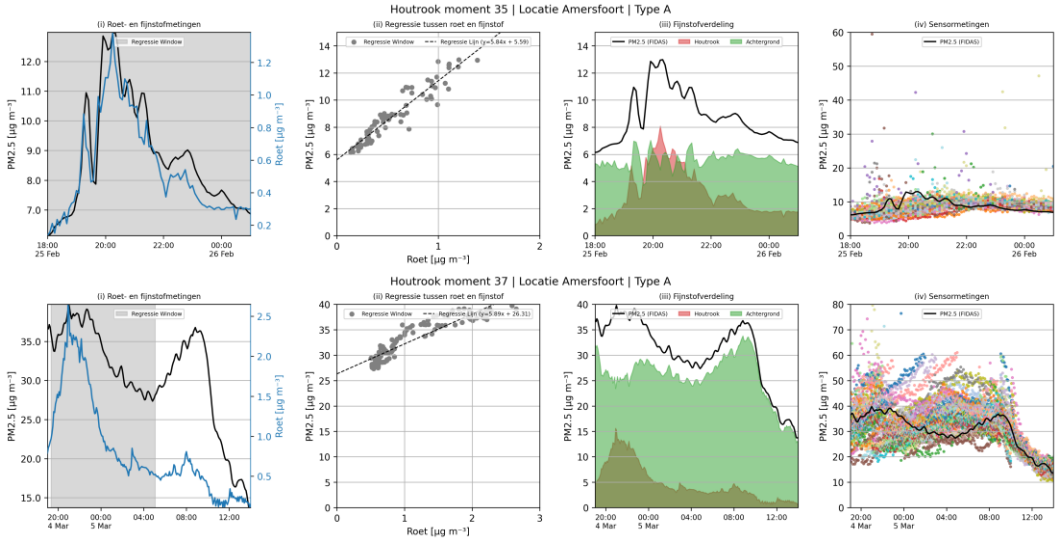
Type A	Type B	Type C
2, 3, 4, 7, 17, 18, 19, 22, 29, 30 (A,B,C), 31, 32, 34, 35, 37	5, 9, 12, 15, 16, 20, 25 (A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K), 26, 27 (A,B,C,D), 28 (A,B,C)	1, 6, 8, 10, 11, 13, 14 (A,B,C,D), 21, 23, 24, 33, 36, 38 (A,B), 39 (A,B,C,D), 40

Type A

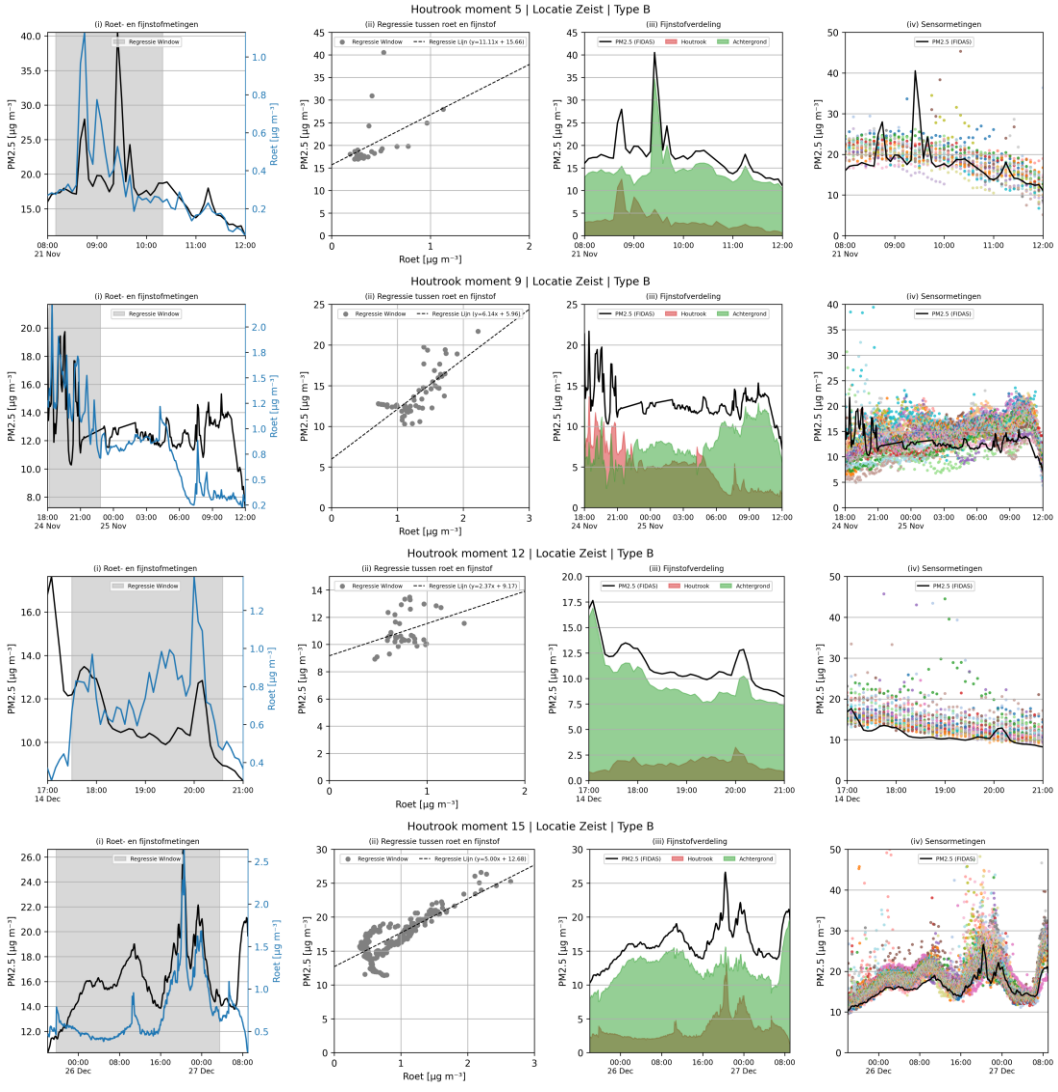


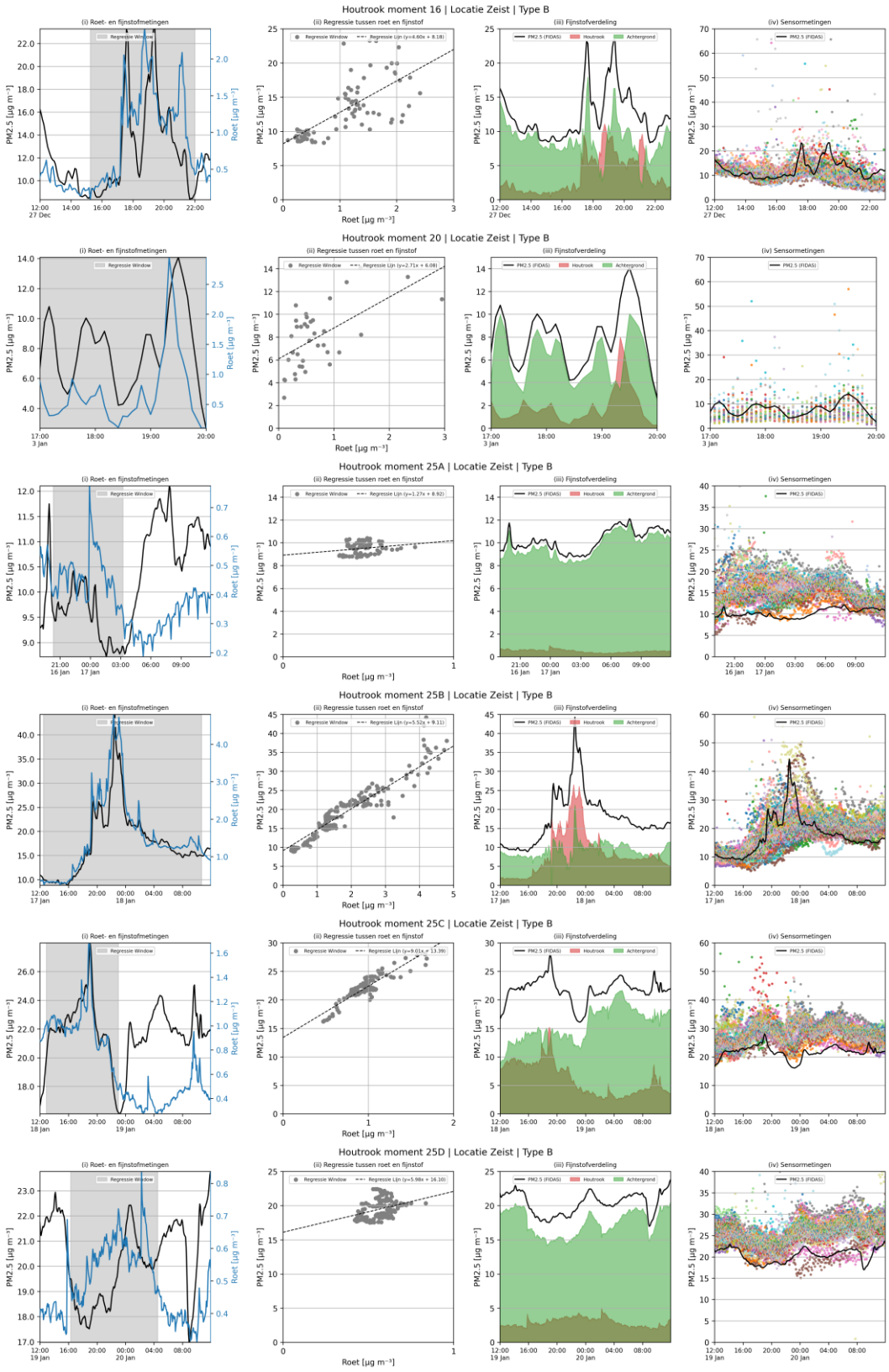

Houtrook moment 7 | Locatie Zeist | Type A
Houtrook moment 17 | Locatie Zeist | Type A
Houtrook moment 18 | Locatie Zeist | Type A
Houtrook moment 19 | Locatie Zeist | Type A
Houtrook moment 22 | Locatie Zeist | Type A
Houtrook moment 29 | Locatie Amersfoort | Type A
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]

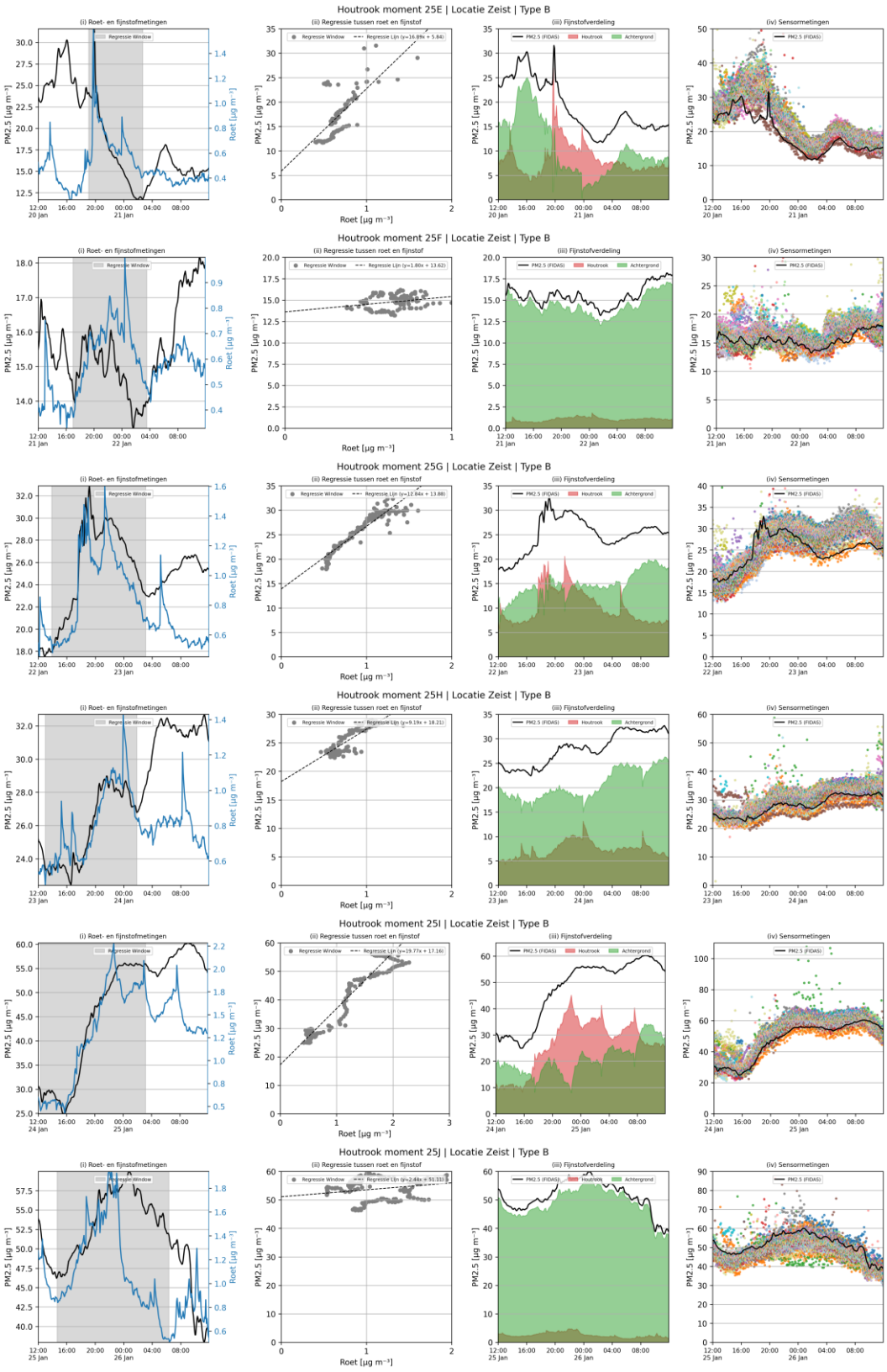

Houtrook moment 30A | Locatie Amersfoort | Type A
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 30B | Locatie Amersfoort | Type A
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 30C | Locatie Amersfoort | Type A
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 31 | Locatie Amersfoort | Type A
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 32 | Locatie Amersfoort | Type A
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 34 | Locatie Amersfoort | Type A
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen

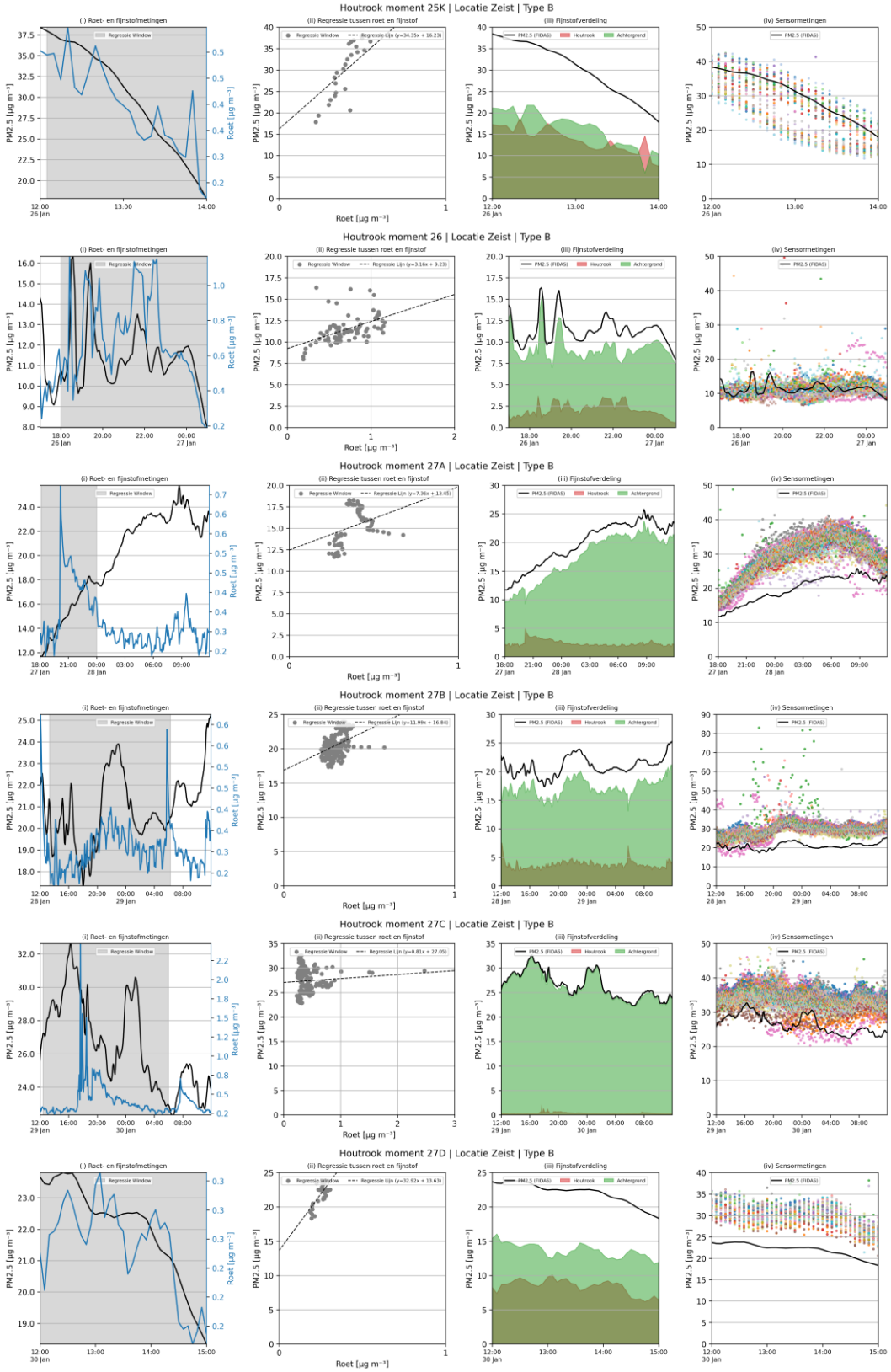

Houtrook moment 35 | Locatie Amersfoort | Type A
Houtrook moment 37 | Locatie Amersfoort | Type A
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]

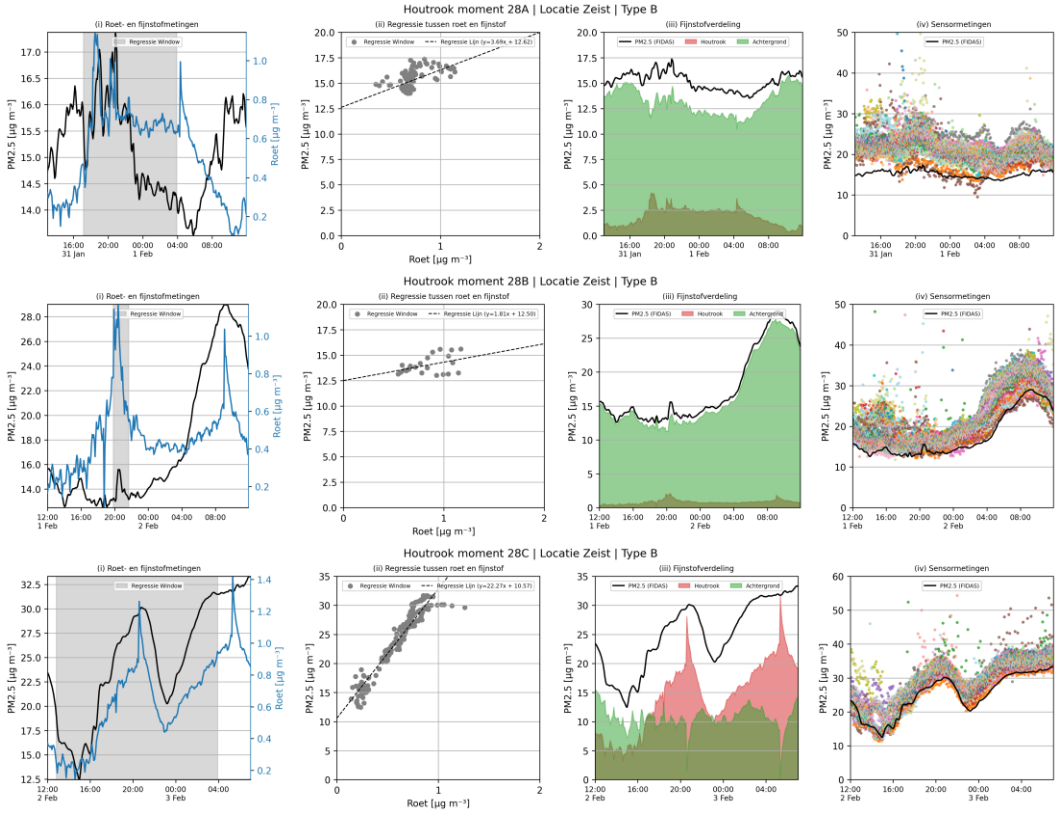
Type B


Houtrook moment 5 | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 9 | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 12 | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 15 | Locatie Zeist | Type B
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]

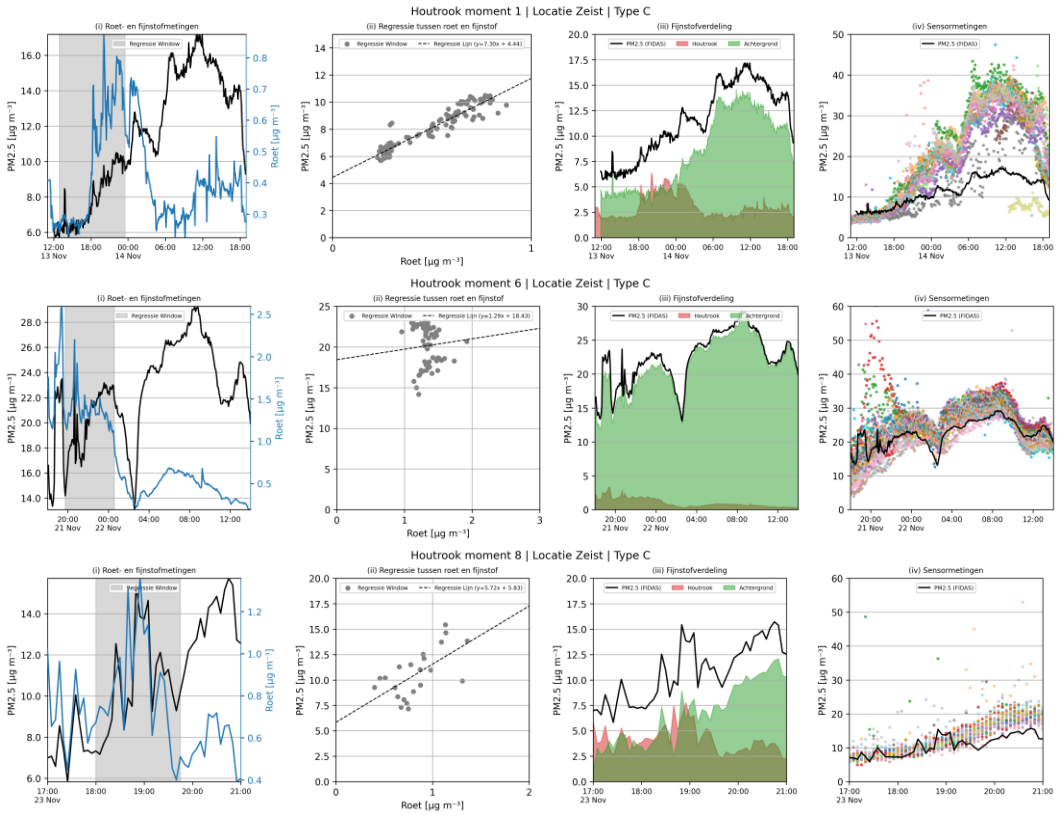

Houtrook moment 16 | Locatie Zeist | Type B
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 20 | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25A | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25B | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25C | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25D | Locatie Zeist | Type B
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]

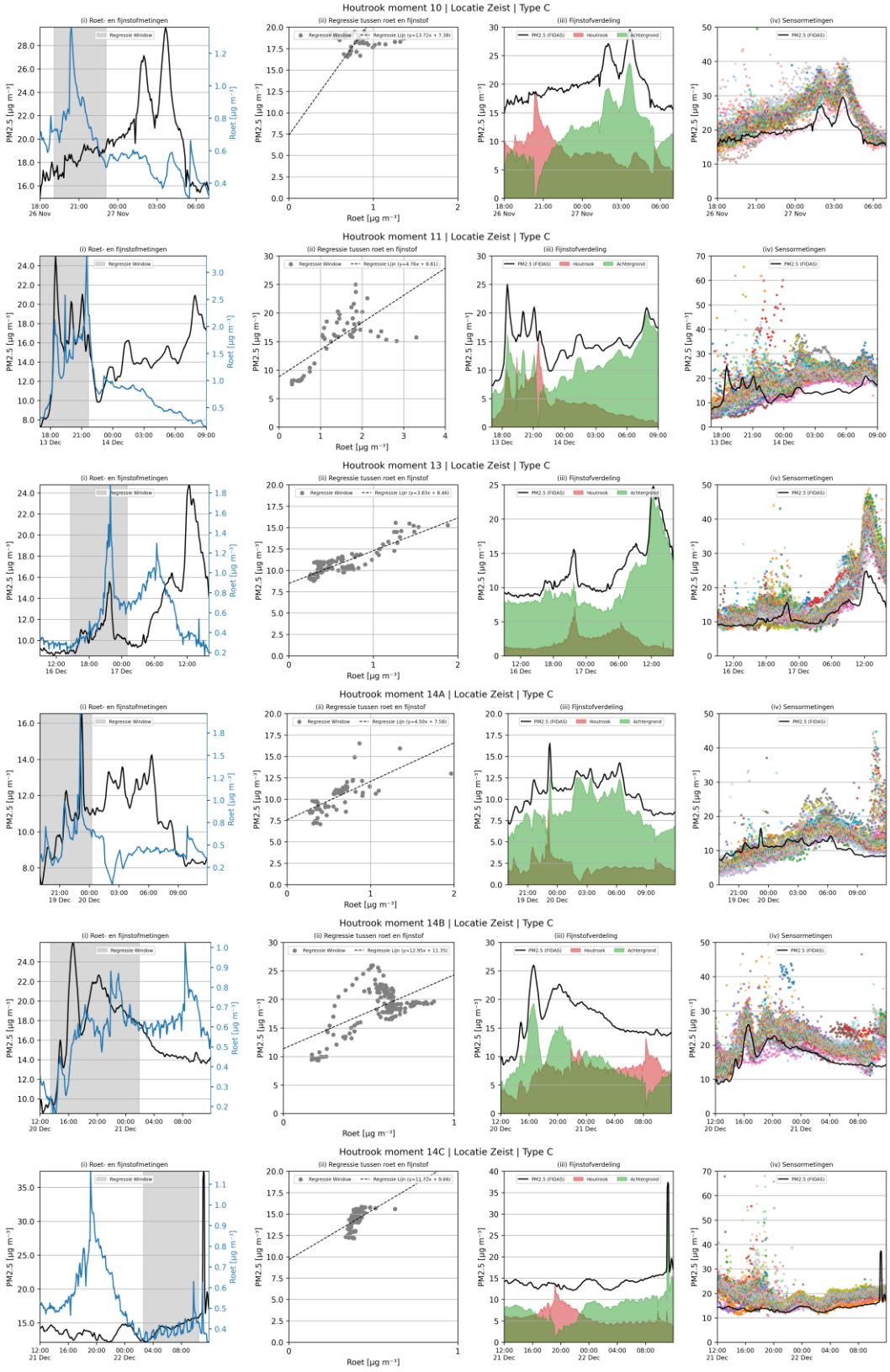

Houtrook moment 25E | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25F | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25G | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25H | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25I | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 25J | Locatie Zeist | Type B
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]

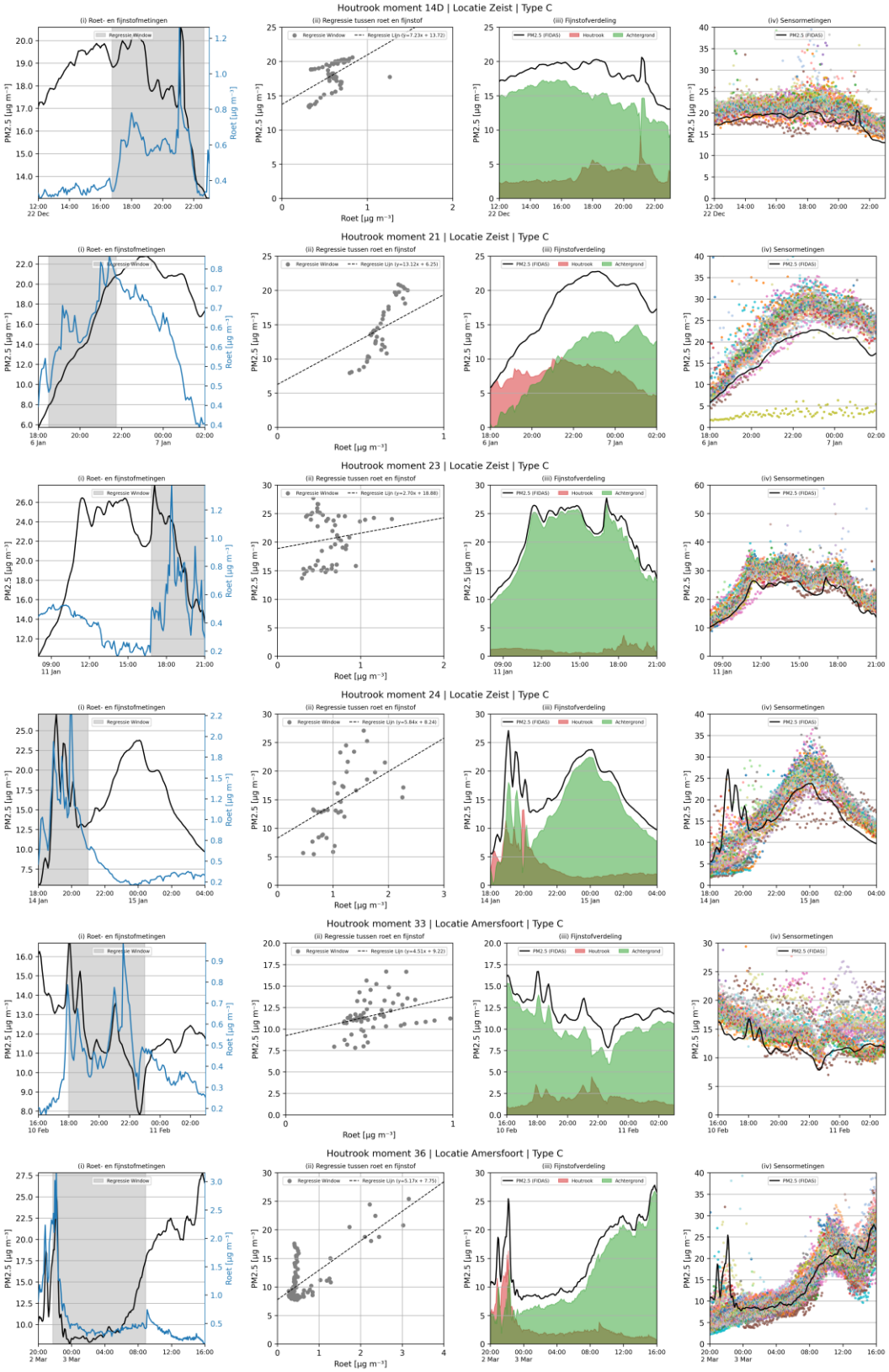

Houtrook moment 25K | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 26 | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 27A | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 27B | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 27C | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 27D | Locatie Zeist | Type B
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]

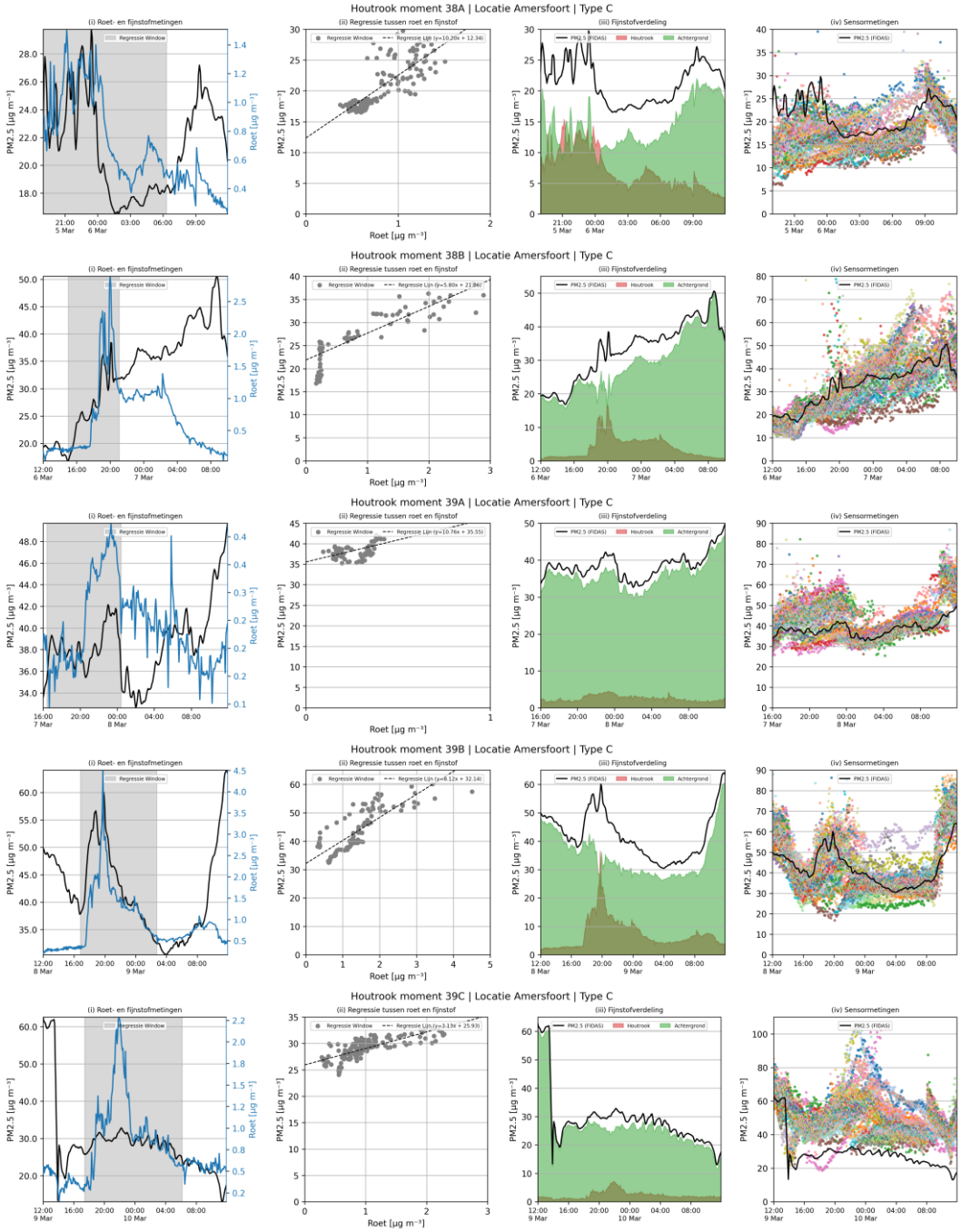

Houtrook moment 28A | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 28B | Locatie Zeist | Type B
Houtrook moment 28C | Locatie Zeist | Type B
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]

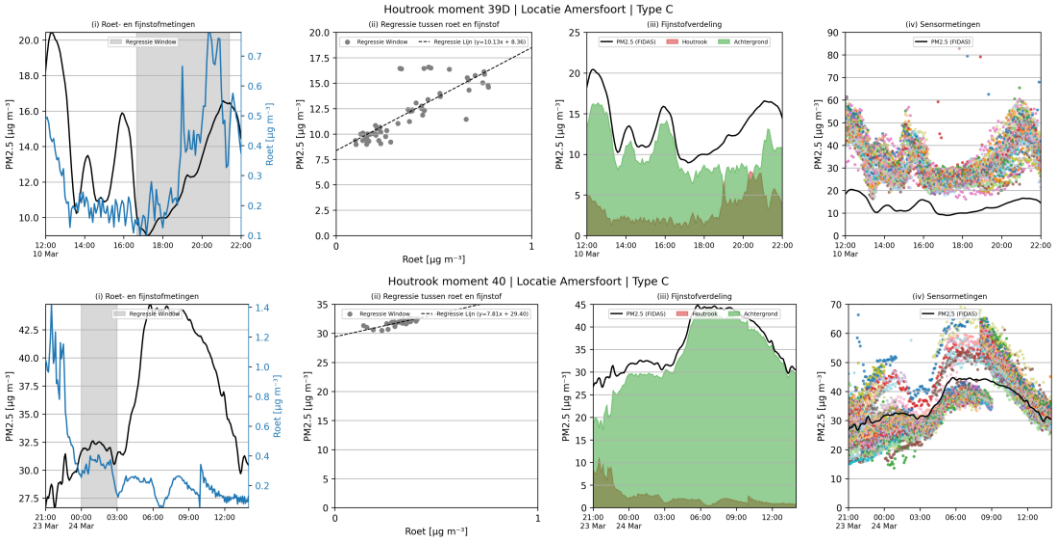
Type C


Houtrook moment 1 | Locatie Zeist | Type C
Houtrook moment 6 | Locatie Zeist | Type C
Houtrook moment 8 | Locatie Zeist | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]


Houtrook moment 10 | Locatie Zeist | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 11 | Locatie Zeist | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 13 | Locatie Zeist | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 14A | Locatie Zeist | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 14B | Locatie Zeist | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 14C | Locatie Zeist | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen


Houtrook moment 14D | Locatie Zeist | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 21 | Locatie Zeist | Type C
Houtrook moment 23 | Locatie Zeist | Type C
Houtrook moment 24 | Locatie Zeist | Type C
Houtrook moment 33 | Locatie Amersfoort | Type C
Houtrook moment 36 | Locatie Amersfoort | Type C
PM2.5 [µg m⁻³]
Roet [µg m⁻³]


Houtrook moment 38A | Locatie Amersfoort | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 38B | Locatie Amersfoort | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 39A | Locatie Amersfoort | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 39B | Locatie Amersfoort | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 39C | Locatie Amersfoort | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen


Houtrook moment 39D | Locatie Amersfoort | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen
Houtrook moment 40 | Locatie Amersfoort | Type C
(i) Roet- en fijnstofmetingen
(ii) Regressie tussen roet en fijnstof
(iii) Fijnstofverdeling
(iv) Sensormetingen

Bijlage C

Bepaling houtrookbijdrage aan $PM_{2.5}$-concentraties

Voor het maken van een zo goed mogelijke schatting van de houtrookbijdrage aan de $PM_{2.5}$-concentraties, ook in gevallen waarbij het verloop van de roetpiek niet meer goed terug te zien is in het verloop van de $PM_{2.5}$-concentraties op een houtrookmoment, is het volgende stappenschema gevolgd:

1. **De roetwaarden op kanaal BC6 van de aethalometer worden afgetrokken van BC1, hierna aangeduid als BC1-6, omdat dit een betrouwbare weergave geeft van het verloop van houtrookemissies.** De houtrookmomenten worden bepaald op basis van de waarde van BC1, in lijn met de eerder ontwikkelde methode en de sterke correlatie van BC1 met levoglucosan (zie ook [1]). Bij deze meetcampagne werden echter in de ochtend soms ook duidelijk verkeerspieken in signaal BC1 gezien. Om hiervoor te corrigeren, wordt bij de schaling van het roetsignaal het langgolvige signaal van kanaal BC6 van het kortgolvige BC1-signaal afgetrokken. Verkeer geeft namelijk op alle aethalometer kanalen een signaal met vergelijkbare sterkte, terwijl houtrook een veel hoger signaal geeft op BC1 en juist een relatief laag signaal op BC6. Door BC6 van BC1 af te trekken blijft dus de gehele trend van de houtrookbijdrage bewaard, terwijl de verkeersbijdrage wegvalt.

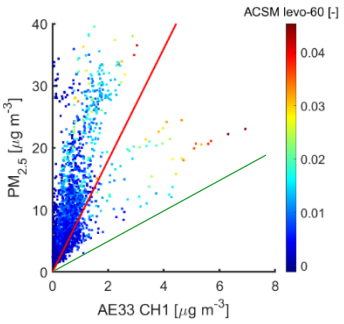
2. **Emissies uit dezelfde bron hebben een vergelijkbaar verloop in de tijd. De trend van de bijdrage van houtrook aan de $PM_{2.5}$ concentraties volgt daarom uit een schaling van de BC1-6 trend op het deel van de $PM_{2.5}$-trend waar de correlatie goed is.** Hieruit volgt dat voor houtrookmomenten waarbij het $PM_{2.5}$ signaal in de tijd goed correleert met BC1-6 de bijdrage van houtrook aan $PM_{2.5}$ direct bepaald kan worden door de helling te nemen van de regressielijn van $PM_{2.5}$ tegen BC1-6 ($\mathbf{f_{reg}}$) en BC1-6 hiermee te vermenigvuldigen. Anders gezegd wordt het roetsignaal geschaald om de PM2.5 bijdrage te bepalen.

3. **Wanneer er ook $PM_{2.5}$ uit andere bronnen aanwezig is tijdens een houtrookmoment wordt nog steeds de beste correlatie verwacht rondom het houtrook (BC1-6) maximum.** De correlatie is niet altijd goed over het hele houtrookmoment, doordat de trend van $PM_{2.5}$ vervormd wordt door fijnstofbijdragen van andere (achtergrond)bronnen. De analyseroutine zoekt daarom automatisch naar een fragment in de duur van een houtrookmoment waarop de correlatie maximaal is om f_{reg} op te bepalen. Bij Type A momenten is dit meestal bijna het hele houtrookmoment, bij Type B en C is dit meestal slechts een gedeelte van het houtrookmoment. In sommige gevallen zijn er echter zoveel bijdragen van andere bronnen aan $PM_{2.5}$ geweest tijdens de in het roetsignaal waargenomen houtrookpiek, dat het stukje met de beste correlatie alleen op het oog kon worden bepaald. Dit is het stuk waarvoor min of meer een lineair verband tussen BC1-6 en $PM_{2.5}$ concentraties wordt gevonden of, als dit niet goed te

bepalen is, wordt het deel geselecteerd waar de piek in BC1-6 goed herkenbaar is (de grijze gebieden in de linker figuren in Bijlage B).

4. **De $PM_{2.5}$-bijdrage van houtrook na schaling f_{reg} * BC1-6 mag nooit hoger zijn dan de totale $PM_{2.5}$ waarde op elk tijdstip. Als dit door schaling toch het geval is, wordt geschaald met een factor f_{min}, gelijk aan de minimumwaarde van de ratio $PM_{2.5}$/BC1-6 over het gehele houtrookmoment.** Op deze manier kan er nooit meer fijnstof uit houtrook komen dan er überhaupt is, en wordt de maximale bijdrage van houtrook afgeschat. Dit gebeurt eigenlijk alleen in gevallen waarbij de houtrookpiek uit de roettrend niet goed te herkennen is in het verloop van $PM_{2.5}$. De helling van de regressielijn zegt in deze gevallen weinig over de verhouding tussen roet en $PM_{2.5}$ in houtrook.

5. **Als stap 4 nodig is, wordt gecheckt of de laagste waarde (x_{min}) van $PM_{2.5}$/BC1 in het bereik van het houtrookmoment niet kleiner is dan 1.5 en niet groter is dan 9.** Als dat wel zo is, berekenen we een correctiefactor y. Als x_{min} < 1.5 dan is deze correctiefactor gelijk aan $y=1.5/x_{min}$, en als x_{min} > 9 dan is de correctiefactor gelijk aan $y=9/x_{min}$. Deze correctiefactor wordt vervolgens toegepast op f_{min} om de uiteindelijke schalingsfactor **$f = y*f_{min}$** te berekenen. De reden dat deze correctiefactor wordt bepaald op BC1, is dat in eerder werkt niet BC1-6 maar BC1 geschaald werd en hierbij alle gevonden houtrookmetingen aan dit criterium voldeden (zie Figuur 5.4).



Figuur 5.4: Figuur uit de vorige studie. Bij zeer lokale houtrookpieken, waarbij de bijdrage van andere bronnen bij benadering verwaarloosbaar was, was de waarde van $PM_{2.5}$/BC1 in alle gevallen lager dan 9 (de rode lijn). Ook werden er geen metingen gevonden met $PM_{2.5}$/BC1 < 1.5 (de groene lijn).

6. **Als stap 4 niet nodig is, wordt op een vergelijkbare manier als in stap 5 een correctiefactor y bepaald voor de regressie schalingsfactor f_{reg}.** Hierbij wordt eerst de helling van de regressielijn van $PM_{2.5}$ tegen BC1 (x_{reg}) bepaald. Als x_{reg}<1.5 dan $y=1.5/x_{reg}$ en als x_{reg}>9 dan is $y=9/x_{reg}$. De uiteindelijke schalingsfactor in dit scenario wordt dan dus **$f = y*f_{reg}$.**

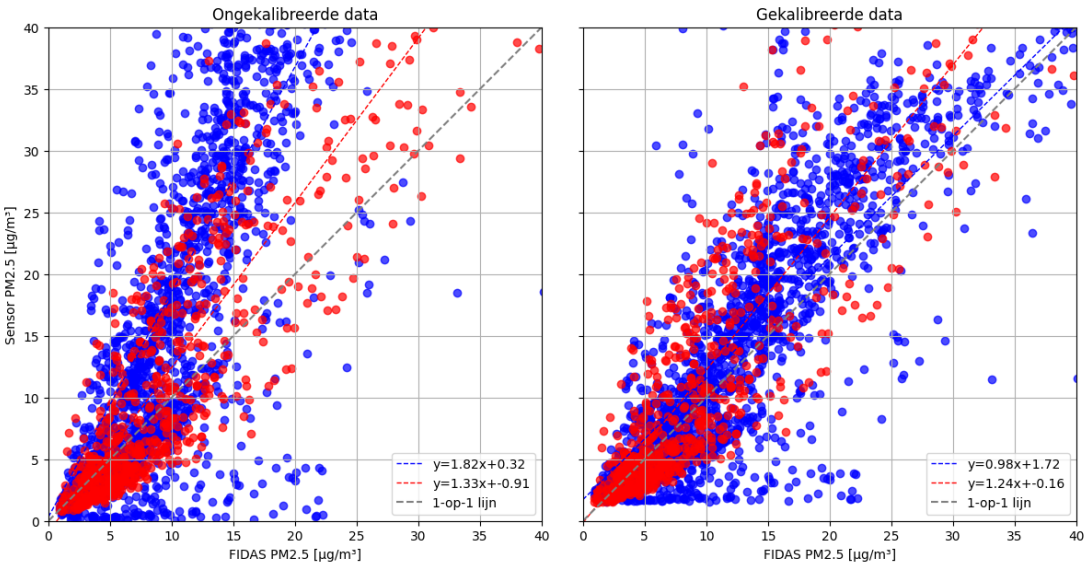
Houtrookmomenten waarvoor stap 4,5 of 6 nodig waren bij de bepaling, hebben de hoogste onzekerheid in de bepaalde houtrookfractie. Dit was bij de volgende houtrookmomenten nodig:
- Begrenzing op maximale $PM_{2.5}$ waarde (stap 4): 2, 10, 14C, 17, 21, 24, 25B, 34
- Begrenzing op maximale $PM_{2.5}$ waarde plus correctiefactor (stap 4+5): 11, 25K
- Regressie plus correctiefactor (stap 6): 6, 26, 27C, 40 ($y=1.5/x_{reg}$) en 19, 22, 25E, 27A, 27B, 27D, 29, 30A, 30B ($y=9/x_{reg}$)

Bijlage D
Kalibratie van sensoren

Het doel van de kalibratie is om de metingen van elke individuele sensor op momenten dat eenzelfde fijnstofwaarde op alle locaties verwacht wordt, zo dicht mogelijk bij het niveau van de FIDAS te brengen. Van de FIDAS is bekend dat de onzekerheden in gemeten concentraties minimaal zijn door de vergelijking met filterwegingen. Een nabijgelegen sensor zou idealiter vergelijkbare concentraties moeten meten, op eventuele invloeden van lokale effecten na.
Om een betere overeenkomst tussen de sensorwaarden en die van de FIDAS te krijgen, wordt de kalibratie gedaan op de achtergrondmomenten van de campagne: dit zijn momenten waarop de bijdrage van niet-lokale bronnen dominant is, doordat er fijnstof komt overwaaien. De kalibratie wordt gedaan door een lineaire regressie uit te voeren op de sensordata tegen de FIDAS-data. Dit betekent dat we een lineair verband zoeken dat de relatie tussen de twee het beste beschrijft. De vergelijking die we daarvoor gebruiken is de volgende:

$$C_{FIDAS} = a + b \cdot C_{sensor}$$

Hierin beschrijft b, de richtingscoëfficiënt, de relatie tussen de door de FIDAS (C_{FIDAS}) en de sensor gemeten concentraties. a is een constante die corrigeert voor de absolute offset tussen de twee instrumenten. Wanneer de relatie tussen de FIDAS en sensormetingen perfect is, is a gelijk aan 0 en b gelijk aan 1. In werkelijkheid zal een perfect lineair verband tussen de twee nooit bestaan, maar het verschil kan wel geminimaliseerd worden. Dit levert een oplossing voor a en b, de kalibratiefactoren, die we vervolgens kunnen gebruiken om de sensordata mee te corrigeren. Dit is gedaan voor elke individuele sensor.



Figuur 5.5: Ongekalibreerde (links) en gekalibreerde data (rechts) voor één voorbeeldsensor, gesplitst in temperaturen boven 10°C (rood) en koude temperaturen onder 10°C (blauw). De gestippelde regressielijnen tonen de relatie tussen de FIDAS en sensormetingen.

Bovengenoemde veronderstelling dat de relatie tussen concentraties gemeten met de FIDAS of met een sensor voor de gehele meetperiode lineair is houdt in de praktijk niet altijd stand. Met name de invloed van meteorologische condities, waaronder luchtvochtigheid, kan een significante impact hebben op de sensormetingen.
Tijdens de meetperiode in dit project lijkt met name een verschil in correlatie tussen de FIDAS en sensoren zichtbaar bij verschillende buitenluchttemperaturen. Een voorbeeld hiervan voor één sensor is te zien in de figuur hierboven. De rode punten zijn gemeten concentraties bij buitenluchttemperaturen hoger dan 10°C, en de blauwe punten bij buitenluchttemperaturen lager dan 10°C. Zichtbaar is dat de sensoren tijdens koudere temperaturen aanzienlijk hoger meten dan de FIDAS. De rode bolletjes zijn meer in lijn. Hier wordt bij de kalibratie rekening mee gehouden door twee losse kalibraties uit te voeren: één op de data waarvoor de gemeten temperatuur hoger is dan 10°C (rode punten), en één op de data waarvoor de gemeten temperatuur lager is dan 10°C. De gevonden kalibratiewaarden (a en b) worden vervolgens gebruikt om alle ruwe data van de sensor om te rekenen naar gekalibreerde waarden. Het resultaat hiervan is voor een voorbeeldsensor te zien in de rechtergrafiek. Na kalibratie liggen zowel de rode als de blauwe regressielijn dichter bij de 1-op-1 lijn.

Voor vier van de 53 sensoren was het niet mogelijk om een kalibratie te doen, door tekortkomingen aan beschikbare data in de kalibratieperiodes. Deze sensoren zijn niet meegenomen in de analyses. Onderstaande tabel laat zien om welke sensoren en locaties het gaat.

Sensor ID	Locatie	Reden
SMU_350976650026807	Zeist	Te weinig data in warme kalibratieperiode.
SMU_350976650035022	Zeist	Te weinig data in zowel koude als warme kalibratieperiode.
SMU_350976650035766	Zeist	Te weinig data in zowel koude als warme kalibratieperiode.
SMU_350976650035014	Zeist	Geen data in zowel koude als warme kalibratieperiode.

Ondertekening

TNO Afdeling Plaats, 30 oktober 2026

ValidSigned by Marieke van Milligen-Versluis on 29-10-2026

Marieke van Milligen
Research Manager

ValidSigned by Paula Bronsveld on 28-10-2026

Paula Bronsveld
Auteur

Energy & Materials TransitionEnergy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl

TNO innovation for life