

KGG en IenW Milieuonderzoeks- programma 2025

Jaarverslag



TNO Public > TNO 2026 R13233

31 maart 2026

TNO 2026 R13233 – 31 maart 2026

KGG en IenW Milieuonderzoeks- programma 2025

Jaarverslag

Auteurs

Paula Bronsveld, Ilona Velzeboer, Daniëlle van Dinther, Arnoud Frumau, Pascal Wintjen, Marc van Dijken, Matthijs Kaandorp, Rudi Kalter en Ilse Schoenmaker

Mede gebaseerd op bijdragen van: Pim van den Bulk, Harmen van Mansom, Marcus Blom, Jan Pieter Lollinga, Remco Moerman, Bastiaan Wit, Arjan Hensen, Jun Zhang, Gerrit Jan de Bruin en Yvonne de Vroede

Rubricering rapport

TNO Public

Titel

TNO Public

Rapporttekst

TNO Public

Bijlagen

TNO Intern

Aantal pagina's

44 (excl. voor- en achterblad)

Aantal bijlagen

1

Projectnaam

KGG-IenW Milieuonderzoek 2025

Projectnummer

060.63411 / 060.63418

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

Dit rapport beschrijft de voortgang binnen de TNO Milieusubsidie in 2025. Het doel van het programma is ondersteuning van de overheid door TNO, door middel van behoud en versterking van hoogwaardige meetinfrastructuur ten behoeve van klimaat- en luchtkwaliteitsmonitoring.

Het programma bestaat uit twee delen: Klimaat (onder KGG) en Luchtkwaliteit (onder IenW), opgedeeld in verschillende deelprogramma's.

Klimaat

In 2025 zijn er verschillende onderzoeken en ontwikkelingen uitgevoerd, gericht op het meten en analyseren van broeikasgasemissies.

- Er zijn verdere stappen gezet voor een laagdrempelige invulling van het Cabauw-dashboard. Ook zijn er vorderingen gemaakt met betrekking tot de fingerprinting-techniek voor mobiele meetdatasets.
- Voor wat betreft veenweidegebieden is de data van metingen bij Zegveld nader in kaart gebracht; onderzoek waarbij is gekeken naar verschillen in emissies van koolwaterstofdioxide en lachgas naar type grondwaterbeheer. Ook is er verder gewerkt aan de data van een paludicultuur-studie. Hierbij is er gekeken naar hoe broeikasgasuitstoot bij een lisdoddeveld wordt beïnvloed door het grondwaterpeil.
- Op de Noordzee is TNO 2022 t/m 2025 betrokken geweest bij methaanmetingen in samenwerking met NIOZ¹. De data die in 2022, 2023 en 2024 is verkregen, is in 2025 uitgewerkt.
- Voor een beter begrip van emissiebronnen en verspreiding van schadelijke halocarbons zal er blijvend een Medusa-meetinstrument in de Cabauw-meettoren worden geplaatst. In 2025 is het inkoopproces voor de nieuwe apparatuur gestart; installatie van dit meetinstrument is beoogd in 2026.
- Mobiele waterstofmetingen zijn gecontinueerd met een hiervoor speciaal ontwikkeld meetinstrument van fabrikant Aerodyne. In 2026 zullen er opnieuw metingen worden gedaan.

Voor wat betreft gerelateerde projecten is er onder andere gewerkt aan de dataverwerking en automatisering van de data-analyse van mobiele NAM-metingen waarbij site-level emissies in kaart zijn gebracht. Ook voor de landbouw, industrie en energiesector zijn er broeikasgasmetingen verricht.

Luchtkwaliteit

Het luchtkwaliteitsdeel van het Milieuonderzoeksprogramma bij TNO stond ook in 2025 voor een groot deel in het teken van houtrookmetingen. Bij deze metingen is er nadruk gelegd op de ontwikkeling van de roetsensoren en het ontwikkelen van een methode om houtrookmomenten te herkennen.

- In het kader van het kennis- en sensorontwikkelingsprogramma is er een houtstookmeetpilot uitgevoerd in de IJmond (2024-2025). Het doel van deze pilot was om te testen of met een combinatie van de TNO-roetsensor en een fijnstofsensor van Hollandse Luchten in een wijk de aanwezigheid van houtrook eenduidig kan worden

¹ NIOZ staat voor Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.

geïdentificeerd. Bij de houtstookpilot is ook de ACSM ingezet, waarbij er specifiek aandacht besteed is aan de bruikbaarheid van dit meetinstrument voor near-real-time bepaling van levoglucosan, als marker voor houtrook, in fijnstof.

- Beleidsondersteuningsbudget is benut voor het opstarten van UFP-metingen aan kachels en voor deelname aan de technische commissie van het Bonn Agreement op het gebied van scheepvaart.
- Als commissielid van de NEN Normcommissie Werkplek en buitenluchtmetingen is er in werkgroep WG42 gestart met het schrijven van een technisch rapport aangaande kwaliteitsborging en kwaliteitscontrole voor individuele sensoren, zowel op het gebied van gassen als fijnstof.
- Er is verkennend onderzoek gedaan naar het herkennen van combinaties van uitgestoten deeltjes afkomstig uit verschillende soorten veel voorkomende antropogene bronnen.
- In een eenmalig, extra deelprogramma wordt door middel van metingen een beter beeld verkregen van de hoeveelheid UFP en fijnstof die wordt uitgestoten door conventionele kachels, Ecodesign kachels en moderne pelletkachels. In 2025 is er in dit kader een literatuurstudie uitgevoerd, zijn er kachels aangeschaft en is begonnen met het uitwerken van de meetopstelling.

Voor wat betreft gerelateerde projecten zijn er luchtkwaliteitsmetingen uitgevoerd ter hoogte van de N203 in Noord-Holland. Tevens zijn er mobiele meetcampagnes uitgevoerd in de Brabantse gemeentes Heusden, Waalwijk en Geertruidenberg in de winter- en zomerperiode. In 2025 is TNO door de provincie Utrecht ook gevraagd om een indicatie te geven van de houtrookbijdrage in specifieke gemeenten, ter ondersteuning van het provinciale luchtkwaliteitsbeleid.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding.....	4
1.1 Achtergrond.....	4
1.2 Motivatie Milieuonderzoeksprogramma Klimaat en Luchtkwaliteit	4
1.3 Doelstelling.....	5
1.4 De deelprogramma's	5
2 Klimaat – KGG	8
2.1 K1 Nationale emissie: Cabauw	8
2.2 K2 Fingerprinting en koppeling databronnen	9
2.3 K3 Veenweidegebieden en emissies uit open water	13
2.4 K4 Indirecte en nieuwe broeikasgassen	19
2.5 Gerelateerde projecten.....	22
2.6 Algemene activiteiten en kennisdeling	23
2.7 Bijdrage meet-infrastructuur	23
2.8 Financiering ICOS-deelname	23
3 Luchtkwaliteit – IenW	25
3.1 LKW-1 Beleidsondersteuning	25
3.2 LKW-2 Kennis- en sensorontwikkeling	25
3.3 LKW-3 Emissies van antropogene bronnen.....	28
3.4 LKW-4 Co-financiering van Ruisdael-programma.....	30
3.5 LKW-5 Focusonderwerp: Houtrook.....	30
3.6 LKW-6 – UFP-emissies uit moderne kachels.....	35
3.7 Gerelateerde projecten.....	36
Ondertekening.....	39
 Bijlage	
Bijlage A: Publicaties	40

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het Milieuonderzoeksprogramma op het gebied van Klimaat en Luchtkwaliteit wordt met name uitgevoerd bij de afdeling Environmental Modelling, Sensing & Analysis (EMSA), welke deel uitmaakt van de TNO-unit Energy & Materials Transition (EMT). Daarnaast dragen ook regelmatig collega's uit andere TNO-afdelingen bij aan het programma vanwege hun aanvullende kennis en expertise. Dit rapport beschrijft de voortgang van het TNO-milieuonderzoeksprogramma in 2025.

Het programma bestaat uit twee delen: Klimaat en Luchtkwaliteit. Het eerste deel, Klimaat, valt onder het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)² en is gericht op versterking van de kennis over de Nederlandse broeikasgasemissies en de inzet van hoogwaardige meetinfrastructuur voor het in kaart brengen daarvan. Het tweede deel, Luchtkwaliteit, valt onder het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) en richt zich op versterking van de kennis over een gezondheidsgerichte aanpak van luchtkwaliteit en het bemeten daarvan.

1.2 Motivatie Milieuonderzoeksprogramma Klimaat en Luchtkwaliteit

De productie van voedsel en goederen heeft negatieve effecten op het milieu. Dit leidt, onder andere, tot klimaatverandering, verslechtering van de menselijke gezondheid en afname van biodiversiteit. Thema's als broeikasgasmonitoring, gezondheidseffecten van fijnstof en het stikstofdossier eisen daarom steeds meer aandacht.

Daarbij heeft de Nederlandse overheid zich gebonden aan afspraken ter verbetering van klimaat en luchtkwaliteit, zoals het Klimaatakkoord van Parijs en het Schone Lucht Akkoord (SLA). Om de bijbehorende doelen te halen is kennis en infrastructuur voor het goed bemeten van de Nederlandse emissies van essentieel belang.

TNO heeft jarenlange expertise op het gebied van broeikasgas- en luchtkwaliteitsmetingen en beschikt over instrumenten en kennis van wereldklasse. Hierdoor kunnen we een significante bijdrage leveren aan het instrumentarium voor het in kaart brengen van de luchtkwaliteit in Nederland. Bovendien maakt TNO deel uit van nationale en internationale netwerken op het gebied van het meten van klimaat en luchtkwaliteit, waardoor onze kennis en aanpak breder worden uitgedragen.

Door middel van dit Milieuonderzoeksprogramma kan deze expertise bij TNO en in Nederland worden behouden en verbeterd. Dit programma maakt het mogelijk om, onder andere, (1) bestaande apparatuur te borgen en te verbeteren, (2) nieuwe apparatuur te testen, (3) lopende campagnes uit te breiden en (4) internationale ervaring en kennis, bijvoorbeeld uit EU-projecten, naar Nederland te halen.

² Met de kabinetsformatie begin 2026 is KGG ondergebracht bij het ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Dit was in 2025 nog niet aan de orde.

1.3 Doelstelling

Met dit programma ondersteunt TNO de overheid bij klimaat- en luchtkwaliteitsvraagstukken. We versterken en behouden hiervoor onze hoogwaardige kennis en meetinfrastructuur voor het meten van luchtverontreiniging en broeikasgassen.

Dit valt uiteen in de volgende vier subdoelen:

1. Innovatie en behoud van hoogwaardige kennis en infrastructuur voor het in kaart brengen van emissies, concentraties en deposities op verschillende tijd- en ruimteschalen. Een eerste voorwaarde hierbij is de beschikbaarheid van de meetfaciliteiten bij TNO. Daarnaast is ook een sterke samenwerking met internationale consortia en de aanwezigheid van TNO op internationale fora van belang voor uitwisseling van kennis en data.
2. Het testen en ontwikkelen van (goedkopere) sensoren en sensornetwerken voor de inzet hiervan in het landelijk meetnetwerk luchtkwaliteit (LML) en bij specifieke bronnen.
3. Het uitvoeren en uitwerken van mobiele en stationaire meetcampagnes met (nieuwe) hoogwaardige instrumenten en/of sensornetwerken. Hiermee vergaart TNO voor de overheid kennis over relevante luchtkwaliteitsvraagstukken en houdt TNO oog op het Nederlandse emissielandschap. Om relevantie van de data te kunnen garanderen, is het belangrijk dat ook de emissieverantwoordelijken, hun belangenorganisaties en/of het relevante bevoegde gezag hierbij betrokken worden, en dat campagnes in samenwerking en overleg met deze partijen worden opgezet.
4. Beleidsondersteuning door middel van het dissemineren van de resultaten en methoden naar andere bevoegde gezagen (bijvoorbeeld provincies, gemeentes of uitvoeringsorganisaties). Daarmee kunnen beleidskeuzes worden gemaakt en onderbouwd. Vervolgens kan de impact van deze keuzes worden gekwantificeerd.

De deelprogramma's waaraan dit jaar binnen het programma zijn gewerkt, dragen allen bij aan één of meer van deze doelen.

1.4 De deelprogramma's

Het milieuonderzoeksprogramma is voor zowel Klimaat als Luchtkwaliteit opgesplitst in meerdere deelprogramma's. Een overzicht van de deelprogramma's is gegeven in Tabel 1.1 en Tabel 1.2.

De deelprogramma's strekken zich uit over meerdere jaren en de prioriteiten kunnen binnen een jaar alsook van jaar tot jaar iets verschuiven. Dit leidt soms tot een schijnbaar scheve verdeling van de resultaten over de onderdelen in het jaarrapport. Daarnaast zit er een natuurlijke vertraging tussen de uitgevoerde metingen en de interpretatie van de metingen, wat vaak veel meer tijd kost. Daarom wordt voor de verschillende deelprogramma's regelmatig gerapporteerd over de ontwikkeling en uitvoering van metingen die later nog geanalyseerd moeten worden, of wordt er alleen gerapporteerd over de duiding van data uit voorgaande jaren.

Tabel 1.1: Overzicht van deelprogramma's binnen het onderdeel Klimaat.

Code	Deelprogramma
K1	Nationale emissie: Cabauw
K2	Fingerprinting
K3	Veenweidegebieden en water
K4	Indirecte en onbekendere broeikasgassen

Het Klimaat-deel gaat over het ontwikkelen van kennis en methodieken voor de bepaling van broeikasgasconcentraties en -emissies. Om meer focus aan te brengen is er in 2024 besloten om het aantal deelprogramma's terug te brengen van zes naar vier. Het deelprogramma over koppelen van databronnen is bij K2 gevoegd en het deelprogramma voor het ontwikkelen van meettechnieken voor emissies uit de landbouw en olie- en gassector is geschrapt; dit onderwerp kan voorlopig opgevangen worden in gerelateerde projecten.

Deelprogramma's K1 en K2 richten zich op vernieuwing, verbetering en behoud van de meetkennis en -infrastructuur: K1 is gericht op de analyse van vaste meetstations (met name Cabauw) en K2 op verbetering van de analyse van mobiele data en eventuele andere beschikbare databronnen, zoals semi-stationaire metingen, drones en satellieten.

Deelprogramma's K3 en K4 richten zich op het specifiek bemeten van bepaalde typen bronnen. K3 richt zich op watergerelateerde emissies, zoals emissies uit veenweidegebieden, sloten en de Noordzee. In K4 wordt gekeken naar de emissies van indirecte en onbekendere broeikasgassen, zoals halogeenkoolwaterstoffen en waterstof.

Tabel 1.2: Overzicht van deelprogramma's binnen het onderdeel Luchtkwaliteit.

Code	Deelprogramma
LKW-1	Beleidsondersteuning
LKW-2	Kennis- en sensorontwikkeling
LKW-3	Emissies van antropogene bronnen
LKW-4	Co-financiering
LKW-5	Focusonderwerp: Houtrook
LKW-6	Extra programmaonderdeel: UFP-emissies uit moderne kachels

In het Luchtkwaliteit-deel (Tabel 1.2) van het programma is ingezet op de ontwikkeling van luchtkwaliteitsmetingen in relatie tot gezondheid.

Het doel van deelprogramma LKW-1 is om lenW of gerelateerde partijen³ te ondersteunen met ad-hoc onderzoeksvragen. Voor TNO helpt het meedenken met dit soort actuele vraagstukken om beter te sturen op maatschappelijk relevante onderwerpen.

Het sensorontwikkelingsprogramma binnen TNO (LKW-2) richt zich op het toekomstbestendig maken van de Nederlandse meetinfrastructuur. De ontwikkeling en het testen van betaalbare en hoogkwalitatieve instrumenten voor monitoring van luchtkwaliteit is een belangrijke pijler binnen dit deel van het programma. Zo wordt er onder andere gewerkt aan de verbetering van UFP-metingen met de FMPS en chemisch specifieke metingen van fijnstof (ACSM, PTR-MS). TNO's deelname aan NEN- en CEN-normcommissies voor standaardisatie van fijnstofmetingen valt hier ook onder.

Mobiele en semi-mobiele meetcampagnes voor metingen met (nieuwe) hoogwaardige en low-cost instrumenten zijn van groot belang voor de kennisontwikkeling en beleidsondersteuning bij actuele luchtkwaliteitsvraagstukken. In deelprogramma LKW-3 wordt daarom aandacht besteed aan meetcampagnes en data-analyse voor de bepaling van emissies van verschillende antropogene bronnen.

³ Zoals Rijkswaterstaat of het RIVM.

Deelprogramma LKW-4 is budget dat gereserveerd is voor de co-financiering van het Ruisdael-programma. LKW-5 gaat over het in overleg met het ministerie gekozen focusonderwerp. Het focusonderwerp voor 2025 was opnieuw houtstook.

Het deelprogramma LKW-6 is medio 2025 toegevoegd aan het IenW luchtkwaliteitsprogramma. Het betreft hier een extra budget wat is vrijgemaakt door IenW met als doel het bepalen van de uitstoot van (ultra)fijnstof door moderne kachels⁴. Metingen en analyse lopen door en de planning is dat ze zullen worden afgerond in 2026

⁴ Bronsveld et al (8-9-2025) IenW Milieuonderzoeksprogramma 2025-2028, voorstel aanvullend deelprogramma LKW-6 – UFP- emissies uit moderne kachels.

2 Klimaat – KGG

2.1 K1 Nationale emissie: Cabauw

De Cabauw-toren, ontworpen door het KNMI, speelt al meer dan 50 jaar (sinds 1972) een rol in meteorologische studies van het onderste deel van de atmosfeer. In 1992 werden hier door ECN CO₂-metingen (koolstofdioxide) aan toegevoegd, gevolgd door CH₄-metingen (methaan) in 1994. In de loop der jaren kwamen daar verschillende instrumenten bij, bijvoorbeeld voor metingen van N₂O (lachgas) en CO (koolmonoxide).

De metingen worden uitgevoerd op verschillende niveaus; op 207 meter hoogte worden continue metingen verricht en op vier niveaus (27, 67, 127, 207 meter) elke 20 minuten. Door de combinatie van verschillende stoffen en meethoogtes ontstaat een gedetailleerd beeld van de langtermijntrends en variaties van broeikasgasconcentraties en andere stoffen die het klimaat beïnvloeden.

Het Cabauw-station fungeert ook als hub voor internationale onderzoeksprojecten, wat belangrijke externe kennis en samenwerking oplevert voor de Nederlandse gemeenschap. Inmiddels is het broeikasgas-instrumentarium in de toren ook onderdeel van het Europese ICOS-netwerk (Integrated Carbon Observation System). Dit instrumentarium wordt beheerd door TNO. De inzet van dit deelprogramma is om de broeikasgasdata van de Cabauw-toren toegankelijker te maken voor beleidsondersteuning, zoals verificatie van de Nederlandse broeikasgasemissies in combinatie met gegevens uit omringende landen en de andere Nederlandse ICOS-stations Lutjewad en Loobos, en te werken aan de wetenschappelijke interpretatie van deze datastroom.

Activiteiten en resultaten in 2025: Cabauw-dashboard

In 2023 is gestart met het Cabauw-dashboard om metingen van Nederlandse emissies op een laagdrempelige wijze inzichtelijk te maken en te vergelijken met berekende broeikasgastrends uit de Emissieregistratie van het RIVM. Er is in dit kader een concept-site ontwikkeld met uitleg hoe model- en meetgegevens kunnen worden gekoppeld en hoe dit kan worden toegepast op broeikasgasdata die is vergaard via het Cabauw-meetstation. Naast uitleg over het principe van *back trajectory* – de analyse van waar gemeten lucht vandaan komt voor een beter begrip van lokale emissies – worden trends in gemeten broeikasgasconcentraties gevisualiseerd en toegelicht. In 2026 zullen voor wat betreft de indeling, look-and-feel en leesbaarheid van het dashboard optimalisaties worden doorgevoerd, waarop het Cabauw-dashboard openbaar beschikbaar komt in de TNO-website.

In 2025 hebben we gewerkt aan een toepassingsmethodologie om met behulp van radon-metingen op de Cabauw-toren (sinds 2005/2007 op 27 en 207 meter) broeikasgasemissies te bepalen.⁵ Deze methodiek kunnen we gebruiken om Nederlandse emissies via het Cabauw-dashboard op een laagdrempelige manier inzichtelijk te maken naast de emissie-indicator.

⁵ Zie [EGUsphere - Review of the Radon Tracer Method for GHG emission estimates: development, application guidelines, improvements, and caveats](#)

2.2 K2 Fingerprinting en koppeling databronnen

Dit deelprogramma richt zich op het verbeteren van de toepassing en analyse van mobiele meettechnieken. Dit kan gaan om mobiele metingen uitgevoerd tijdens ritten of het plaatsen van meetwagens met stationaire meetinstrumenten op strategische locaties. Daarnaast is het waardevol om metingen op de grond te combineren met gelijktijdige meetdata van drones, vliegtuigen of zelfs satellieten en met data van nabije vaste, goed ingerichte meetstations.

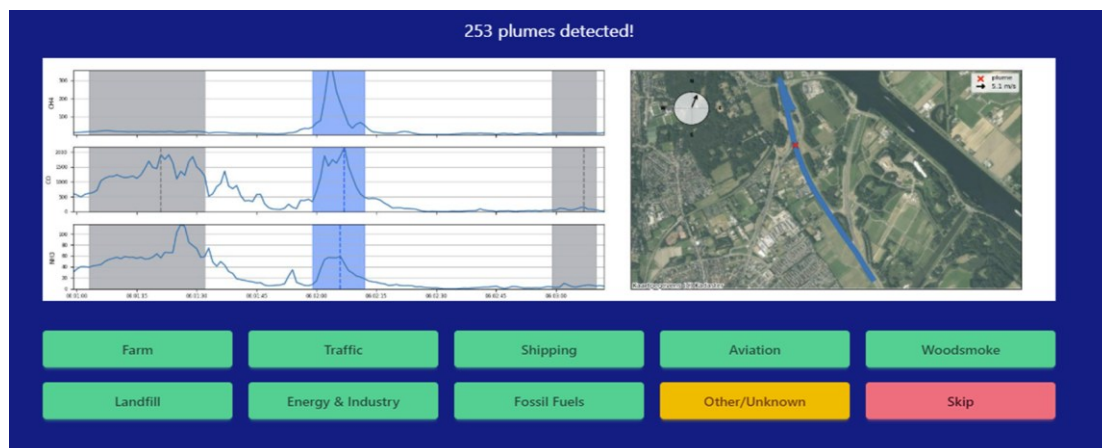
Een belangrijk instrument bij de analyse van mobiele meetgegevens is *fingerprinting*. Door zoveel mogelijk broeikasgassen en luchtvervuilende componenten gelijktijdig te meten, kunnen typen bronnen worden herkend aan de combinatie en ratio van stoffen die ze uitstoten, de 'fingerprint'. Een combinatie van lachgas- en methaanemissies wijst bijvoorbeeld typisch op landbouwemissies, terwijl de combinatie van lachgas en koolmonoxide duidt op verkeersemisies. Kennis van een breed spectrum aan fingerprints is een krachtig instrument voor brontoekenning van gemeten concentraties en de bijbehorende emissiebepaling.

Activiteiten en resultaten in 2025

Pluimidentificatie

In 2025 is verder gewerkt aan het in kaart brengen van de fingerprints van bronnen. Reflecterend op eerdere methodes om deze fingerprints te duiden, is besloten om een nieuwe (semi-)geautomatiseerde tool te ontwikkelen. De voordelen hiervan zijn dat 1) het vele malen sneller wordt om een grote hoeveelheid pluimen in meetdata te analyseren, door handwerk zoveel mogelijk te automatiseren, 2) de geïdentificeerde pluimen makkelijk te reproduceren zijn gegeven dezelfde dataset, en 3) de pluimen een consistente definitie hebben. Dit laatste is vooral belangrijk in de vervolgstap om de bron toe te kennen aan pluimen (fingerprinting), dat hierdoor ook gemakkelijker kan worden geautomatiseerd.

De pluimidentificatie-tool die uiteindelijk is ontwikkeld, maakt gebruik van een combinatie van geautomatiseerde pluimdetectie en handmatige verificatie. De pluimdetectie, gebaseerd op een piekdetectie-algoritme in programmeertaal Python, doorzoekt per gemeten stof waar pluimen zijn gemeten en hoe breed ze zijn. De gedetecteerde pluimen in alle gemeten stoffen worden vervolgens gecombineerd tot een lijst met alle pluimmomenten. Deze worden dan één voor één geplot in de tool (zie figuur 2.1), zodat de gebruiker snel door alle pluimen heen kan kijken en kan selecteren of het inderdaad een pluim is of slechts ruis. Deze handmatige verificatie is nodig omdat het algoritme niet perfect is, en we zowel het aantal *false positives* (gedetecteerde pluimen die eigenlijk slechts ruis zijn) als *false negatives* (pluimen die niet gevonden zijn) willen minimaliseren.



Figuur 2.1: De door TNO ontwikkelde pluimdetectie-tool, waarin potentiële pluimmomenten worden gepot i.h.k.v.fingerprinting.

Wanneer alle geïdentificeerde pluimen zijn bekeken en zijn geaccepteerd of verwezen, kan de data inclusief pluimen worden gedownload. De tool houdt ook ruimte voor gebruikers om een aantal parameters te specificeren die de automatische pluimdetectie beïnvloeden, zodat informatie over de specifieke stoffen of de rit kan worden meegenomen. Deze parameters kunnen aan het einde ook worden gedownload, zodat het duidelijk is welke zijn gebruikt voor een specifieke analyse en deze makkelijk kan worden gereproduceerd.

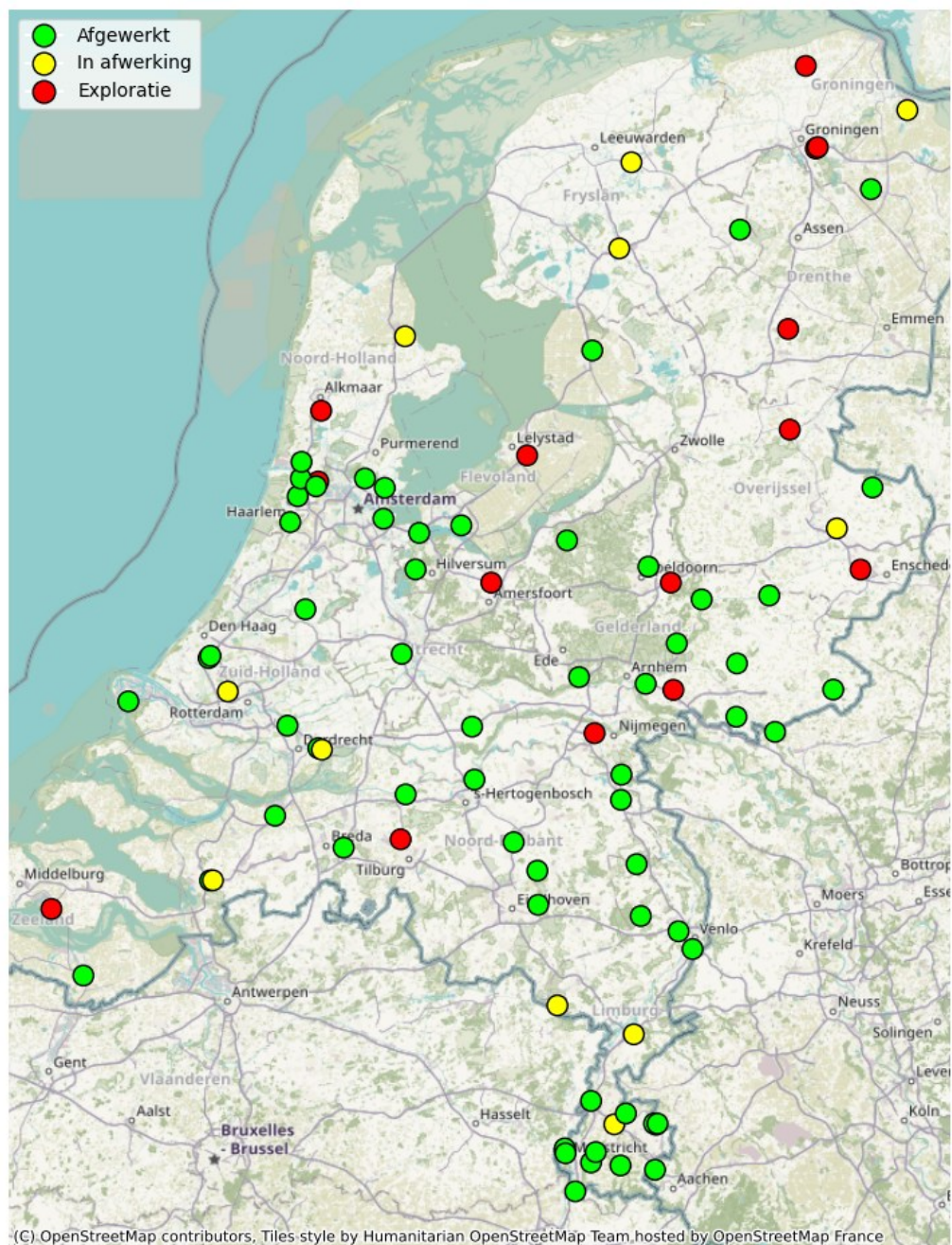
Fingerprint-automatisering

Om te kunnen bepalen welke bron bij een geïdentificeerde pluim hoort, wordt een *supervised machine learning*-model getraind op een dataset van pluimen waarvan de bron bekend is. Door het model als input informatie over elke individuele pluim te geven (*features*), in combinatie met de daadwerkelijke bron (label), kan het model gaan leren hoe het verschillende bronnen kan onderscheiden. Voorbeelden van features zijn de hoogte en breedte van een pluim, of de ratio tussen twee stoffen (bijvoorbeeld $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ voor boerderijen). Wanneer het model getraind is, kan het voor een nieuwe pluim de bron toekennen gebaseerd op de bijbehorende features.

In 2025 zijn de eerste modellen getraind op een kleine dataset van pluimen, en de eerste resultaten waren veel belovend. Deze modellen konden in 80% van de gevallen de juiste bron toewijzen aan een pluim. Echter vergt het trainen van een goed model een grote dataset van pluimen waarvan de bron bekend is, met een goede aanwezigheid van elke individuele bron. Dit werk zal in 2026 worden vervolgd door meer metingen te analyseren in verschillende locaties van het land en met verschillende combinaties van meetapparatuur aan boord. Dit laatstgenoemde is met name interessant voor metingen die zullen worden gedaan in 2026, door de recente aanschaf van nieuwe apparatuur die het mobiel meten van o.a. ammoniak (NH_3) en waterstof (H_2) mogelijk maken; stoffen die belangrijk kunnen zijn om de fingerprints van verschillende bronnen te onderscheiden.

Metingen aan afvalstortplaatsen

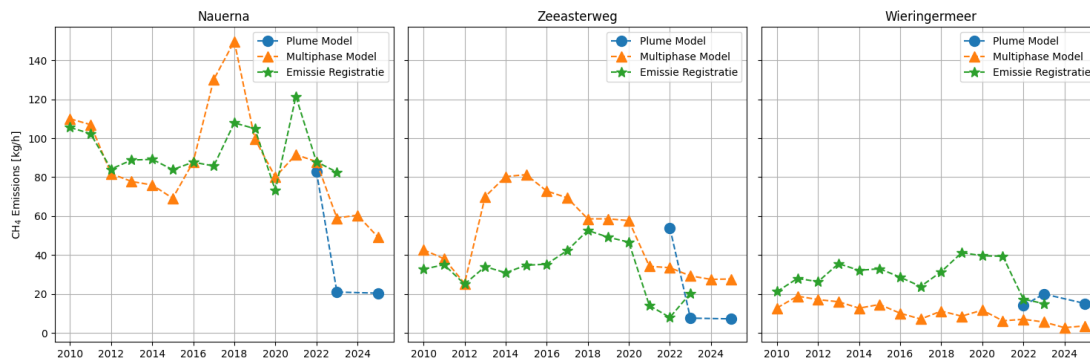
Afvalstortplaatsen vormen met 10%, na de agrarische sector (77%), de grootste bron van methaan. Op dit moment zijn er nog zo'n 20 actieve afvalstortplaatsen in Nederland (zie figuur 2.2).



Figuur 2.2: Overzicht van stortplaatsen, onderverdeeld in afgewerkt (groen), in afwerking (geel) en exploratie (rood).

Veranderingen in de regelgeving rondom afvalstortplaatsen heeft sinds 1990 tot een sterke afname in methaanemissies geresulteerd. Daarnaast zorgt de invoering van stortgas-extractiesystemen voor een verdere reductie van de methaanemissies van stortplaatsen. TNO doet al sinds 1997 metingen aan afvalstortplaatsen. Via een eerste gezamenlijk onderzoek met Afvalzorg werden de eerste mobiele metingen aan de Nauerna-stortplaats uitgevoerd. Naast stortplaats Nauerna (Assendelft), zijn ook Zeeasterweg (Lelystad) en Wieringermeer (Medemblik) meerdere malen met mobiele metingen geanalyseerd (Hensen en Scharff, 2001; Velzeboer et al, 2024). De gemeten emissieschattingen van Nauerna van de verschillende studies over een periode van bijna 30 jaar zijn vergeleken met de trend in de emissies van alle

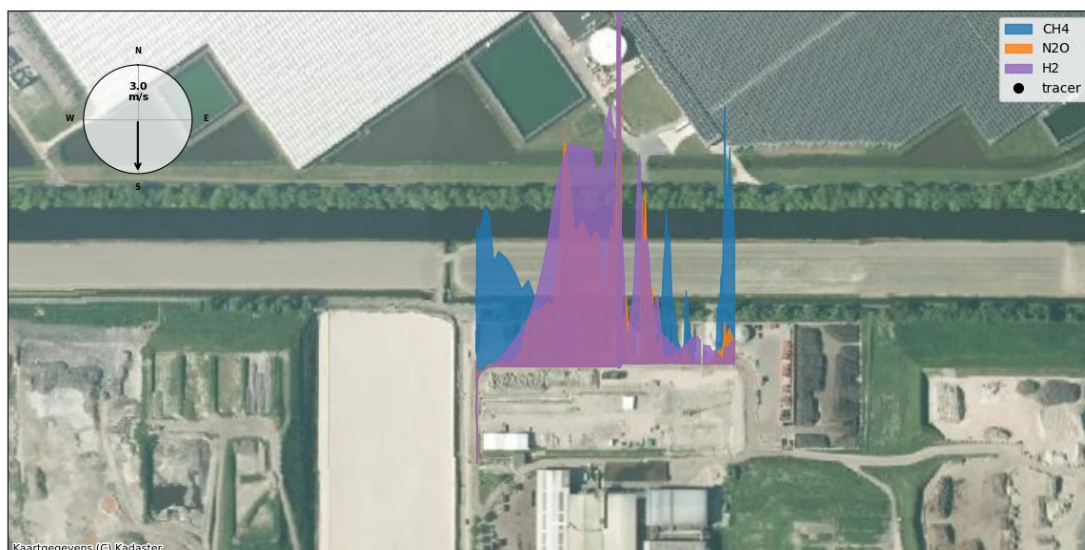
stortplaatsen die in de Emissieregistratie zijn gerapporteerd. Deze laten een goede overeenkomst zien. Figuur 2.3 laat een vergelijking zien van de gemeten emissies van 2022, 2023 en 2025 met de Emissieregistratie en het Afvalzorg Multiphase Model.



Figuur 2.3: CH₄-emissieresultaten, bepaald via mobiele metingen en het pluimmodel (blauw; TNO), Multiphase Model (oranje; Afvalzorg), en Emissieregistratie (groen).

Vanuit een ander project (Verifying and improving methane emission inventory data using atmospheric measurements; VIME_NL) is onderzoek gedaan naar een procedure om de beschikbare meetdata te kunnen gebruiken voor het opschalen naar nationale totale emissies per sector (Super et al, 2025). Specifiek voor stortplaatsen komt naar voren dat de metingen een aantal grote stortplaatsen in Nederland dekken, maar dat er beperkte informatie beschikbaar is over de condities waaronder de metingen hebben plaatsgevonden. Daarnaast is de informatie over de samenstelling van het afval beperkt. De geschatte oxidatiesnelheid van verschillende studies – dus de hoeveelheid methaan dat wordt omgezet naar CO₂ in de toplaag van de stortplaats – laat grote variaties zien, zonder duidelijke verklaring. Ook ontbreekt informatie over oudere en afgesloten stortplaatsen om een goede opschaling mogelijk te maken. Dit rapport toont aan dat voor metingen bij stortplaatsen zowel actieve als afgesloten locaties nodig zijn om de methaanemissies te kunnen blijven verifiëren.

In 2025 heeft TNO de emissies van de bovengenoemde drie stortplaatsen van Afvalzorg weer met mobiele metingen bepaald. Het rapport is om dit moment in de afrondende fase (Velzeboer et al, 2026 in prep.). De emissies in 2025 waren voor alle drie de stortplaatsen lager of op vergelijkbaar niveau in vergelijking met de emissies in 2022 en 2023. Er waren wel verschillen met de berekende emissies uit het Afvalzorg Multiphase Model. Afhankelijk van de stortplaats had dit verschillende oorzaken, zoals het gebruik van een nieuwe gasextractie-installatie en het organisch koolstofgehalte, dat afhankelijk is van het type afval en niet altijd bekend was. Bij Nauerna hebben we ook waterstof gemeten. Dat was afkomstig van de bodemassen die op het terrein opgeslagen en verwerkt worden. Ook bij Wieringermeer hebben we waterstof gemeten. De pluimen daar waren afkomstig van de compost dat daar lag opgeslagen (zie figuur 2.4).



Figuur 2.4: Overzicht van metingen naar CH₄ (blauw), N₂O (oranje) en H₂ (paars) bij een composthoop op de Wieringermeer-stortplaats.

Daarnaast heeft TNO in samenwerking met de Rijksuniversiteit Groningen (RUG) metingen uitgevoerd bij de actieve stortplaats de Wierde in Heerenveen. TNO heeft mobiele metingen inclusief tracer release uitgevoerd. RUG heeft dronemetingen gedaan. Op deze manier kunnen we zowel de horizontale als verticale verspreiding van een pluim in kaart brengen. Naast methaan hebben we ook lachgas, koolstofmonoxide, koolstofdioxide, ammoniak en waterstofconcentraties gemeten. In 2026 wordt de data gezamenlijk uitgewerkt, waarop er een wetenschappelijke publicatie zal volgen.

2.3 K3 Veenweidegebieden en emissies uit open water

Het ontwikkelen van meettechnologieën voor broeikasgassen uit veenweidegebieden en open water, zoals slootjes en meren, is essentieel om nauwkeurig inzicht te krijgen in de uitstoot van CO₂ (koolstofdioxide), CH₄ (methaan) en N₂O (lachgas). Ongeveer een derde van het organische koolstof op aarde ligt opgeslagen in veenweidegebieden. Natuurlijke veengebieden hebben door een hoge grondwaterspiegel een aangroei van veen en dus opslag van koolstof, ofwel een CO₂-opname. Echter, door de hoge grondwaterspiegel wordt ook methaan uitgestoten c.q. geëmitteerd. De uitwisseling van broeikasgassen zoals CO₂ en CH₄ tussen atmosfeer en het oppervlak, in dit geval veengebieden, noemen we fluxen van broeikasgassen. De balans van deze fluxen is voor natuurlijke veengebieden een netto-opname. Bij ontwaterde en verstoorde veengebieden, zoals de meeste in Nederland vanaf de Middeleeuwen, wordt het veen door blootstelling aan de lucht verteerd. Daarbij komt CO₂ vrij naar de atmosfeer. Deze gebieden fungeren dus op basis van deze CO₂-uitstoot als broeikasgasbron. De afbraak en compactie van veen door grondwateronttrekking is ook de oorzaak van de bodemdaling in deze gebieden. Bij afbraak van veen, bemesting en urine van koeien is stikstof beschikbaar die in de bodem via verschillende processen (afhankelijk van temperatuur, vocht en micro-organismen) tot lachgas (sterk broeikasgas) gevormd wordt. De mate van lachgas- en methaanemissies is een balans van zowel grondwater- als landbouwmanagement, terwijl door de verlaagde grondwaterspiegel ten opzichte van natuurlijke veengebieden is er sowieso sprake van CO₂-emissie. De sloten in veengebieden zijn overwegend relatief grote methaanbronnen.

Door de grote afhankelijkheid van de grondwaterspiegel zijn veengebieden ook kwetsbaar voor indirecte menselijke invloeden, waaronder door klimaatverandering veroorzaakte verdroging. Het is cruciaal om te bepalen of beheersmaatregelen, zoals verandering van grondwaterniveau, kunnen bijdragen aan de doelstelling van 1 Mton CO₂ equivalent emissievermindering voor veengebieden zoals in het Klimaatakkoord opgenomen. TNO neemt in dit kader deel aan het NOBV-project waarbij kennisinstellingen en universiteiten gezamenlijk broeikasgasmetingen uitvoeren op meerdere locaties verspreid over West- en Noord-Nederland onder verschillende beheersmaatregelen. De kennis die uit de metingen wordt verkregen over de emissie of opname van broeikasgasemissies, wordt in modellen opgenomen. Dit zodat uiteindelijk met deze modellering een inschatting gemaakt kan worden van de balans van de verschillende broeikasgassen onder de verschillende condities. Dit helpt bij de ontwikkeling van langetermijnstrategieën en duurzaam beheer van land en water. Ook broeikasgasmetingen op grotere wateren, zoals de Noordzee, zijn belangrijk. Zeeën en oceanen spelen een cruciale rol in de wereldwijde koolstofcyclus, doordat ze grote hoeveelheden CO₂ opnemen en opslaan. De Noordzee is een relatief ondiepe en dynamische zee, waar complexe processen plaatsvinden die invloed hebben op de uitwisseling van broeikasgassen tussen water en atmosfeer. Daarnaast heeft menselijke activiteit, zoals scheepvaart en olie- en gaswinning invloed op de emissies en opname van broeikasgassen. Dit maakt monitoring noodzakelijk. TNO neemt daarom ook regelmatig deel aan meetcampagnes om de broeikasgasemissies op en uit de Noordzee inzichtelijk te maken.

Activiteiten en resultaten in 2025: Open water, veenweidegebieden en gaslekkages in de Noordzee

Metingen aan open water

Het plan voor 2025 omvatte additionele metingen aan de sloten bij de veenweidemetingen voor het NOBV-project op Zegveld (zie volgende alinea). In dit kader heeft TNO metingen gedaan in 2022-2024, zoals hieronder beschreven. In 2025 zou er een NOBV-project voor nieuwe metingen starten, maar de opdracht hiervoor wordt voor Q2 van 2026 verwacht. Metingen aan open watersystemen, zoals het IJsselmeer, die voor 2025 waren voorzien, zullen gelet op bemensing en beschikbare meetapparatuur in 2026 plaatsvinden.

Metingen aan broeikasgasemissies uit veenweidegebieden

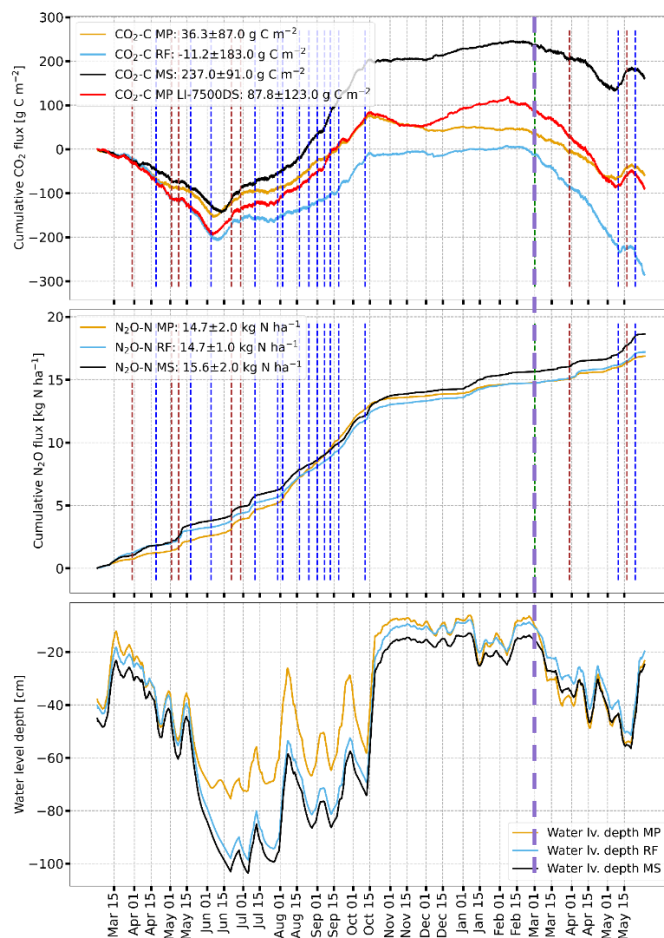
Binnen het NOBV-project ondersteunt TNO andere onderzoekspartijen met fluxmetingen en analysemethoden om de relatie tussen bodemdaling, grondwaterbeheer en emissies beter te begrijpen. Voor dit type metingen heeft TNO binnen het Milieuonderzoeksprogramma een systeem ontwikkeld waarmee in het veenweidegebied bij Zegveld op drie velden met verschillend grondwaterbeheer tegelijk metingen zijn gedaan. Het programma wordt ook gebruikt om extra analyses op de meetdata uit te voeren en het ministerie op de hoogte te brengen van de bevindingen binnen het NOBV-programma. Zie figuur 2.5 voor de locaties van de metingen op Zegveld.



Figuur 2.5: De meetopstelling bij Zegveld om verschillen in emissies van koolwaterstofdioxide en lachgas naar type grondwaterbeheer in kaart te brengen en relevante, contextuele factoren binnen deze studie (onder andere grasland met grazende koeien, het periodiek uitrijden van mest en weersomstandigheden).

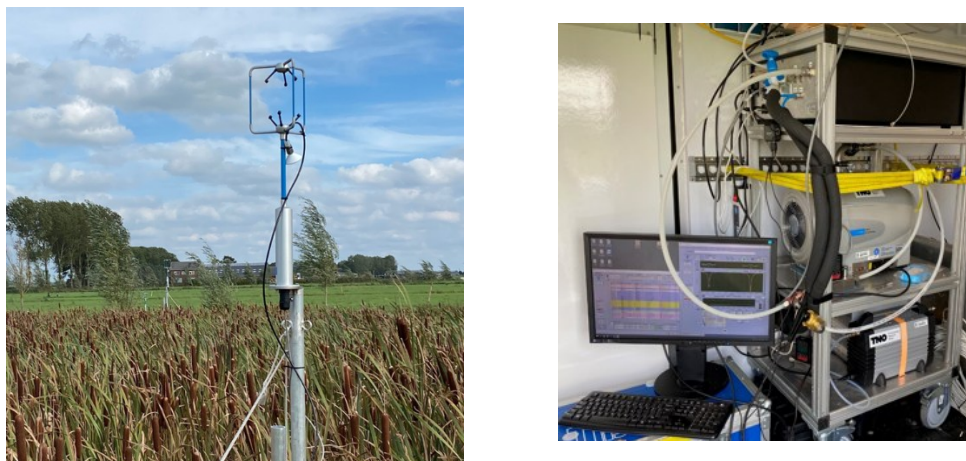
De data van metingen in het veenweidegebied bij Zegveld uit de periode 2022-2024 is in 2025 verder uitgewerkt (zie figuur 2.6). Hierbij is gekeken naar de emissies van CO₂ (koolwaterstofdioxide) en N₂O (lachgas) voor drie bemeste velden, omringd door sloten, met een verschillend grondwaterbeheer: drainage met waterdrukregeling, een gecontroleerd slootwaterpeil (referentie) en drainage in combinatie met een gecontroleerd slootwaterpeil. Voor alle drie de velden was een vergelijkbare jaarlijkse N₂O-emissie meetbaar van ongeveer 15 kg N per ha. Sterke toenames in deze emissies waren zichtbaar na regen. Ook was de lachgasemissie lager in de winter met hoge grondwaterspiegel (afvlakking van de cumulatieve trend in figuur 2.6). In dezelfde figuur is een verschil in de CO₂fluxen gemeten met twee meetinstrumenten zichtbaar (rode en gele lijn). Momenteel wordt er gewerkt aan een correctie op de fluxmetingen die het verschil tussen de rode lijn en de gele lijn zal verkleinen. De benodigde correctie is inherent aan dit type meting en is ook de reden om de meting weergegeven door de rode lijn uit te voeren.

Deze studie heeft naar voren gebracht dat er een duidelijke samenhang is tussen N₂O-emissies en regen, bemesting alsook beheer van het waterpeil. Op het moment dat het waterpeil zich dichtbij het oppervlakeniveau bevond, namen de N₂O-emissies sterk af. Voor CO₂ kan eenzelfde conclusie worden getrokken. Om vast te kunnen stellen welk type grondwaterpeilbeheer het meest effectief is, en om de emissiefactoren van N₂O te kunnen schatten, moet er ook worden gekeken naar zowel de stikstofinput van meststoffen en vee (urinevlekken), en de koolstofonttrekkingen door oogst en begrazing. Deze data is binnen NOBV sinds 2025 beschikbaar en zal betrokken worden in verdere analyse. Ook wordt de analyse van de fluxmetingen door de verschillende instituten in 2026 met elkaar vergeleken.



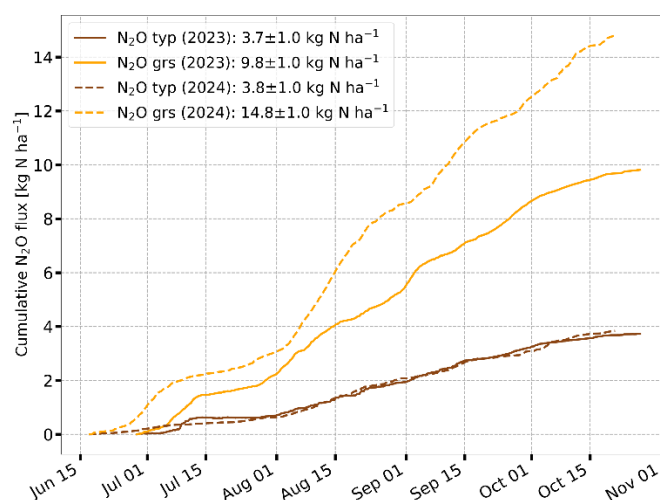
Figuur 2.6: Boven en midden: Cumulatieve flux van CO₂ en N₂O in, respectievelijk gram koolstof per m² en kg stikstof per ha in de periode maart 2023 t/m mei 2024, gemeten voor de drie bemeste velden. *Zwarte lijn:* gecontroleerd slootpeil en drainage. *Gele lijn:* drukdrainage. *Blauwe lijn:* gecontroleerd slootpeil. *Rode lijn:* de gemeten emissies voor het veld met drukdrainage, gemeten met een ander instrument. De verticale lijnen geven de momenten aan van bemesting (bruin) of beweiding (blauw) van de velden. De verticale onderbroken paarse lijn geeft het referentiepunt voor de netto emissie na een cyclus van een jaar. In de legenda zijn ook de totale emissiewaarden op jaarbasis gegeven met de meetonzekerheid. Onder: Metingen van de waterstand in dezelfde periode. Hierbij is ook zichtbaar er geen optimale controle van het waterniveau in het MS-veld (zwart) is geweest, aangezien de verwachting is dat het veld in de zomer vochtiger zou moeten zijn dan het referentieveld (blauw).

In de periode 2023-2024 zijn er ook fluxmetingen uitgevoerd bij een zogenaamd paludicultuur-gebied: een rietveld (lisdodde), zie figuur 2.7. Gedurende drie maanden vonden metingen plaats, in de laatste fase voor de oogst van dit rietveld (*senescence* of afrijpingsfase). Gedurende dit experiment is het waterniveau afwisselend hoog geweest, zoals tijdens de groei, en drooggelegd om na te gaan of er bij drooglegging in de afrijpingsfase van de lisdodde een broeikasgaswinst te behalen is. Bij drooglegging verwacht men minder methaanemissie dan bij een hoog waterniveau, maar kan er daarentegen lachgasemissie gaan optreden door beluchting van de bodem. Daardoor kan stikstof worden omgezet door micro-organismen. Ook is een vergelijking gemaakt van de lachgasemissie met het omliggende grasveld met gecontroleerde grondwaterspiegel (sloot), zie figuur 2.8.



Figuur 2.7: Een impressie van de meetlocatie en de voor de paludicultuur-studie gebruikte meetinstrumenten.

Aangezien het een betrekkelijk smal rietveld betrof, zijn metingen op verschillende plekken uitgevoerd om de invloed van het rietland en het grasveld te kunnen onderscheiden. Er is een aanzienlijk verschil in N_2O -emissies tussen rietveld en grasland geconstateerd, met – volgens verwachting – relatief lage emissies bij het rietveld.



Figuur 2.8: Emissies van lachgas ter hoogte van rietveld versus het grasland gedurende een aantal maanden van de paludi-cultuur studie.

Onder andere de hoogte van het (grond)water en de temperatuur beïnvloeden de microbiële activiteit in het veld. Deze omstandigheden zijn niet constant – denk aan veel of juist weinig regenval gedurende een periode – en zijn van invloed op de mate waarin er sprake is van N_2O -emissies. De relatief frequente afwisseling tussen hoge en lage waterstanden tijdens de metingen maar ook de regen, maakt de interpretatie van gemeten emissies uitdagend aangezien lachgas emissies een vertraagde reactie zijn van het eerst beluchten van de bodem, temperatuur en activiteit micro-organismen. Een conclusie die voorlopig getrokken kan worden op basis van de meetdata, is dat N_2O -emissies voor lisdodde aanmerkelijk lager zijn (factor 3-4) dan omliggend grasland, maar ook dat zij lijken toe te nemen bij afname van het waterpeil in het rietveld.

Voor wat betreft de emissie van CH₄ was dit binnen deze studie voor het rietveld en naastgelegen grasland vergelijkbaar. Daarbij is het relevant om te benoemen dat er in de meetomgeving verschillende CH₄-bronnen aanwezig waren, zoals sloten, een boerderij en grazend vee.

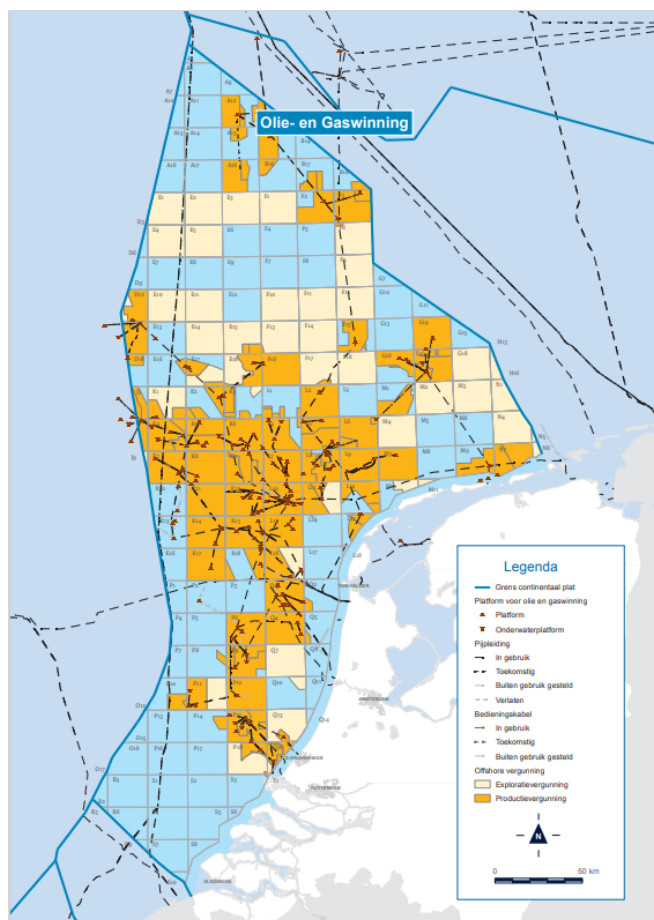
Beide studies waren gericht op het meten van de broeigasgasfluxen van het veld. De meetopstelling is hiertoe ook afgestemd en is het gebleken dat het merendeel van de broeikasgasfluxen voor het graslandexperiment ook daadwerkelijk afkomstig zijn van dit veld. Voor het lisdodde-experiment is in verband met het relatief smalle veld het resultaat een samenstelling van de metingen van verschillende locaties afhankelijk van de windrichting. Hierdoor is ook het resultaat voor de lisdodde representatief voor het lisdoddeveld. Het gevolg van deze meetopstellingen is dat we nu nog weinig kunnen zeggen over de bijdrage van de sloot op de totale broeigasgasfluxen van het veenweidegebied. Inzicht in de bronsterkte van de sloten in het meetgebied zou waardevol zijn bij verdere interpretatie van de fluxmetingen die ook elders in NOBV-experiment zijn uitgevoerd. In 2026 zal TNO hiertoe naast de metingen van het veld zelf een meting uitvoeren op grotere hoogte, waarbij de meetlocatie naast het grasland ook de sloot ziet. Daarnaast wordt dan met drijvende kamers op de sloot de emissie van de sloot bepaald.

Methaanmetingen aan gaslekkages in de Noordzee

TNO heeft meegewerkt aan de meetcampagne naar methaan uit zee in samenwerking met NIOZ⁶ binnen het North Sea Methane-project van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). Het doel van dit project is om ebullitie, het 'opborrelen' van methaan gasbellen, uit verlaten putten in het Nederlandse deel van de Noordzeebodem te onderzoeken en te vergelijken met de natuurlijke uitstoot uit de bodem. TNO is bij de meetcampagnes betrokken voor het bepalen van methaanconcentraties (CH₄) in de atmosfeer net boven het wateroppervlak, en concentraties in opgepompt zeewater boven afgesloten gasputten. De meetopstelling die TNO hierbij gebruikt, is in het Milieuonderzoeksprogramma ontworpen en getest en in een container ingebouwd, die aan boord gehesen is van het NIOZ-onderzoeksschip RV Pelagia.

In totaal hebben vier campagnes plaatsgevonden op de Noordzee. Voor de campagnes van 2022, 2023 en 2024 heeft TNO bijgedragen aan de methaanmetingen, zowel in het water als de emissies van water naar de atmosfeer. De campagne in 2025 was een extra campagne om een deel van de metingen die in 2024 niet zijn gelukt, alsnog te kunnen doen en daarnaast ook de afgesloten putten in de K- en L-blokken te kunnen bepalen op lekkages (het Nederlands continentaal plat (NCP) is via de Mijnbouwwet verdeeld in segmenten gekoppeld aan de lengte en breedte graden; zie figuur 2.9). In 2022 zijn afgesloten putten uit de A- en B-blokken gemeten. Daaruit zijn een aantal locaties geselecteerd die verder bestudeerd zijn in 2023 en 2024 en deels ook in 2025.

⁶ NIOZ staat voor het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.



Figuur 2.9: Kaart olie- en gaswinning inclusief blokindeling.

De aan boord verkregen data uit 2022, 2023 en 2024 is in 2025 uitgewerkt. De methode-opzet is gepresenteerd op de EGU General Assembly 2025, die plaatsvond van 27 april t/m 2 mei 2025 in Wenen. Tijdens het Methane emissions in the North Sea-symposium van 13 en 14 november 2025 in Utrecht zijn een deel van de resultaten van 2024 gepresenteerd. In 2026 zullen de resultaten verder worden uitgewerkt en wordt er een wetenschappelijke publicatie geschreven.

2.4 K4 Indirecte en nieuwe broeikasgassen

Hoge concentraties van halocarbons⁷ in de atmosfeer hebben geleid tot aantasting van de ozonlaag in de stratosfeer (het zogenaamde ozongat). Om dit te ondervangen zijn nieuwe chemische componenten ontwikkeld die minder effect hebben op ozon, maar deze gassen blijken sterke broeikasgassen te zijn met een totale Global Warming Potential (GWP) dat in de buurt komt van dat van N₂O (lachgas). Metingen in de atmosfeer zijn beschikbaar voor Zwitserland en het Verenigd Koninkrijk, maar ontbreken voor Nederland. In samenwerking met het AGAGE⁸-netwerk en het Zwitserse Empa⁹ heeft TNO vanaf de meettoeren in Cabauw in 2022 een studie uitgevoerd naar het voorkomen van deze stoffen in de atmosfeer in de

⁷ Engelse, kortere term voor halogeenkoolwaterstoffen.

⁸ AGAGE staat voor Advanced Global Atmospheric Gases Experiment.

⁹ Empa betreft de Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology.

Benelux. In dit kader is er tijdelijk een zogenaamd Medusa¹⁰-meetinstrument geplaatst in de Cabauw-toren. De resultaten hiervan zijn binnen het Milieuonderzoeksprogramma verder uitgewerkt. Hierop is een publicatie in Nature¹¹ gevolgd. Naar aanleiding van de resultaten van deze studie wordt de komende jaren binnen het programma FTO-Duurzaamheid een Medusa-meetinstrument voor het meten van halocarbons geplaatst in de Cabauw-toren, wat weer tot nieuwe resultaten leidt binnen het Milieuonderzoeksprogramma als het gaat om halocarbons.

Naast werkzaamheden aan halocarbons, is ook het onderzoek naar indirecte broeikasgassen, in dit geval waterstof, in 2025 voortgezet. Waterstof (H₂) is een indirect broeikasgas, omdat dit in de lucht reageert met het OH-radicaal, dat een belangrijke rol speelt bij het afbreken van methaan. Eenvoudig gezegd draagt waterstof eraan bij dat methaan langer in de lucht aanwezig is. In het kader van de energietransitie komt het genereren, opslaan en gebruik van H₂ steeds hoger op de Nederlandse beleidsagenda. Deze H₂-infrastructuur wordt in de toekomst mogelijk ook een relevante bron van H₂-lekkages naar de atmosfeer. Om hier grip op te houden, wordt er bij TNO (en andere Nederlandse partners) hard gewerkt aan de opbouw van een meetaanpak voor H₂-emissies.

Activiteiten en resultaten in 2025: halocarbons en waterstof

Halocarbons

De metingen vanaf de Cabauw-toren in 2022 met het Medusa-meetinstrument, in samenwerking met het AGAGE-netwerk en Empa, heeft significant grotere vervuilingsspieken van onder andere de halocarbons HFC-23, PFC-318, en HCFC-22 in de Benelux aangetoond dan ooit gemeten op andere wereldwijde locaties in het AGAGE-netwerk. Een deel van deze emissies was te relateren aan processen op een industrieterrein in Dordrecht. Voor de bepaling van deze emissie is een tracer release-experiment uitgevoerd, welke gerapporteerd is in een Nature¹²-paper. De gepubliceerde studie geeft een goed voorbeeld van hoe dit soort emissies gemonitord zouden kunnen worden. Voor brontoekenning aan andere emissiebronnen zijn langere meetreeksen nodig.

Om op meer continue basis inzicht te krijgen in de aanwezigheid van halocarbons in de lucht, wordt in de Cabauw-toren al gewerkt met een zogenaamde flessensampler. De datarecords op basis van flessensampling worden binnen internationale samenwerkingsverbanden gebruikt. De meetdata is in het kader van het EU-project PARIS¹³ in 2025 bijvoorbeeld verwerkt in een tweetal publicaties¹⁴ over halocarbons.

¹⁰ Zie voor meer informatie over dit meetinstrument bijvoorbeeld: [AGAGE - Advanced Global Atmospheric Gases Experiment](#)

¹¹ Zie voor het Nature-paper: [Effective realization of abatement measures can reduce HFC-23 emissions | Nature](#)

¹² [Effective realization of abatement measures can reduce HFC-23 emissions | Nature](#)

¹³ Zie voor meer informatie over het EU-project PARIS: [About PARIS](#)

¹⁴ Publicaties over halocarbons uit 2025 in het kader van het EU-project PARIS:

[Characterization of German SF6 Emissions | ACS ES&T Air](#)
<https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-4824/>



Figuur 2.10: De Cabauw-toren, alwaar na installatie

van een Medusa-meetinstrument nog meer meetdata en zodoende inzicht kan worden opgehaald met betrekking tot halocarbons. Daarnaast: TNO-onderzoekers Ilona Velzeboer en Arnoud Frumau bij het flessensample-systeem in de kelder van de Cabauw-toren.

Voor een beter begrip van de emissiebronnen en verspreiding van de schadelijke halocarbons zal er blijvend een Medusa-meetinstrument in de Cabauw-toren worden geplaatst. In 2025 is het inkoopproces voor de nieuwe apparatuur gestart. Het betreft een meetinstrument op basis van assemblage, wat betekent dat de realisatietermijn betrekkelijk lang is. In 2026 zal de nieuwe meetapparatuur naar verwachting in de Cabauw-toren worden geïnstalleerd. Zodra er kan worden gemeten met deze nieuwe apparatuur, kan de meetdata met de datarecords op basis van de flessensampling op continue basis worden vergeleken. Hiermee wordt permanent het inzicht in halocarbons in de vanuit de Cabauw-toren bemeeten lucht vergroot.

Ontwikkeling waterstofmetingen

In 2024 is er in samenwerking met Universiteit Utrecht (UU), op basis van een waterstof-meetinstrument in bruikleen van het Environmental Defense Fund (EDF), gestart met mobiele metingen naar waterstofemissies. In 2025 is de meetdata verrijkt met metingen binnen Nederland (onder andere de Rijnmond-regio) alsook het buitenland (Frankrijk en Duitsland). In 2025 is ook het project MEETH2 van start gegaan. De metingen in het kader van MEETH2 lopen door in 2026. Dit project heeft eenzelfde doel, namelijk inzicht verkrijgen in H₂-lekkages naar de atmosfeer. MEETH2 richt zich specifiek op emissiebronnen in Nederland. Voor de MEETH2-metingen wordt gebruikt gemaakt van een nieuwere versie van meetinstrument dat voor de EDF-metingen met UU is gebruikt.

De meetwagen is in het kader van de metingen niet uitsluitend uitgerust met een H₂-meetinstrument, maar met een breed pakket aan apparatuur om H₂-emissies goed te kunnen duiden. Bronnen die bij de metingen in 2025 zijn meegenomen, betroffen onder andere petrochemische procesinstallaties, stortplaatsen en zogenaamde *steam methane reforming*-locaties (SMR's). Het aantal H₂-specifieke bronnen dat is bemeeten, is in 2025 beperkt tot H₂-tankstations en bussen op basis van waterstofverbruik. In het kader van MEETH2 is het bemeeten electrolyzer-opstellingen ook relevant, maar veel van deze installaties zijn in Nederland nog niet of juist al niet meer actief.



Figuur 2.11: De mobiele meetwagen van TNO bij een waterstoftankstation. Daarnaast: een impressie van het waterstofmeetinstrument in de meetwagen.

Beide projecten resulteren niet enkel in meer inzicht in H₂-emissies, maar dragen ook bij aan optimalisatie van de H₂-meetapparatuur. De apparatuur die wordt gebruikt is dusdanig nieuw, dat bij het gebruik ervan ook regelmatig op problemen opkomen die om een oplossing vragen. Een voorbeeld hiervan ruis in het signaal van de meetapparatuur. Het goed werkend krijgen en houden van deze nieuwe meetapparatuur, is en blijft zodoende *work in progress*.

De inzichten die met de mobiele H₂-metingen worden opgedaan, hebben ook relevantie binnen het kader van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). TNO is betrokken bij de totstandkoming van het Methodology Report Short-lived Climate Forcers van IPCC. In dit document zal er ook aandacht zijn voor H₂-emissies. Voor IPCC wordt de kennis die wordt opgedaan met de H₂-metingen gebruikt om inzichtelijk te maken waar H₂ de atmosfeer ingaat en wat het relatief belang is van verschillende bronnen. Naast H₂ wordt er voor het IPCC-rapport ook gekeken naar andere gasen en deeltjes, zoals koolmonoxide, zwaveldioxide, ammoniak en fijnstof.

Voor de Cabauw-meettoren in de Rotterdam-meetstations is vanuit FTO-Duurzaamheid ook een uitbreiding met H₂-meetapparatuur voor het stationair, continue meten van H₂ voorzien. De voorbereiding op het inkoopproces voor deze apparatuur is in 2025 gestart.

2.5 Gerelateerde projecten¹⁵

Projecten voor de olie- en gassector

In 2023 zijn 130 locaties van de NAM bezocht om via mobiele metingen site-level emissies te kunnen bepalen. In 2024 en 2025 is gewerkt aan de dataverwerking en automatisering van de data-analyse.

¹⁵ De gerelateerde projecten zijn voorbeelden van economische en niet-economische projecten die TNO kan uitvoeren door het behoud van onze kennis en infrastructuur met steun van dit programma. Hiermee staat dit programma dus in bredere zin ten dienste van de Nederlandse economie, maar het programma levert geen concrete financiële bijdrage aan deze projecten.

NAM en Gasunie zijn aangesloten bij OGMP2.0 (Oil and Gas Methane Partnership) om methaanemissies in de olie- en gassector te reduceren. Dit initiatief zorgt voor ondersteuning van een systematische aanpak en resulterende emissies. Specifiek voor level 5 (site-level) emissies wordt emissiekwantificatie via een bottom-up benadering op locatie-niveau gevraagd, waarbij de tracer release-methode de voorkeur heeft. Ook is dit een vereiste in de nieuwe Europese Methane Regulation (Regulation (EU) 2024/1106). Vanwege deze verplichtingen heeft Element NL gevraagd of TNO kan meewerken aan een methode voor emissiekwantificatie van de platforms op de Noordzee. Hiervoor is een meetsysteem op een *supply vessel* geplaatst, dat onbemand kan meten. Het systeem heeft zes maanden aan boord gestaan. Het supply vessel bezoekt een groot deel van de platforms voor bevoorrading. Op die manier kan het schip benedenwinds van het platform varen en zo de concentraties afkomstig van het platform meten. In combinatie van het meteorologische parameters en het Gaussisch-pluimmodel van TNO kunnen de site-level emissies van de platforms worden bepaald. Het rapport is in 2025 afgerond (Velzeboer et al, 2025). De resultaten zijn ook gepresenteerd tijdens het Methane emissions in the North Sea-symposium van 13 en 14 november 2025 in Utrecht.

TNO biedt een methode voor site-level emissie metingen, welke ook door andere partijen wordt aangemerkt als geschikt (Lopez & Fabre, 2021¹⁶). TNO werkt verder aan deze methode onder andere om de data-evaluatie te verbeteren en te automatiseren, om zo beter toepasbaar te zijn voor de markt. Daarnaast is maatwerk belangrijk, omdat elke situatie een specifieke aanpak vereist. In 2026 zal TNO voor 240 locaties van de NAM site-level emissiemetingen gaan uitvoeren.

2.6 Algemene activiteiten en kennisdeling

Er zijn een aantal presentaties gegeven in 2025 gerelateerd aan het werk binnen de KKG Milieuonderzoeksprogramma, zoals in het bovenstaande genoemd. Een overzicht van de titels en auteurs is te vinden in Bijlage A.1.1.

2.7 Bijdrage meet-infrastructuur

In 2025 heeft het programma bijgedragen aan het behoud van de mobiele meetfaciliteit (Ruisdael-consortium en FTO-Duurzaamheid) en de coördinatie van de upgrade van Cabauw in het kader van FTO-Duurzaamheid (onder andere meetapparatuur halocarbons en back-up instrumenten voor het meten van broeikasgassen), de Rotterdam-meetstations (onder andere apparatuur voor het meten van lachgas) en de mobiele meetfaciliteit (waaronder een wind-Lidar voor betere fingerprinting).

2.8 Financiering ICOS-deelname

TNO speelt een rol in het Europese broeikasgasnetwerk ICOS, als vertegenwoordiger van Nederland op de General Assembly en bij de Research Infrastructure Committee (RICOM). De RICOM heeft naast maandelijkse meetings tweemaal per jaar meerdaagse meetings om de dagelijkse gang van zaken binnen ICOS door te nemen en bereidt de documentatie voor, waarover in de General Assembly besluiten worden genomen. Ook is TNO voorzitter van de

¹⁶ Lopez, C., Fabre, J., 2021. Overall quantification of a site's methane emissions – State of the art on “Top Down” methodologies. RICE.PACG_GERG.

atmosferische Monitoring Station Assembly (MSA), waarbij alle PI's van ICOS-meetstations tweemaal per jaar een meerdaagse meeting hebben om meettechnische aspecten te bespreken en goedkeuring te geven tot uiteindelijk datavrijgave na onderlinge review. De kosten van deze activiteiten zijn in 2025 gefinancierd vanuit het programma.

3 Luchtkwaliteit – lenW

3.1 LKW-1 Beleidsondersteuning

Het doel van deelprogramma LKW-1 is om lenW te ondersteunen met ad-hoc onderzoeksvragen. Vaak is input op korte termijn nodig en zijn de lijnen kort. lenW kan in dit deelprogramma vragen om oplevering van een kort, officieel rapport op een specifiek thema of een algemeen advies, uiteraard onder de voorwaarde dat dit mogelijk is binnen de gegeven middelen en tijd.

Activiteiten en resultaten in 2025: start kachelmetingen en deelname technische commissie Bonn Agreement voor scheepvaart

In 2025 is gebruik gemaakt van het ad-hoc budget voor het opstarten van de UFP-metingen aan kachels en voor deelname van een van de EMSA-scientists aan de technische commissie van het Bonn Agreement op gebied van scheepvaart. In mei 2025 was de jaarlijkse Operational, Technical and Scientific Questions Concerning Counter Pollution Activities (OTSOPA) in Brest (Frankrijk), waar TNO vanuit de technische werkgroep aan heeft deelgenomen (naar deelname uit Nederland van RWS en ILT). Binnen deze meeting heeft de technische commissie data gedeelde van NOx-emissies van scheepvaart binnen Europa (waaronder TNO-metingen in Hoek van Holland). Hieruit blijkt opnieuw dat de NOx-emissies van Tier III scheepvaart regelmatig boven de norm liggen (ongeveer 50% van alle Tier III-schepen). Voor scrubber schepen (schepen waarbij de SOx-emissies via een systeem uit de rookpluim verwijderd worden) bleek dat deze boven de SOx-limiet zaten. Handhaving voor scrubber schepen is lastiger, omdat een brandstofsampl in dit geval geen uitsluitel geeft. De rest van het budget is verschoven naar LKW-2 en LKW-5 voor de roetsensorontwikkeling en afronding van de houtstookpilot in de IJmond en het bijbehorende rapport.

3.2 LKW-2 Kennis- en sensorontwikkeling

Het kennis- en sensorontwikkelingsprogramma binnen TNO (LKW-2) richt zich op de ontwikkeling en het testen van hoogwaardige en nieuwe meetinstrumenten voor de inzet bij de monitoring van gezondheid gerelateerde stoffen. Ook de verbetering van de bijbehorende kennis over luchtkwaliteitsvraagstukken, bijvoorbeeld welke metingen of manier van meten het meest relevant is om meer grip te krijgen op de blootstelling aan ultrafijnstof of bepaalde specifieke chemische luchtvervuilingscomponenten, en de verbetering van data-analyse technieken zijn hier onderdeel van. Dit deelprogramma is in 2025 verdeeld in drie subprogramma's.

LKW 2a	Sensorsystemen ter verbetering van stedelijke luchtkwaliteit
LKW 2b	Chemisch specificatie van fijnstof
LKW 2c	CEN/NEN-deelname

3.2.1 LKW-2a Sensoren ter verbetering van stedelijke luchtkwaliteit

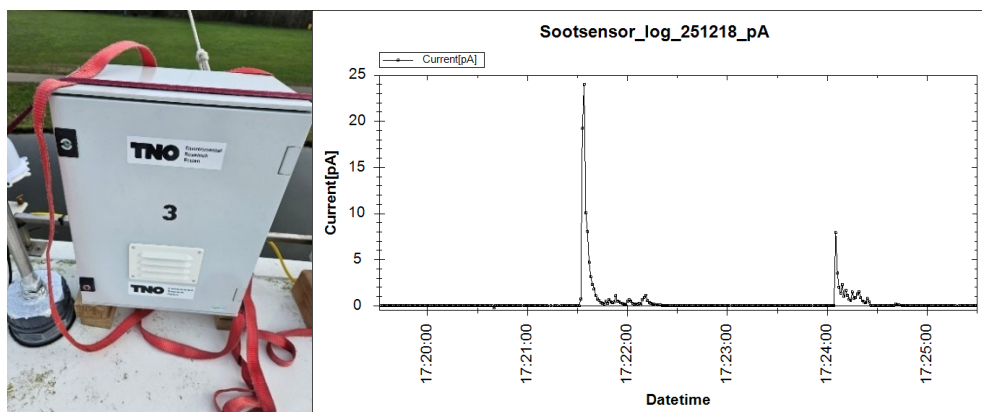
Bij de houtrookcampagne 2020-2021 liet de door TNO ontwikkelde roetsensor een goede correlatie zien met de high-end AE33 aethalometer. Dit maakt het een veelbelovend instrument voor het detecteren van roet, en daarmee houtrook, op wijkniveau. Daaropvolgend is TNO in 2023, in samenwerking met de Omgevingsdienst IJmond en het burgermeetproject Hollandse Luchten (geleid door Waag Futurelab), gestart met een houtstookmeetpilot in de IJmond. Het doel van deze pilot was om te testen of met een combinatie van de TNO-roetsensor, omgebouwd tot een op zichzelf staande meetkastje, en een fijnstofsensor van Hollandse Luchten, in een wijk de aanwezigheid van houtrook eenduidig geïdentificeerd kan worden. Om bij dit experiment de aanwezigheid van houtrook met meer zekerheid vast te kunnen stellen, werd in Heemskerk een centraal referentiepunt geplaatst met high-end instrumenten.

Activiteiten en resultaten in 2025: roetsensorontwikkeling

Tijdens de houtrookmeetcampagnes in de IJmond (2023–2025) zijn roetsensorkastjes van TNO getest om lokale houtrook in wijken aan te tonen. De kastjes bleken in hun toenmalige vorm nog niet betrouwbaar in te zetten: de signalen waren instabiel en sommige sensoren vielen uit. Daarom is in 2025 gestart met het aanpakken van de onderliggende technische problemen. Hierbij is gewerkt aan een beter sensordesign en de ontwikkeling van een testopstelling voor de verbeterde roetsensoren om consistente, vergelijkbare metingen te kunnen uitvoeren. De testopstelling is een voorwaarde om effectieve ontwikkelstappen te kunnen zetten en kan niet alleen worden gebruikt om verbeteringen aan de TNO-roetsensor te valideren, maar ook om eventuele alternatieve meetprincipes of andere, commercieel beschikbare sensoren te testen.

Uit de eerste probleemanalyses bleek dat door lekstromen het meetsignaal in het huidige ontwerp te laag is. Deze lekstromen zijn te wijten aan onvoldoende elektrische afscherming, het ontbreken van een bias-elektrode in de ionisatiekamer om recombinatie van de gegenereerde lading tegen te gaan en een zeer beperkte cross-sectie om ladingen in te vangen. Daarnaast bleek de UV-bron qua vermogen, positionering en veroudering niet optimaal voor effectieve foto-ionisatie. Het huidige ontwerp was dus nog niet robuust genoeg voor betrouwbare langdurige roetmetingen in het veld.

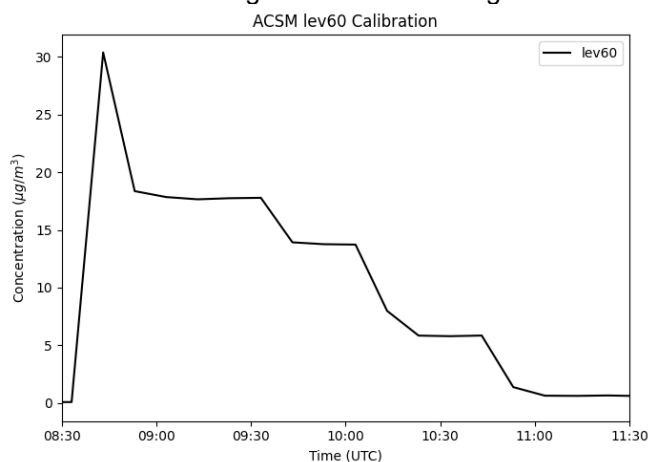
Op basis van bestaande literatuur is er vervolgens een verdiepingsslag gemaakt naar de onderliggende meetprincipes en zijn meerdere versies van een gecontroleerde roetgeneratie- en kalibratieopstelling ontwikkeld. Deze inzichten hebben geleid tot concrete ontwerpaanpassingen, wat in december 2025 heeft geleid tot een positieve eerste test van het nieuwe meetprincipe (nog wel op basis van een verbrand stukje hout, nog niet gecontroleerd met de testopstelling). Het aansteken en smeulen van een stukje hout leidt duidelijk tot een zeer significante piek in de metingen (figuur 3.1). De volgende stap is om uit te vinden of dit ook bij lagere signalen goed werkt. In 2026 zal naar verwachting de testopstelling worden afgerond en het nieuwe ontwerp omgezet worden naar een nieuwe versie van de meetkastjes.



Figuur 3.1: Links: Meetkastje dat gebruikt is bij de houtstookcampagnes in het stookseizoen 2024-2025. Rechts: Resultaten van testmetingen december 2025 waarbij twee keer een stukje hout is aangestoken naast het nieuwe sensorontwerp.

3.2.2 LKW-2b: Chemisch specificatie van fijnstof

Sinds de laatste jaren werkt TNO aan de inzet van near-real-time meettechnologie voor chemische specificatie van fijnstof op minuten tot uur basis. Sinds 2020 is TNO daarvoor in het bezit van de Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM), welke in een speciale meettrailer op een interessante locatie geplaatst kan worden. In 2024-2025 is de ACSM ingezet bij de houtstookpilot in de IJmond, waarbij specifiek aandacht besteed is aan de bruikbaarheid van het instrument voor near-real-time bepaling van levoglucosan, als marker voor houtrook, in fijnstof. Hiertoe is de ACSM in een andere configuratie gebruikt dan in de houtrookpilot van 2023-2024. De zogenaamde vaporizer (verdamper) is vervangen voor een ander type. In theorie zou dit andere type vaporizer de gevoeligheid voor levoglucosan vergroten. Net als bij voorgaande houtrookpilot is er een kalibratie aan levoglucosan uitgevoerd (zie figuur 3.2). Voor beide campagnes zijn kalibratiefactoren van levoglucosan doorgevoerd, waardoor op 10 minutenbasis levoglucosanconcentraties (in $\mu\text{g m}^{-3}$) beschikbaar zijn. De labanalyse van de levoglucosan 24-uur filtermetingen zijn nog niet beschikbaar. In 2026 zullen deze filtermetingen vergeleken worden met de ACSM-metingen, waaruit bepaald kan worden welke vaporizer van de ACSM het meest geschikt is voor levoglucosanmetingen.



Figuur 3.2: Levoglucosankalibratie van ACSM uitgevoerd op 25-2-2025, hoge concentratie als eerste aangeboden en dan stapsgewijs terug.

3.2.3 LKW-2c CEN/NEN-deelname

Het EMSA-team van TNO is commissielid van de NEN Normcommissie Werkplek en buitenluchtmetingen, welke bijdraagt aan de Europese taakgroep CEN TC264. TNO zit hierbij in werkgroep WG42. Na het uitbrengen van de nieuwe technische specificatie in 2024 (CEN/TS 17660-2:2024) aangaande prestatie-evaluatie van fijnstofsensoren, is binnen WG42 gestart met het schrijven van een technisch rapport aangaande kwaliteitsborging en kwaliteitscontrole voor individuele sensoren, zowel op het gebied van gassen als fijnstof (in Engels Quality Assurance (QA) en Quality Control (QC)). Binnen dit technische rapport zal onder andere worden aangegeven welke testen aangeraden worden om kwaliteit te borgen en hoe dataverificatie van sensoren plaats kan vinden. In 2025 is begonnen met een inventarisatie, wat volgens deelnemers nodig is om goede sensordata te verkrijgen. Van deze inventarisatie is een eerste ruwe versie gemaakt, die in 2026 verder zal worden uitgewerkt.

3.3 LKW-3 Emissies van antropogene bronnen

Het deelprogramma LKW-3 heeft in 2025 minder aandacht gekregen dan vooraf gepland, dit is gecommuniceerd naar IenW in november 2025¹⁷. Gedurende het jaar is de aandacht binnen het Milieuonderzoeksprogramma verschoven naar het ontwikkelen van een roetsensor voor het bemeten van de houtstook, LKW-5. Ondanks de verminderde aandacht is er in 2025 een interessant verkennend onderzoek gedaan naar het herkennen van combinaties van uitgestoten deeltjes afkomstig uit verschillende soorten veel voorkomende antropogene bronnen. Met behulp van mobiele metingen van onder andere fijnstof, NO_x en broeikasgassen biedt deze fingerprint inzicht in het soort bronnen en de uitstoot van potentieel schadelijke stoffen in de omgeving.

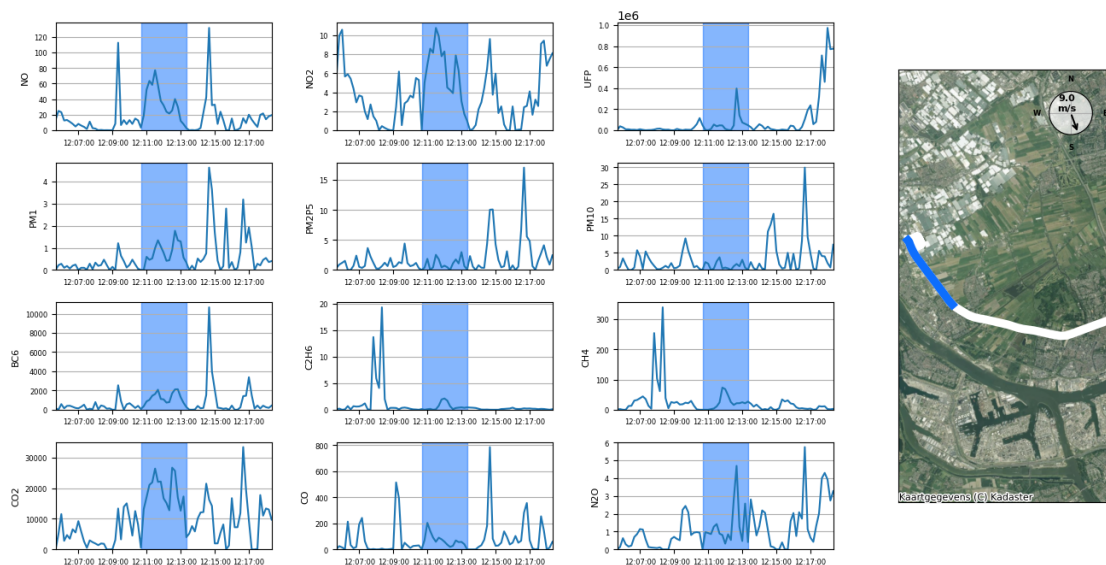
Activiteiten en resultaten in 2025

Fingerprinting in de haven van Rotterdam

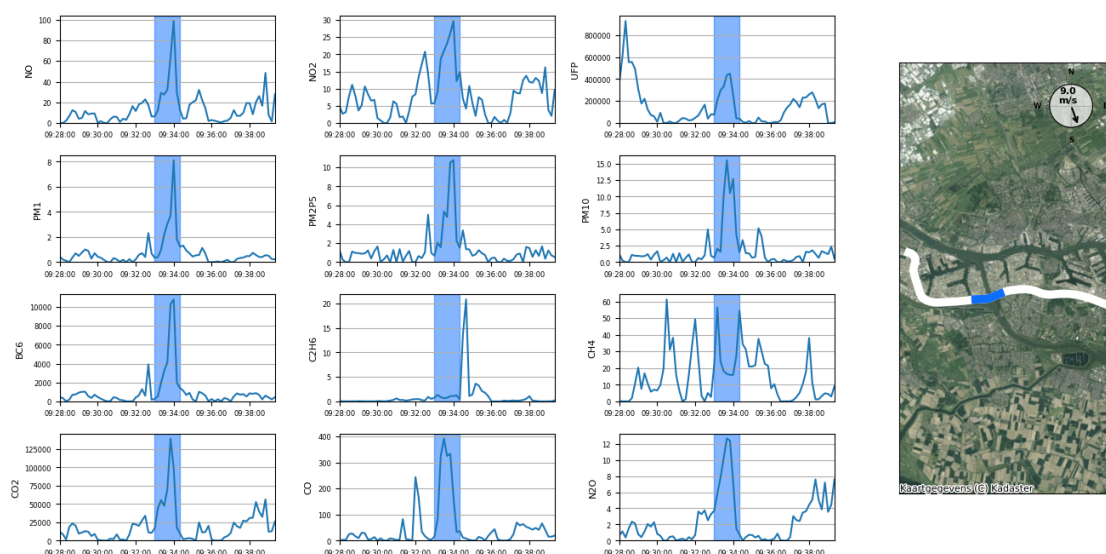
Data voor de analyse is afkomstig uit metingen in en nabij het havengebied van Rotterdam, in augustus en september 2022 (verzameld tijdens Ruisdael-meetcampagne). In deze periode heeft TNO mobiele metingen uitgevoerd op zes verschillende dagen, waarin met name in het havengebied uitvoerig is gemeten, maar ook in de gebieden rondom de haven. De gemeten stoffen bestaan uit broeikasgassen (CH₄, C₂H₆, N₂O, CO₂ en CO), stikstofoxiden (NO en NO₂), fijnstof (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁), ultrafijnstof en roet. Al deze verschillende stoffen zijn belangrijk voor het onderscheiden van verschillende verbrandingsprocessen. Zo duidt bijvoorbeeld de aanwezigheid van CO en/of roet op onvolledige verbranding, terwijl NO_x (NO + NO₂) wat zegt over de omstandigheden van de verbranding.

Met behulp van semi-automatische pluimdetectie zijn meer dan 350 pluimen van de gemeten stoffen gedetecteerd in deze data. Het gros van deze pluimen is afkomstig van ofwel verkeer, ofwel scheepvaart. Voor verkeer maken we specifiek het onderscheid tussen rijdend verkeer en verkeer in tunnels, omdat emissies in tunnels opgehoopt worden en allemaal tegelijkertijd worden gemeten aan weerszijden van de tunnel. Daarnaast zijn tunnels duidelijk te herkennen op een kaart. Figuur 3.3 en figuur 3.4 laten respectievelijk een verkeerspluim en tunnelpluim zien. Hier is duidelijk te zien dat in een typische pluim afkomstig van rijdend verkeer met name NO_x, CO en CO₂ aanwezig zijn, terwijl in een tunnelpluim ook fijnstof, ultrafijnstof en roet meestijgen.

¹⁷ Bronsveld, MEMO - Interne budgetverschuiving IenW milieusubsidie, 18 november 2025.



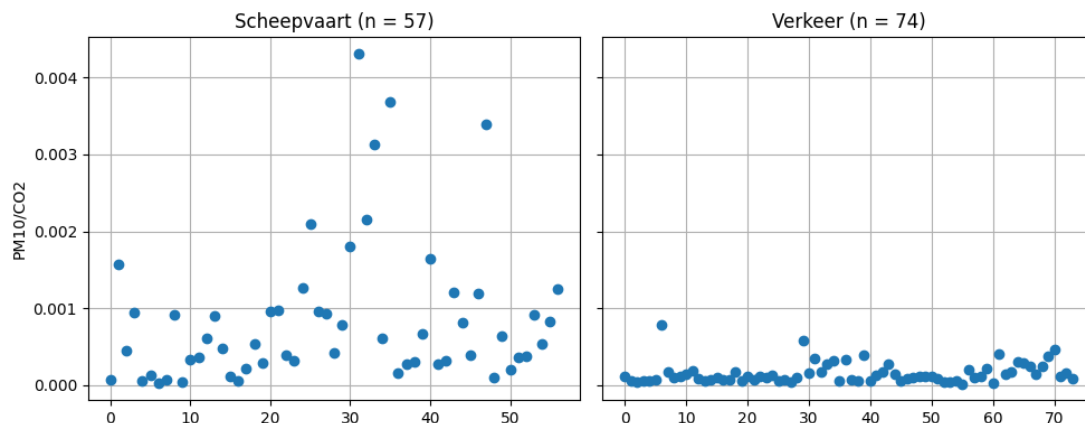
Figuur 3.3: Voorbeeld van gemeten concentraties tijdens een pluim afkomstig van (rijdend) verkeer. Dit betreft NO, NO₂, UFP, fijnstof, roet, CH₄, C₂H₆, CO₂, CO en N₂O.



Figuur 3.4: Voorbeeld van gemeten concentraties tijdens een pluim afkomstig uit een tunnel. Dit betreft NO, NO₂, UFP, fijnstof, roet, CH₄, C₂H₆, CO₂, CO en N₂O.

Het identificeren van de fingerprint van schepen brengt meer onzekerheden met zich mee. Ten eerste is het niet altijd duidelijk of een pluim afkomstig is van een voorbijkomend schip, of van een nabijgelegen bron die toevallig op dat moment gepasseerd wordt door de mobiele meetinstallatie. Ten tweede is het ook niet altijd duidelijk op te maken uit de gemeten stoffen of een pluim afkomstig is van een verkeersbron of scheepvaartbron, aangezien beide emissies afkomstig zijn van een verbrandingsproces, en dus vergelijkbare indicatoren hebben. Ook is er verschil tussen soorten verbrandingsmotoren in schepen, waardoor de ratio's van uitgestoten stoffen kunnen verschillen tussen schepen. Desondanks zien we dat de aanwezigheid van

fijnstof en ultrafijnstof een indicatie is van scheepvaart, bijvoorbeeld als we kijken naar de ratio met CO₂, te zien in figuur 3.5.



Figuur 3.5: Verschil in ratios PM10/CO₂ tussen pluimen afkomstig van scheepvaart (links, 57 metingen) en pluimen afkomstig van verkeer (rechts, 74 metingen).

In 2026 zal dieper worden ingegaan op het onderscheiden van de fingerprint van schepen en het verkeer.

3.4 LKW-4 Co-financiering van Ruisdael-programma

Een deel van dit programma (25K €) wordt ieder jaar ingezet voor het behouden en verbeteren van de aerosoltrailer en het aerosolinstrumentarium in het Cabauw-meetstation, welke onderdeel zijn van de Ruisdael-infrastructuur. Vanuit FTO-Duurzaamheid, gestart in 2025, wordt er ook geïnvesteerd in het aerosolinstrumentarium in het Cabauw-meetstation. Deze financiering draagt daarmee ook direct bij aan de resultaten van dit programma. Dit maakt een goede en snelle inzet van de instrumenten mogelijk, bijvoorbeeld de inzet van de aerosoltrailer en alle instrumenten daarin in Heemskerk voor de houtrookpilot.

3.5 LKW-5 Focusonderwerp: Houtrook

Gedeeltes van dit hoofdstuk zullen ook verschijnen in een artikel in het tijdschrift Lucht en zijn grotendeels gebaseerd op resultaten die zijn gerapporteerd door TNO.¹⁸

Houtrook roept vaak beelden op van gezelligheid, maar brengt ook nadelen met zich mee. De rook leidt tot luchtvervuiling die te ruiken is en soms zelfs leidt tot luchtwegklachten bij omwonenden. Houtrook door huishoudens is verantwoordelijk voor ongeveer 23% van de Nederlandse fijnstofemissies, maar helaas ontbreekt een praktische en betaalbare methode om houtrookemissies op wijkniveau te monitoren of een methode om deze te onderscheiden van andere bronnen. Een dergelijke methode zou lokaal inzicht kunnen geven en bestuurders in staat stellen om concrete maatregelen door te voeren.

Voor het identificeren van houtrook in de lucht wordt tot nu toe over het algemeen gebruik gemaakt van filterbemonstering, waarbij beladen filters geanalyseerd worden op de aanwezigheid van levoglucosan. Levoglucosan is de belangrijkste marker voor de aanwezigheid van houtrook in de lucht, maar deze stof kan alleen met relatief dure

¹⁸ Bronsveld, P.C.P., Dinther, D. van, Blom, M.J., Mansom, H. van, Bruin-Hoegee, G.J. de, Kaandorp, S., Fabriek, J. Houtrookpilot IJmond 2023-2024. Een meetaanpak voor het bepalen van de verspreiding van houtrook in gemeenten. <https://resolver.tno.nl/uuid:0341e822-411c-4a1e-a2f6-c34af1e69ca6>

instrumenten gemeten worden met een tijdsresolutie van een dag. Hierdoor kan je niet zien op welk moment van de dag houtstook aanwezig is en heb je de informatie pas later beschikbaar. Ook zijn filtermetingen relatief kostbaar en daardoor lastig op grote schaal toe te passen.

In eerdere stedelijke meetcampagnes is gezien dat roetmetingen correleren met levoglucosan-concentraties. Roetmetingen kunnen wél met een hoge tijdsresolutie gedaan worden, waardoor ze beter te koppelen zijn aan specifieke tijdstippen en locaties. Daarom is de verwachting dat roetmetingen een relevant alternatief voor levoglucosan kunnen zijn bij de identificatie van houtrook. Bovendien is TNO's verwachting dat deze metingen met relatief goedkope sensoren mogelijk zijn; zie de ontwikkeling van de roetsensoren in LKW-2.

Om te testen of roet inderdaad geschikt is voor de identificatie van houtrook, heeft TNO een pilotstudie uitgevoerd in de IJmondregio, met een centraal meetpunt in Heemskerk (Noord-Holland). De resultaten van deze pilotstudie zijn gepubliceerd in een TNO-rapport¹⁹ en zijn ook in de lokale media gepubliceerd²⁰.

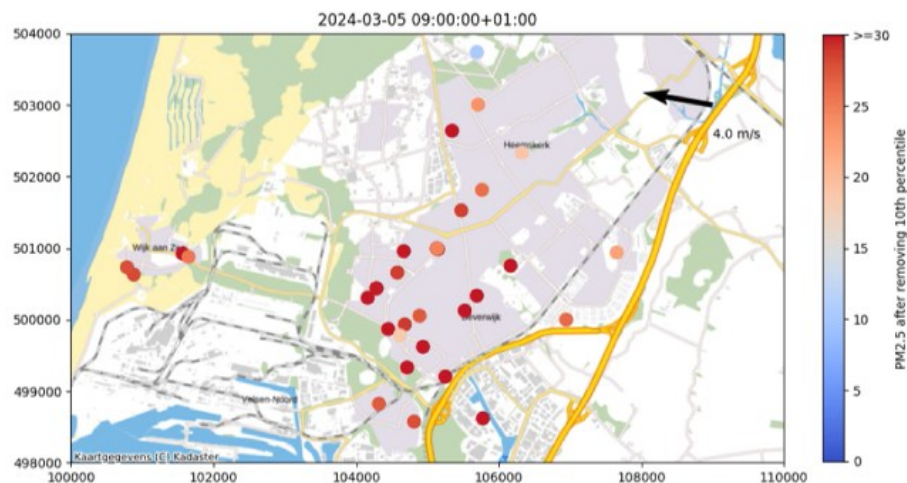
Opzet van de houtstookpilot in de IJmond

De pilotstudie in de IJmond, waarvan de resultaten inmiddels zijn gepubliceerd, liep in het winterseizoen 2023-2024. In het winterseizoen 2024-2025 heeft een vervolgstudie plaatsgevonden. De rapportage over het winterseizoen 2024-2025 is nog in voorbereiding en zal naar verwachting later in 2026 verschijnen. De studies zijn uitgevoerd in samenwerking met de Omgevingsdienst IJmond en het citizen science-netwerk Hollandse Luchten. Het doel was het testen van een nieuwe methode om fijnstofpieken door houtrook in kaart te brengen via lokale roet- en fijnstofsensormetingen. De meetaanpak is gebaseerd op een combinatie van fijnstofmetingen (tot 2,5 µm; PM_{2.5}) en roetmetingen. Door deze metingen te koppelen, waarbij roet wordt gebruikt als houtrookindicator, kan onderscheid worden gemaakt tussen fijnstof uit houtstook en fijnstof uit andere bronnen.

Tijdens de pilot is gewerkt met een centraal meetpunt aangevuld met meetgegevens uit een netwerk van 72 fijnstofsensoren van bewoners in de IJmondregio. Op het centrale meetpunt zijn continue high-end referentie meetinstrumenten gebruikt voor meting van verschillende aan houtrook gerelateerde stoffen: PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, levoglucosan, chemische samenstelling, ultrafijnstof, roet, stikstofoxides en koolmonoxide. Ook zijn er iedere dag filters beladen met PM_{2.5} voor latere analyse, die voor en na belading gewogen werden. Daarnaast zijn er prototype roetsensoren van TNO getest om de verspreiding op wijkniveau in de toekomst beter in beeld te kunnen brengen (zie paragraaf 3.2). De chemische samenstelling van het fijnstof is bepaald met de Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) met een hoge tijdsresolutie van 10 minuten.

¹⁹ Bronsveld, P.C.P., Dinther, D. van, Blom, M.J., Mansom, H. van, Bruin-Hoegee, G.J. de, Kaandorp, S., Fabriek, J. Houtrookpilot IJmond 2023-2024. Een meetaanpak voor het bepalen van de verspreiding van houtrook in gemeenten. <https://resolver.tno.nl/uuid:0341e822-411c-4a1e-a2f6-c34af1e69ca6>

²⁰ De Boer, Ellen, Meetmethode van houtstook is effectief. IJmuider courant, 11 oktober 2025.



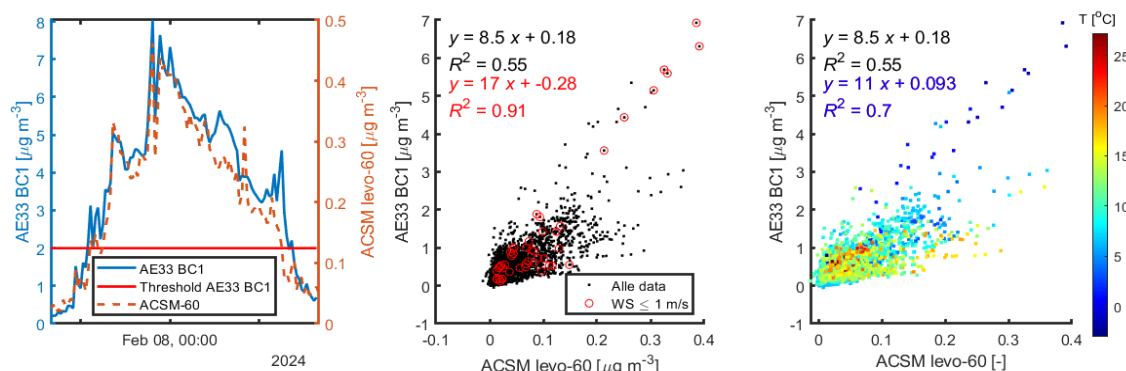
Figuur 3.6: Kaartje met de locaties van de meetpunten van het Samen Meten-netwerk (een deel hiervan is van het burgerinitiatief Hollandse Luchten) in de IJmondregio. De kleurschaal geeft aan dat op het moment van meten de PM_{2.5} waarden relatief hoog waren op alle meetpunten.

De roetmetingen op het centrale meetpunt zijn gedaan met de aethalometer (AE33). De AE33 meet de lichtabsorptie van fijnstofdeeltjes op een filter bij zeven golflengten, van UV tot infrarood. Deze metingen worden gebruikt om de concentratie van *black carbon* (ook wel BC of roet) te berekenen, waarbij het verschil in absorptie tussen kortere en langere golflengten een indicatie kan geven van de bron van het roet, zoals bijvoorbeeld de verbranding van hout of fossiele brandstoffen. Voor identificatie van houtrook wordt vaak gekeken naar het verschil tussen de UV-absorptie (kanaal 1) en infrarood-absorptie (kanaal 6), ook wel aangeduid als de hoeveelheid “houtstookroet”. Echter, uit de TNO-analyse blijkt dat hoge roetwaarden (BC1) ook goed overeenkomen met massakanaal 60 van de ACSM (ACSM-60), dat wordt geassocieerd met levoglucosan. Dit is dan een eenvoudigere manier om houtrookmomenten te identificeren. Uit de vergelijking van de aethalometer en ACSM-60 data kon een ondergrens van $BC1 > 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ geschat worden als drempelwaarde voor de identificatie van houtrook.

Selectie van houtrookmomenten

De selectie van houtrookmomenten is gebaseerd op bovengenoemde drempelwaarde voor roet ($>2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en een drempelwaarde voor fijnstof ($PM_{2.5} > 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), waarna aanvullende criteria worden gebruikt om het gehele houtrookmoment (voor en na een piekdetectie) in beeld te krijgen. De verhouding $PM_{2.5}/BC1$ is geïdentificeerd als een mogelijk nog krachtiger of aanvullend selectie criterium (vervolgonderzoek zal hier dieper op ingaan).

Het verloop van de levoglucosanmetingen (ACSM-60) kwam goed overeen met dat van de roetmetingen, zoals te zien in figuur 3.7, links. De overeenstemming is in het bijzonder goed bij lage windsnelheden en lage temperaturen. Deze goede overeenkomst, in combinatie met de correlatie met de verwachte weersomstandigheden, bevestigt dat roet ook voor metingen over korte tijdsintervallen (< 24 uur) een goede indicator is voor houtrook.



Figuur 3.7: Vergelijkingen tussen aethalometer-data (roet) en ACSM-60-data (levoglucosan). **Links:** Een typisch houtrookmoment in de avond van 7 februari 2024. De trends in ASCM-60 en AE33 BC1 komen zeer goed overeen en de drempelwaarde voor roet van $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wordt het grootste deel van de tijd overschreden. **Midden:** Correlatie tussen 1-uurswaarden van AE33 BC1 en ACSM-60. Alle ACSM-60 waarden > 0.025 liggen in het bereik $\text{BC1} > 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dus bij veel levoglucosan is er ook veel roet. Een selectie van de meetwaarden bij lage windsnelheden $\leq 1 \text{ m/s}$ (zeer lokaal fijnstof) laat een sterk lineaire relatie tussen de twee stoffen zien. **Rechts:** Correlatie 1-uurswaarden AE33 BC1 en ACSM-60, nu ingekleurd voor de omgevingstemperatuur. Hoge waarden van roet en levoglucosan komen overeen met lage temperaturen ($< 10^\circ\text{C}$).

Kengetallen

In totaal zijn er 39 houtrookmomenten geïdentificeerd aan de hand van fijnstof- en roetmetingen. Waar mogelijk zijn deze momenten geverifieerd met behulp van levoglucosanmetingen (de ACSM-metingen waren niet beschikbaar voor de gehele meetperiode). Vervolgens is voor deze momenten op basis van de roetmetingen de bijdrage van houtstook aan de gemeten fijnstofconcentraties bepaald.

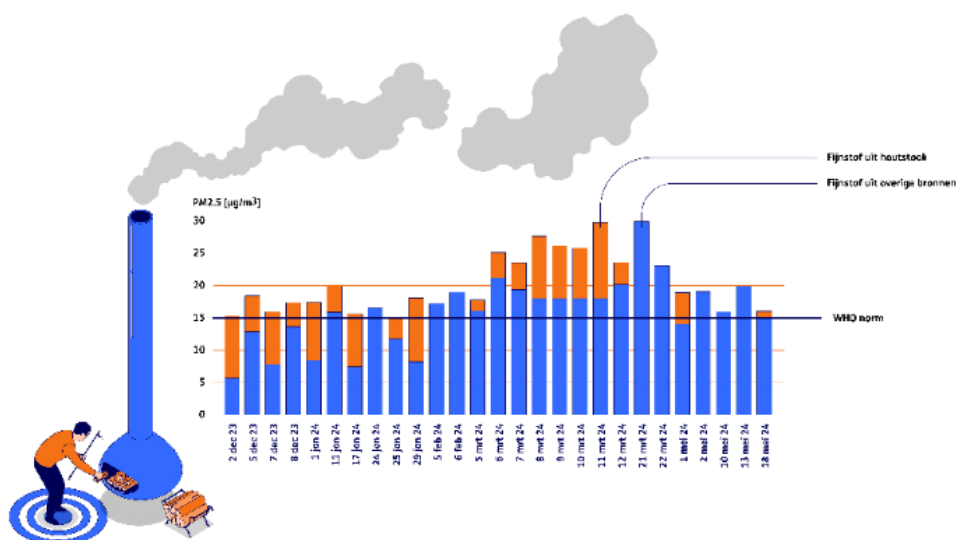
Voor 29 houtrookmomenten was er een direct lineair verband tussen de roet- en fijnstofmetingen. Voor deze momenten is bij de berekening van de houtrookbijdrage aan het fijnstof ($\text{PM}_{2.5}$) alleen een vlakke achtergrondcorrectie toegepast. Voor de overige momenten is de roetwaarde geschaald om fijnstof van houtrook te onderscheiden van andere bronnen. Een uitgebreide onzekerheidsanalyse toonde aan dat de kans op foutieve detectie (fout positieven) verwaarloosbaar is en het aantal mogelijke gemiste houtrookuren beperkt is tot 56 van de 4654 meeturen ($\sim 1\%$). Ook kleine aanpassingen in de drempelwaarde van roet hebben maar beperkt effect op het aantal gevonden houtrookuren, wat vertrouwen geeft in de methode.

Tabel 3: Kengetallen uit de houtrookpilot 2023-2024 in de IJmond.

Totale lengte houtrookpilot 2023-2024	196 dagen (4654 uren)
Aantal geïdentificeerde houtrookmomenten	39
Aantal overschrijdingsdagen van de daggemiddelde WHO-advieswaarde voor $\text{PM}_{2.5}$ ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	27 dagen totaal 9 dagen door de houtrookbijdrage
Gemiddelde houtrookconcentratie tijdens houtrookuren (na achtergrondaf trek)	$7,6 \pm 1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $13,3 \pm 2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (gemiddelde piekconcentratie)
Procentuele houtstookbijdrage aan fijnstofconcentratie	$12,1 \pm 3,9 \%$ (alleen wintermaanden) $40,0 \pm 11,2 \%$ (tijdens houtrookmomenten)

Een aantal kengetallen voor houtrook op het centrale meetpunt in de IJmond is berekend, zie Tabel 3. De 39 gevonden houtrookmomenten komen overeen met 598 uren (eq. 25 dagen), waarvan 352 uren (eq. 15 dagen) met een $\text{PM}_{2.5}$ -concentratiewaarde boven de daggemiddelde advieswaarde van de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) van $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Deze advieswaarde geeft aan welk concentratieniveau van fijnstof als veilig wordt beschouwd voor de gezondheid. Houtrook levert een significante bijdrage aan het aantal gemeten WHO-

advies overschrijdingsdagen. Van de 27 dagen in de meetperiode waarop de daggemiddelde PM2.5-concentratie de WHO-advieswaarde 15 µg/m³ overschrijdt, zou deze overschrijding er op 9 dagen (33%) niet zijn geweest zonder de bijdrage van houtrook, zie figuur 3.8. Tijdens houtrookmomenten was de bijdrage van houtrook aan de PM2.5-concentratie gemiddeld 40%, met een gemiddelde concentratie PM2.5 door houtrook van 7,6 µg/m³ en een piekconcentratie van 13,3 µg/m³. Gemiddeld over alle wintermaanden was de bijdrage van houtrook aan de totale PM2.5-concentratie 12,1%.



Figuur 3.8: Fijnstofconcentraties op dagen waarop de WHO-gezondheidsnorm voor PM2.5 van 15 µg/m³ overschreden wordt, met in oranje de PM2.5-bijdrage vanuit houtrook en in blauw vanuit overige bronnen.

Gebruik van sensoren voor verspreidingsmetingen

De fijnstofsensoren (PM2.5) uit het Hollandse Luchten-netwerk in IJmondregio bleken, ondanks aanwezige ruis, goed in staat de fijnstofmetingen te volgen. Wel meten de sensoren vaak te hoge fijnstofwaarden. Het is dus raadzaam om de sensoren goed te kalibreren.

Door het verloop van de fijnstofdata van de sensoren dynamisch op de kaart weer te geven (met behulp van een animatie) kon visueel onderscheid gemaakt worden tussen houtrookmomenten waarop fijnstof wordt gedomineerd door “overwaaiend” fijnstof van verderop, en fijnstof door lokale houtrook in specifieke wijken. Deze classificatie is belangrijk om de resultaten goed te duiden. Fijnstofmetingen met concentraties boven de 25 µg/m³ zijn doorgaans niet uitsluitend toe te kennen aan lokale houtrook. Hierbij spelen ook andere fijnstofbronnen, met daarin mogelijk ook houtrook van verder weg, een grote rol.

De TNO-roetsensorkastjes toonden potentie in de pilot en leverden bruikbare data op. Herontwerp van de kastjes om de stabiliteit te verbeteren is echter nodig voor langdurige inzet. Het streven is om in 2026 een verbeterde versie van de roetsensoren in de praktijk te testen, werk aan deze roetsensoren is opgestart en kort beschreven in paragraaf 0.

Conclusie

De nieuwe meetmethode, met roet als belangrijkste indicator voor houtrook, maakt het mogelijk om houtrookmomenten betrouwbaar te identificeren en verspreiding op wijkniveau te volgen aan de hand van fijnstof- en roetmetingen. Gemeenten krijgen hiermee een krachtig instrument om hun luchtkwaliteitsbeleid te verbeteren.

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

Met één centraal meetpunt worden mogelijk nog lokale pieken op wat grotere afstand gemist. Een belangrijke volgende stap is dan ook om te testen hoeveel roetsensoren er nodig zijn om onderscheid te maken tussen houtrook in verschillende wijken.

3.6 LKW-6 – UFP-emissies uit moderne kachels

LKW-6 is een nieuw toegevoegd onderdeel aan het lenW-programma in 2025²¹. Het betreft een eenmalige uitbreiding van het programma, wat loopt van september 2025 tot en met juni 2026. Het doel van dit extra deelprogramma is om door middel van metingen een beter beeld te krijgen van de hoeveelheid UFP en fijnstof die wordt uitgestoten door conventionele kachels, Ecodesign kachels en moderne pelletkachels. Dit is om de claim te testen dat de Ecodesign kachels minder fijnstof zouden uitstoten dan conventionele kachels en om kennis op te doen over de UFP-uitstoot. Binnen dit programma zal (binnen afbakening) ook gekeken worden naar de effecten van houtkeuze, wijze van beladen en het verloop van de emissies van aansteken tot uitdoven. Indien technisch haalbaar zal in parallel ook de uitstoot van PM_{2.5} bepaald worden. In dit deelprogramma zal worden samengewerkt met het RIVM voor een bredere interpretatie van de resultaten i.r.t. gezondheidseffecten.

In 2025 is een begin gemaakt, door een literatuurstudie te doen, door kachels aan te schaffen waarmee de metingen uitgevoerd gaan worden en door een begin te maken met vervaardigen van de meetopstelling. Er zijn drie kachels aangeschaft, te weten conventioneel, Ecodesign en een pelletkachel. Figuur 3.9 geeft een indruk van de houtkachelopstelling op de locatie in Petten.



Figuur 3.9: Indruk van de houtkachelopstelling in Petten. **Links:** De schoorsteen waar de rook door naar buiten gaat. **Midden:** Twee van de kachels die bemeten gaan worden. **Rechtsboven:** De schoorsteenpijp in de meetruimte met aansluitpunten voor de meetsensoren. **Rechtsonder:** Een van de kachels in actie.

²¹ Bronsveld et al (8-9-2025) lenW Milieuonderzoeksprogramma 2025-2028, voorstel aanvullend deelprogramma LKW-6 - UFP emissies uit moderne kachels.

3.7 Gerelateerde projecten

Luchtkwaliteitsmetingen N203

Van medio november 2024 t/m medio februari 2026 heeft TNO in opdracht van de provincie Noord-Holland de luchtkwaliteit ter hoogte van de Provincialeweg N203 in Krommenie gemeten. Een petitie die door bewoners is aangeboden aan de provincie, is de aanleiding geweest van dit meetproject. Bewoners maken zich namelijk zorgen over de luchtkwaliteit rondom dit verkeerstraject. Voor het meetproject zijn fijnstof (PM_{2,5} en PM₁₀) en stikstofdioxide (NO₂) gemeten; de meetuitkomsten worden vergeleken met de gestelde EU-grenswaarden en de advieswaarden van de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO). Er is een zogenaamde basismeetstation - een meettrailer met daarin meetapparatuur – geplaatst bij een centraal kruispunt in Krommenie, ter hoogte van de Vlietsend ten noorden van de N203. Dit basismeetpunt heeft de luchtkwaliteit gedurende de gehele meetperiode gemonitord. Van medio april 2025 tot medio juli 2025 zijn er twee extra meettrailers geplaatst op twee verschillende locaties, op afstand van het basismeetpunt (één bovenwinds van de N203 en één benedenwinds verder de wijk in). De tijdsperiode van ruim één jaar voor het basismeetpunt en de aanvulling met twee meetpunten was nodig om zo goed mogelijk te kunnen bepalen wat de invloed van het verkeer op de N203 op de lokale luchtkwaliteit is. De verworven data is in het eerste kwartaal van 2026 geanalyseerd en zal omstreeks april 2026 worden gepresenteerd aan de provincie en belangstellenden.²²



Figuur 3.10: De meetopstelling van het basismeetpunt nabij het kruispunt Vlietsend in Krommenie in het kader van het meetproject naar de luchtkwaliteit bij de N203.

²² Zie voor meer informatie over en beeld bij de metingen naar de N203 onder andere: [TNO meet luchtkwaliteit in Krommenie](#)

Mobiele metingen Noord-Brabant

In 2025 heeft TNO twee meetcampagnes naar de luchtkwaliteit in de gemeentes Heusden, Waalwijk en Geertruidenberg uitgevoerd. Deze drie gemeentes hebben de handen ineen geslagen om via metingen van TNO een indicatief beeld te krijgen van de lokale luchtkwaliteit en de relatieve bijdrage van verschillende bronnen hierin. Dit als mogelijke opmaat naar een eventueel lokaal basismetnet. De metingen hebben respectievelijk begin maart en medio augustus 2025 plaatsgevonden; per meetcampagne is er gedurende twee dagen in de desbetreffende regio's gemeten. De resultaten zijn in het eerste kwartaal van 2026 nader uitgewerkt en worden gedeeld met de drie betrokken gemeentes.



Figuur 3.11: De mobiele meetwagen van TNO in augustus 2025 in Heusden.

Houtrook provincie Utrecht

TNO is in 2025 door de provincie Utrecht gevraagd om een indicatie te geven van de houtrookbijdrage in specifieke gemeenten, ter ondersteuning van het provinciale luchtkwaliteitsbeleid. Binnen het project wordt naast de provincie samengewerkt met Gemeente Zeist, Gemeente Amersfoort, Gemeente Utrechtse Heuvelrug en de Natuur en Milieufederatie Utrecht (NMU). De metingen vinden plaats in het stookseizoen 2025-2026. Een centraal meetpunt is opgericht met hierin metingen aan PM_{2.5} (zowel real-time metingen als 24 uurs-filtermetingen) en roetmetingen (zie figuur 3.12). Hiernaast worden er binnen dit project PM_{2.5}-sensoren geplaatst in de omgeving om inzicht te krijgen in de verspreiding van houtrook (in samenwerking met NMU). De metingen op het centrale meetpunt zijn gestart in november 2025 in de gemeente Zeist. Vervolgens is het centrale meetpunt begin februari 2026 verplaatst naar Amersfoort. De rapportage wordt verwacht in juli 2026, welke binnen bredere kring aan de Utrechtse gemeentes zal worden toegelicht in het kader van kennisdeling. Binnen dit project wordt kennis toegepast welke is opgedaan tijdens de houtrookpilots voor IenW in Heemskerk (zowel in 2023-2024 als 2024-2025). Hiermee kan tevens onderzocht worden hoe

de systematiek beschreven in Bronsveld et al. (2025) toepasbaar is op andere plekken in Nederland (in dit geval meer landinwaarts).



Figuur 3.12: Het centrale meetpunt ten behoeve van de houtrookmetingen in Zeist.

Ondertekening

Aldus getekend, 31 maart 2026

Review

ValidSigned by Gerrit Jan de Bruin
on 2026-03-30 16:12:34

Gerrit Jan de Bruin
Scientist Air Quality and Climate
Environmental Modelling, Sensing & Analysis

ValidSigned by Bas Henzing
on 2026-03-27 14:47:13

Bas Henzing
Science and Innovation Developer
Market Circular Economy & Environment

ValidSigned by Peter Petiet
on 2026-03-30 17:17:40

Peter Petiet
Deputy Research Manager
Environmental Modelling, Sensing & Analysis

ValidSigned by Marieke van Milligen-Versluis
on 2026-03-30 10:03:31

Marieke van Milligen
Research Manager
Environmental Modelling, Sensing & Analysis

ValidSigned by Ilse Schoenmaker
on 2026-03-26 17:01:22

Ilse Schoenmaker
Project Manager, Auteur
Environmental Modelling, Sensing & Analysis

Bijlage A

Publicaties

A.1.1 Wetenschappelijke publicaties

Anthony, M. A., Röckel, N., Traistaru, A., Krishna, A., Meesenburg, H., Wagner, M., ... & Averill, C. (2025). Soil microbial community differences drive variation in *Pinus sylvestris* physiology, productivity, and responses to elevated CO₂. *Environmental Microbiome*.

Bronsveld, P.C.P., Dinther, D. van, Blom, M.J., Mansom, H. van, Bruin-Hoegee, G.J. de, Kaandorp, S., Fabriek, J. Houtrookpilot IJmond 2023-2024 (2025). Een meetaanpak voor het bepalen van de verspreiding van houtrook in gemeenten. <https://resolver.tno.nl/uuid:0341e822-411c-4a1e-a2f6-c34af1e69ca6>

Chambers, S. D., Karstens, U., ..., Frumau, A., ..., Chen, X., and Röttger, A.: Review of the Radon Tracer Method for GHG emission estimates: development, application guidelines, improvements, and caveats, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-5042>, 2025.

de Bruin, G., de Stigter, H., Diaz, M., Delre, A., Velzeboer, I., Versteijlen, N., ... & Reichart, G. J. (2025). Methane leakage from abandoned wells in the Dutch North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 171, 107184.

De Bruin, G.J., Velzeboer, I., van Dinther, D., van den Bulk, W.C.M., van Mansom, H., Thera, B., Hensen, A. (2025). Advancing methane emission quantification: a robust methodology for site-level measurements (No. EGU25-14858). *Copernicus Meetings*.

Delre, A., de Bruin, G., Velzeboer, I., de Haas, H., Mienis, F., de Stigter, H., ... & Niemann, H. (2025). In situ monitoring reveals episodic water column methane anomalies at abandoned wells in the Dutch North Sea (No. EGU25-12579). *Copernicus Meetings*.

Delre, A., de Bruin, G., Velzeboer, I., de Haas, H., Mienis, F., de Stigter H.C., Riekenberg, J., van Dijk, R.L., Huybens, R.M., Engelmann, J.C., Reichart, G.J., Niemann, H. (2025) Methane dynamics at abandoned wells and natural seepage sites in the North Sea (Dutch EEZ). *Methane emissions in the North Sea Symposium*

de Jong, L., Deru, J., Vanhoof, P., Hahn, K., Hensen, A., & Erisman, J. W. (2025). Bepaling ammoniakemissie melkveebedrijven. <https://www.louisbolk.nl/sites/default/files/publication/pdf/bepaling-ammoniakemissie-melkveebedrijven.pdf>

Jongenelen, T., van Zanten, M., Dammers, E., Wichink Kruit, R., Hensen, A., Geers, L. and Erisman J.W. (2025) Validation and uncertainty quantification of three state-of-the-art ammonia surface exchange schemes using NH₃ flux measurements in a dune ecosystem (No. EGU25-4177). *Copernicus Meetings*.

Katharina Meixner, Thomas Wagenhäuser, ..., Arnoud Frumau, ... and Andreas Engel. Characterization of German SF₆ emissions. *ACS ES&T Air* **2025** 2 (12), 2889-2899 , DOI: 10.1021/acsestair.5c00234

Melman, E. A., Wintjen, P., Zhang, J., Rutledge-Jonker, S., Hensen, A., Felter, K. M., ... & van Zanten, M. C. On the Efficiency of Biosphere–Atmosphere Ammonia Exchange Processes over a Scots Pine Forests and Its Link to Ecosystem Activity.

Melman, E. A., Rutledge-Jonker, S., Frumau, K. F. A., Hensen, A., van Pul, W. A. J., Stolk, A. P., Wichink Kruit, R. J., & van Zanten, M. C. (2025). Measurements and model results of a two-year dataset of ammonia exchange over a coniferous forest in the Netherlands. *Atmospheric Environment*, *344*, Article 120976. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120976>

Niemann, H., Delre, A., de Bruin, G., van Engelenburg, B., de Haas, H. Huybens, R.M., Henko de Stigter, Velzeboer, I., Versteijlen, N., Wilpshaar, M., Reichart, G.J. (2025) Research overview project MeNorth (Methane Emissions in the North Sea) - a NIOZ, TNO and SodM joint adventure. Methane emissions in the North Sea Symposium

Pellikka, T., Kajolinna, T., Hämäläinen, J., Hieta, T., Redon, N., Marlot, L., ... & Ogink, N. (2025). Summary report on the identified key-indicators and the improved emission models for increasing the representativeness of the emission estimations and determine their uncertainty.

Tettenborn, J., Zavala-Araiza, D., Stroeken, D., Maazallahi, H., van der Veen, C., Hensen, A., ... & Röckmann, T. (2025). Improving consistency in methane emission quantification from the natural gas distribution system across measurement devices. *EGUsphere*, 2025, 1-27.

Tettenborn, J., Zavala-Araiza, D., Stroeken, D., Maazallahi, H., Van Der Veen, C., Hensen, A., ... & Röckmann, T. (2025). Improving consistency in methane emission quantification from the natural gas distribution systems across measurement devices. *Atmospheric Measurement Techniques*, *18*(14), 3569-3584.

Tong, X., Zhao, Z., Hensen, A., Bruin, G. J., van Heuven, S., Scheeren, B., ... & Chen, H. (2025). Towards Reconciling Bottom-up and Top-down Estimates of Rotterdam N₂O and CH₄ Emissions. *Authorea Preprints*.

van Dinther, D. Goudriaan, R., de Bruin, G.J., van Dijken, M.J.C., Kaandorp, M.J.N., Wit, B. (2025). Regionaal Meetnet ILM2 in Zuidoost-Brabant, Jaarrapportage 2024. TNO 2024 R12915.

Van Dinther, D., Bronsveld, P.C.P., Blom, M.J., van Mansom, H., de Bruin, G.J., van Dijken, M (2025). Developing an algorithm to determine woodsmoke events. *European Aerosol Conference 2025, Lecce, Italy*.

Velzeboer, I, Hensen, A., van den Bulk, W.C.M., van Mansom, H., de Bruin, G., de Haas, H., Delre, A., de Stigter, H., Wilpshaar, M., Niemann, H., Reighart, G.J. (2025). Ship-based methodologies to investigate methane emissions from abandoned wells and natural sources: a case study form the Dutch North Sea. (No. EGU25-8267). *Copernicus Meetings*.

Velzeboer, I., Hensen, A., van den Bulk, W.C.M., van Mansom, H., de Bruin, G., de Haas, H., Delre, A., de Stigter, H., Niemann, H., Reichart, G.J., (2025) Measuring atmospheric methane emissions from abandoned wells and natural sources: a case study from the Dutch North Sea. *Methane emissions in the North Sea Symposium*

Velzeboer, I, de Bruin G.J., van Dijken, M., van den Bulk, W.C.M., van Mansom, H., Hensen, A. (2025) Vessel-based methane emissions quantification of oil and gas platforms in the Dutch North Sea. Methane emissions in the North Sea Symposium

Vollmer, M. K., Pitt, J. R., Young, D., Henne, S., ..., Frumau, A.,... and Reimann, S.: Global Observations and European emissions of the halogenated olefins HFO-1234yf, HFO-1234ze(E), and HCFO-1233zd(E) from the AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment) network, EGU sphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-4824>, 2025.

Wintjen, P., Frumau, A., van den Bulk W.C.M., van Mansom, H., Hensen, A. (2025) Groundwater level control as GHG emission reduction option tested using eddy covariance for peatland in the Netherlands (No. EGU25-12079). Copernicus Meetings.

A.1.2 Mediaberichtgeving

De Boer, Ellen, Meetmethode van houtstook is effectief. IJmuider Courant, 11 oktober 2025.

Nieuwe TNO-methode geeft gemeenten grip op houtstook. SLA nieuwsbrief, 10 november 2025. [Nieuwe TNO-methode geeft gemeenten grip op houtstook | Schone lucht akkoord](#)

Longfonds. Aandacht voor gevolgen houtstook groeit. 22 oktober 2025. [Aandacht voor gevolgen houtstook groeit | Longfonds](#)

Waag future labs. Pilot houtstook meten. <https://waag.org/nl/project/pilot-houtstook-meten/>

Samen Meten met ... Paula Bronsveld (TNO). 21 januari 2026. [Samen Meten met ... Paula Bronsveld \(TNO\) - Samen Meten Utrecht](#)

TNO start met meting luchtkwaliteit langs N203 in Krommenie. Noordhollands Dagblad, 13 november 2024. [TNO start met meting luchtkwaliteit langs N203 in Krommenie | Noordhollands Dagblad](#)

Tussentijdse resultaten TNO N203, webinar, 15 juli 2025, YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=pQuTNzN7LYM&t=8s>

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl

TNO innovation
for life