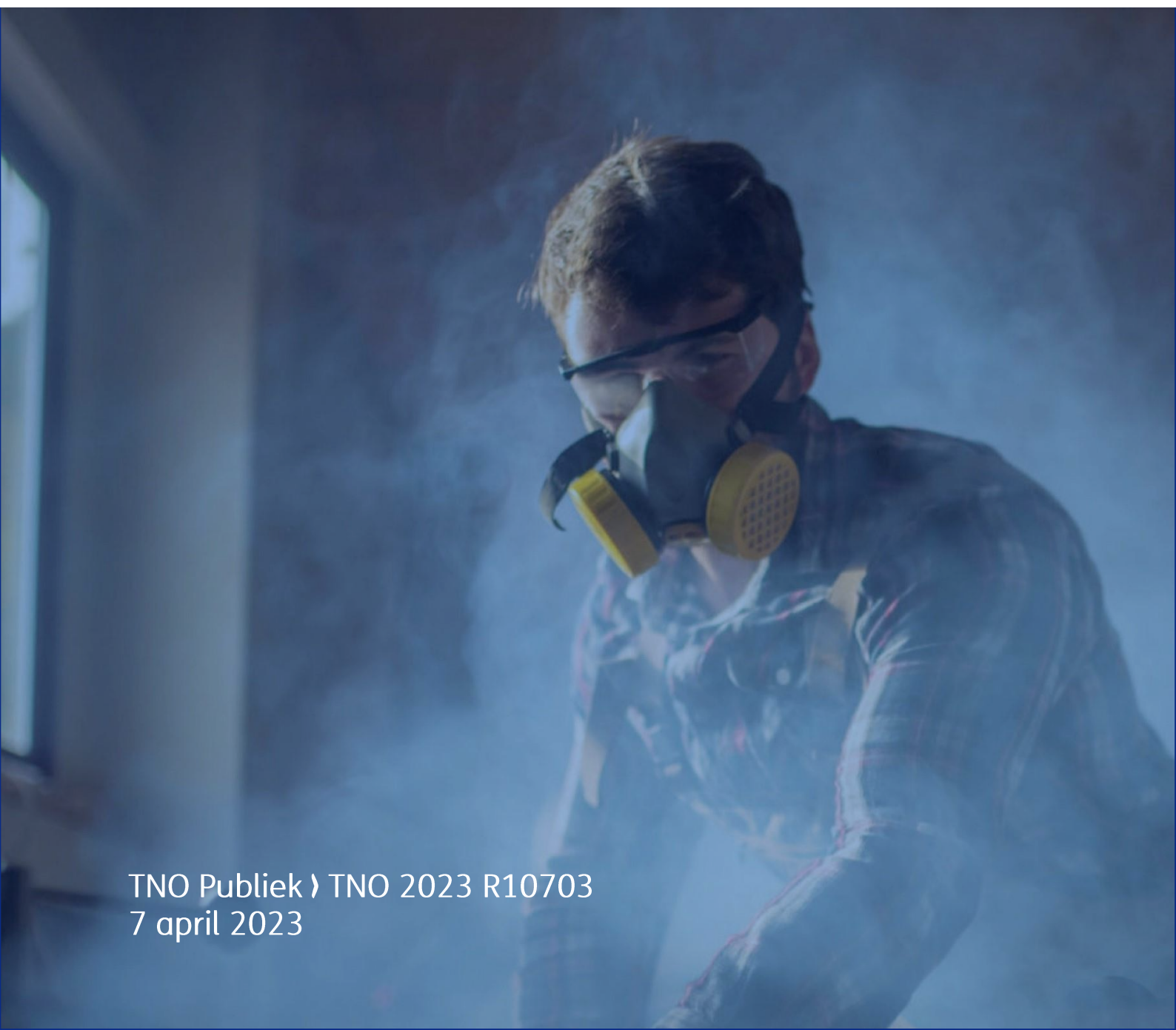


Jaarverslag

EZK/lenW

Milieusubsidie 2022



TNO 2023 R10703 – 7 april 2023
EZK/IenW Milieusubsidie 2022

Jaarverslag

Auteurs	Ilona Velzeboer, Danielle van Dinther, Gerrit Jan de Bruin, Arjan Hensen, Arnoud Frumau en Paula Bronsveld
Rubricering rapport	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Oplage	1
Aantal pagina's	56 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	1
Projectnaam	EZK/IenW Milieuonderzoek 2022
Projectnummer	060.51122, 060.46145

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.

© 2023 TNO

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de voortgang van de TNO-EMSA (Environmental Modelling, Sensing & Analysis) afdeling in Petten binnen het milieuonderzoeksprogramma in 2022. Het doel van het programma is het waarborgen van ondersteuning van de overheid door TNO op het gebied van klimaat en luchtkwaliteit, door middel van behoud en versterking van de hoogwaardige meetinfrastructuur bij TNO. Het programma bestaat uit twee delen: Klimaat (onder EZK) en Luchtkwaliteit (onder IenW), opgedeeld in verschillende deelprogramma's. De voortgang in de twee delen is hieronder kort samengevat.

Klimaat

In het klimaatdeel van dit programma worden meetmethoden ontwikkeld en gegevens verstrekt aan de internationale gemeenschap met betrekking tot de broeikasgasniveaus in de atmosfeer boven Nederlands grondgebied.

In 2022 is verder gewerkt aan een upgrade van het instrumentarium op de Cabauwtoren naar een klasse 1 station binnen ICOS. De meetreeksen van CO₂ en methaan liepen ondertussen gewoon door. Ook heeft TNO samen met het ministerie van EZK bijgedragen aan het herstel van de Nederlandse relatie met het ICOS consortium, waarbinnen TNO nu ook een aantal extra taken op zich neemt (vertegenwoordiging bij General Assembly, governance ICOS-NL en focal point).

De grootste meetcampagne van 2022 was de Ruisdaelcampagne in Rotterdam in september, waarbij zowel broeikasgassen als luchtkwaliteitscomponenten stationair en mobiel (meetwagen, fiets, vliegtuigjes) zijn gemeten. De grote hoeveelheid data uit deze campagne wordt momenteel samen met de verschillende partners van het Ruisdaelconsortium verder uitgewerkt. Hierbij worden ook de data van de (RITA) Ruisdaelcampagne van 2021 meegenomen. De mobiele ritten uit de Ruisdaelcampagne zullen ook worden gebruikt voor verificatie van de fingerprinting techniek, welke al voor verschillende bronnen is getest, zoals RWZI's, stortplaatsen, boerderijen en gaslekken.

Bij de eerdere Ruisdaelcampagne in 2021 zijn FTIR¹ kolomconcentratiemetingen (XH₂O, XO₂, XCO₂, XCH₄ en XCO) uitgevoerd door de VU vanuit de semi-mobiele trailer van TNO. Bij een vergelijking met CAMS² data waren wat verschillen zichtbaar, wat weer input is voor CAMS. De resultaten worden uitgewerkt in een wetenschappelijke publicatie. Bij de Ruisdaelcampagne van 2022 zijn ook dit type metingen op drie locaties boven- en benedenwinds van Rotterdam uitgevoerd. Voor XCO₂ zijn, bij bepaalde windrichtingen, verschillen in de orde van 1-2 ppm gezien voor verschillende locaties.

Voor de kennisopbouw over diffuse bronnen van N₂O en CH₄ zijn er metingen uitgevoerd aan stortplaatsen en veenweidegebieden. Voor de stortplaatsen was het hoofddoel om de gerapporteerde emissies te kunnen verifiëren, maar ook om de stortgasmodellen te kunnen toetsen aan metingen. Sommige stortgaspluimen zijn goed te benaderen met een model, maar ook complexere pluimen zijn waargenomen, waarvoor meer interpretatie nodig is.

Voor het bemeten van emissies uit veenweidegebieden heeft TNO in 2022 naast kamermetingen ook de Eddy Covariance techniek ingezet voor het meten van N₂O fluxen. Deze metingen lopen nog door in 2023. Het doel is om een koppeling te vinden tussen gegevens over bodemdaling en de gemeten waarden van N₂O uitgassing.

¹ Fourier Transform InfraRed spectroscopy: meettechniek waarbij concentraties van een stof worden bepaald via de mate van infrarood licht absorptie door die stof. Bij kolommetingen is zonlicht de IR-lichtbron.

² Copernicus Atmosphere Monitoring Service: luchtkwaliteitsmonitoringservice (incl. broeikasgassen) aangeboden door het aardobservatieprogramma van het EU ruimtevaartprogramma. [Atmosphere | Copernicus](#)

Binnen het onderzoek naar halogeenkoolwaterstoffen (halocarbons) in de atmosfeer is een tracer release experiment uitgevoerd met hulp van het Zwitserse instituut EMPA. De tracer is losgelaten bij een bedrijf in Dordrecht, waarna pieken van drie verschillende typen halocarbons en van de tracer duidelijk gedetecteerd werden op Cabauw (over een afstand van 27 km). De verdere uitwerking wordt gedaan door EMPA.

Ook de interesse in waterstof als indirect broeikasgas neemt toe. In 2023 zal, indien mogelijk, een waterstof meetinstrument geïnstalleerd worden op Cabauw.

Dit rapport geeft naast directe resultaten ook een kort overzicht van de belangrijkste resultaten uit aanpalende projecten, waarvoor de basis methodeontwikkelingen in dit programma ook worden toegepast. Voor het klimaatdeel waren deze gericht op agrarische emissies en olie & gas.

- De methode die is ontwikkeld voor het meten van veenweidegebieden is ook ingezet voor het meten van de effecten van landbewerkingsmethoden op N₂O emissies in een project samen met de WUR.
- De verzamelde gegevens van de ROMEO campagne in Roemenië zijn gebruikt voor verbetering van de CH₄ en C₂H₆ inventarisaties en verschillende wetenschappelijke publicaties.
- Het is TNO en NIOZ (i.o.v. SodM) gelukt om CH₄ uit de Noordzeebodem te meten met een mobiele opzet van TNO aan boord van het schip de Pelagia van NIOZ, waarmee in juni een campagne van enkele weken is uitgevoerd.

Luchtkwaliteit

Ook op het gebied van gezondheid gerelateerde luchtkwaliteit is binnen dit programma de Nederlandse kennis en infrastructuur versterkt.

Op het vlak van sensorontwikkeling zijn stappen gemaakt m.b.t. NO₂ sensoren en de roetsensor van TNO. Door de NO₂-metingen van alle sensoren in het Eindhovense meetnetwerk te vergelijken met de ozon- en luchtvochtigheidswaarden van het LML kan ingeschat worden bij welke omstandigheden de data van de sensoren onbetrouwbaar zijn. Dit is belangrijk voor de kwaliteitscontrole. Er is gevonden dat de TNO roetsensor houtstookroet en roet van dieselroet niet alleen goed kan detecteren, maar waarschijnlijk ook onderscheiden. Er wordt gewerkt aan een verbeterde versie van de sensor en de bijbehorende software om de sensor beter inzetbaar te maken in stedelijke netwerken.

Het nieuwe, snelle, compacte ammoniak meetinstrument van TNO is getest op haar toepasbaarheid voor het bepalen van de droge depositiesnelheid van ammoniak, in vergelijking met de mini-DOAS gradiënt opstelling van het RIVM. Het verschil in de totale cumulatieve flux was maar rond de 10%, wat erg goed is.

Andere instrumentvergelijkingen zijn gedaan op basis van de aerosol- en gasmetingen van de ACSM en de MARGA tijdens de Ruisdaelcampagnes. Hierbij zijn goede correlaties gevonden tussen de instrumenten onderling en met andere instrumenten voor sulfaat, ammoniak, ammoniumnitraat en ammoniumsulfaat. De volgende stap is om de gemeten pieken beter te bestuderen, de bronnen te duiden en de meetverschillen tussen de instrumenten beter te begrijpen.

Voor het focusonderwerp, is dit jaar zowel aan houtroet als aan zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) aandacht besteed. Voor houtroet zijn de resultaten van het eerdere onderzoek uitgewerkt tot een openbare rapportage. Hieruit bleek o.a. dat de roetsensor zeer geschikt was voor detectie van houtroet en dat de variaties in gemeten houtroetconcentratie niet lokaal, maar regionaal of zelfs landelijk van aard zijn. Verder is de Positive Matrix Factorization methode voor brontoeckenning getest op een ZZS meetdataset uit 2017 van het Rotterdamse havengebied. Het resultaat is nog niet eenduidig. Waarschijnlijk zijn veel langere datasets nodig om conclusies te trekken met deze methode.

Op verzoek van het ministerie is met een literatuurstudie onderzocht of het (mee)stoken van waterstof tot hogere NO_x-emissies leidt dan het stoken van (alleen) aardgas. De hogere vlamtemperatuur bij H₂-verbranding leidt inderdaad tot meer vorming van NO_x, maar in de meeste gevallen zijn dezelfde NO_x-reductietechnieken toepasbaar als bij aardgas. Het gebruik van deze technieken is bij de meeste installaties maar een zeer beperkte kostenpost t.o.v. de overstap naar of bijmenging van waterstof.

Verder heeft TNO qua beleidsadvies in 2022 ook bijgedragen aan de Routewijzer Houtstook & Overlast, welke een handreiking vormt voor gemeenten bij de aanpak van houtstook.

Ook voor luchtkwaliteit geeft dit rapport een kort overzicht van de belangrijkste resultaten uit aanpalende projecten, waarvoor de basis methodeontwikkelingen in dit programma ook worden ingezet. In dit geval voor scheepvaart, luchtvaart en agrarische bronnen.

- Uit de analyse van data voor de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) blijkt dat de meeste schepen in Rotterdam, op basis van een geschatte motorbelasting, voldoen aan de Tier normen voor NO_x emissies van de IMO³. De NO_x-waarden van Tier II schepen liggen binnen het havengebied wel soms hoger dan die van Tier I schepen.
- Alle bemeten schepen uit de SCIPPER campagne 2020 waren compliant met de zwavelgehalte regelgeving (de zwavelgehalten in de gemeten emissies waren wel lager dan in brandstofanalyses). Voor specifieke meetranges (> 90 nm diameter, PM_{0.5} en PM₁) kwamen de in de campagne gebruikte fijnstof meetinstrumenten goed overeen.
- UFP concentratiemetingen zijn vergeleken voor Eindhoven Airport, vliegbasis Eindhoven en Rotterdam-The Hague Airport (RTHA). De UFP concentraties op RTHA waren het hoogst. Op Eindhoven Airport waren ze hoger dan op Eindhoven vliegbasis. Hierbij werden geregeld UFP-concentraties boven de tijdelijke referentiewaarden gemeten. Gerichte blootstellingsmetingen voor medewerkers worden daarom aangeraden.
- De ratio UFP/roet is hoger bij de vliegveldstudie dan bij een eerdere verkeersstudie in de Maastunnel, want vliegtuigmotoren stoten minder roet uit dan dieselmotoren. Bij hoge UFP pieken werden bij vliegtuigen ook hogere SO₂ concentraties gemeten.
- In een programma voor LNV is een verbeterde mobiele opstelling voor gelijktijdige metingen van methaan en ammoniak met succes getest. Met deze opstelling kunnen meerdere agrarische en niet-agrarische bronnen op een dag bemeten worden, waaruit typische (verhoudingen tussen) emissiefactoren kunnen worden bepaald.

³ International Maritime Organization

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Klimaat 3	
Luchtkwaliteit	4
Inhoudsopgave	6
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Motivatie milieuonderzoeksprogramma Klimaat en Luchtkwaliteit	7
1.3 Doelstelling	7
1.4 De deelonderzoeksprogramma's in dit rapport	9
2 Klimaat – EZK	10
2.1 Resultaten deelonderzoeksprogramma's Klimaat	10
2.1.1 K-1 Nationale emissie: Cabauw	10
2.1.2 K-2 Campagnes: fingerprinting en bronduiding	11
2.1.3 K-3 Koppeling GHG databronnen	15
2.1.4 K-4 Diffuse bronnen N ₂ O en CH ₄	17
2.1.5 K-5 Emissies van landbouw en fossiele brandstoffen	19
2.1.6 K-6 Indirecte en nieuwe broeikasgassen	25
2.2 Conclusies Milieuonderzoek Klimaat 2022	28
3 Luchtkwaliteit – IenW	30
3.1 Resultaten deelonderzoeksprogramma's Luchtkwaliteit	31
3.1.1 LKW-1 Beleidsondersteuning	31
3.1.2 LKW-2 Kennis- en sensorontwikkeling	33
3.1.3 LKW-3 Emissies van antropogene bronnen	39
3.1.4 LKW-4 Cofinanciering van Ruisdael programma	47
3.1.5 LKW-5 Houtrook en/of zeer zorgwekkende stoffen (ZZS)	47
3.2 Conclusies Milieuonderzoek Luchtkwaliteit	52
Ondertekening	54
Bijlage	
Bijlage A: Publicaties	55

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het milieuonderzoeksprogramma op het gebied van Klimaat en Luchtkwaliteit wordt uitgevoerd bij de afdeling *Environmental Modelling, Sensing & Analysis (EMSA)*, welke deel uitmaakt van de TNO Unit *Energy & Materials Transition*. Dit rapport beschrijft de voortgang van dit milieuonderzoeksprogramma in 2022.

Het milieuonderzoeksprogramma bestaat uit twee delen: Klimaat en Luchtkwaliteit. Het eerste deel, Klimaat, valt onder het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) en richt zich op de versterking van de kennis over en de inzet van hoogwaardige meetinfrastructuur voor het in kaart brengen van de Nederlandse broeikasgasemissies. Het tweede deel, Luchtkwaliteit, valt onder het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) en richt zich op de versterking van kennis en meetinfrastructuur om de invloed van de luchtkwaliteit op de menselijke gezondheid te bepalen. Vanwege deze separate subsidiestromen, worden de twee onderwerpen in dit rapport ook in twee aparte hoofdstukken behandeld.

1.2 Motivatie milieuonderzoeksprogramma Klimaat en Luchtkwaliteit

Door de toenemende groei van de wereldbevolking en haar welzijn blijft de consumptie, en daarmee de productie van voedsel en goederen, toenemen. Deze productiemethoden hebben negatieve effecten op het milieu. Ze leiden tot klimaatverandering en verslechtering van de menselijke gezondheid en biodiversiteit. Het is daarom niet verrassend dat thema's als broeikasgasmonitoring, gezondheidseffecten van fijnstof en het stikstofdossier steeds meer aandacht vereisen.

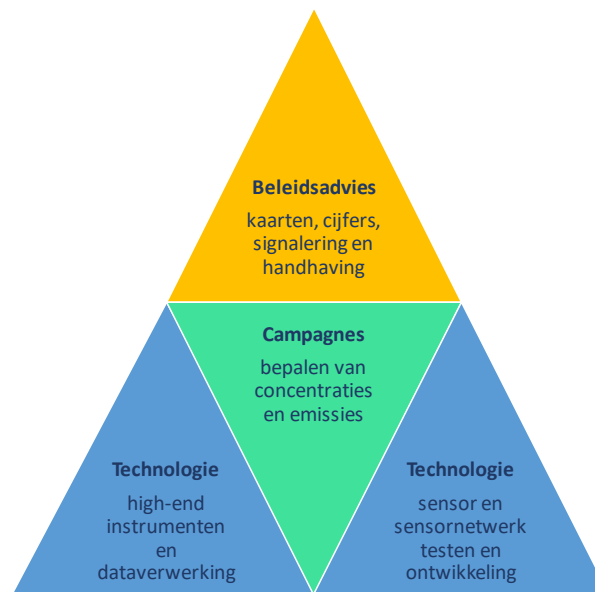
De Nederlandse overheid heeft zich gebonden aan afspraken ter verbetering van het klimaat en de luchtkwaliteit, zoals het Klimaatakkoord van Parijs en het Schone Lucht Akkoord (SLA). Om de bijbehorende doelen te halen is kennis en infrastructuur voor het goed bemeten van de Nederlandse emissies van essentieel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

TNO heeft jarenlange expertise op het gebied van broeikasgas- en luchtkwaliteitsmetingen en beschikt over instrumenten en kennis van wereldklasse. Hierdoor kan TNO een significante bijdrage leveren aan het in kaart brengen van de luchtkwaliteit in Nederland. Daarnaast maakt TNO deel uit van Nederland-brede en internationale netwerken op het gebied van klimaat en luchtkwaliteit, waardoor de kennis en aanpak breder gedragen en continu verbeterd kunnen worden.

Door middel van het milieuonderzoeksprogramma van EZK en IenW kan deze expertise bij TNO en in Nederland worden behouden en verbeterd. Dit programma maakt het mogelijk om o.a. bestaande apparatuur te borgen en verbeteren, nieuwe apparatuur te testen, lopende campagnes uit te breiden en internationale ervaring en kennis, bijv. uit EU-projecten, naar Nederland te halen.

1.3 Doelstelling

Het doel van het programma is het waarborgen van ondersteuning van de overheid door TNO op het gebied van klimaat en luchtkwaliteit, door middel van behoud en versterking van de hoogkwalitatieve luchtkwaliteitskennis en -infrastructuur bij TNO.



Figuur 1: Schematische weergave van de pijlers van dit programma

Dit valt uiteen in de volgende 4 programmapijlers (Figuur 1):

- **Innovatie en onderhoud 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 in Petten. Daarnaast is ook een sterke samenwerking met internationale consortia en de aanwezigheid van TNO op internationale fora voor uitwisseling van kennis en data hiervoor van belang.
- Het testen en ontwikkelen van (*goedkopere*) **sensoren en sensornetwerken** en de inzet hiervan in het landelijk meetnetwerk luchtkwaliteit (LML) en bij specifieke bronnen.
- 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, of het relevante bevoegde gezag hierbij betrokken worden en dat campagnes in samenwerking en overleg met deze partijen worden opgezet. De samenwerkingen met Schiphol, Tata Steel en Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) zijn goede voorbeelden hiervan.
- **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 gekwantificeerd worden.

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

1.4 De deelonderzoeksprogramma's in dit rapport

Het milieuonderzoeksprogramma is zowel voor Luchtkwaliteit als voor Klimaat opgesplitst in meerdere deelprogramma's. Een overzicht van de deelprogramma's is gegeven in Tabel 1 en

Tabel 2.

De deelprogramma's strekken zich uit over meerdere jaren en de prioriteiten kunnen binnen een jaar en van jaar tot jaar iets verschuiven. Dit leidt soms tot een schijnbaar scheve verdeling van de resultaten over de onderdelen per jaarrapport. Daarnaast zit er een natuurlijke vertraging tussen de uitgevoerde metingen en de duiding van deze metingen in termen van bijvoorbeeld specifieke emissies of emissiefactoren. Vanwege dit karakter van de programma's zal daarom in sommige gevallen ofwel de ontwikkeling en uitvoering van metingen die nog geanalyseerd moeten worden, ofwel de duiding van data uit voorgaande jaren, gepresenteerd worden.

Tabel 1 Overzicht van deelprogramma's binnen het onderdeel Klimaat.

Code	Deelprogramma
K-1	Nationale emissie: Cabauw
K-2	Campagnes: fingerprinting en bronduiding
K-3	Koppeling GHG-databronnen
K-4	Diffuse bronnen van N ₂ O en CH ₄
K-5	Emissies van landbouw en fossiele brandstoffen
K-6	Indirecte en onbekendere broeikasgassen

Tabel 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 Ruisdael
LKW-5	Focusonderwerp: Houtrook en/of ZZS

2 Klimaat – EZK

Voor het Klimaat deel is ingezet op een aantal speerpunten die zijn gericht op het ontwikkelen van kennis en methodieken voor het bepalen van broeikasgasemissies.

Analyse van de lange termijn metingen op Cabauw en de data van verschillende mobiele meetcampagnes geeft een beeld van de broeikasgassituatie op nationale en Noord-Europese schaal. Op deze manier wordt de kennis van de Nederlandse broeikasgasemissies versterkt en omgezet in relevante informatie voor het Nederlandse beleid op dit gebied.

Deelprogramma's K-1 t/m K-3 vormen de kern van het klimaatdeel en richten zich op vernieuwing, verbetering en behoud van de meetinfrastructuur. K-1 en K-2 richten zich op het vereenvoudigen van de analyse van de Cabauw data en het vernieuwen van de mogelijkheden met de mobiele data. Vervolgens wordt in K-3 gekeken hoe data van verschillende bronnen zoals Cabauw data, mobiele data en satellietdata, gecombineerd kunnen worden om een completer beeld van de Nederlandse emissies te krijgen.

De andere drie deelprogramma's richten zich op actuele onderwerpen, die kunnen wisselen over de jaren. K-4 richt zich op diffuse bronnen van lachgas en methaan, met name uit afvalstromen en natuur/veenweidegebieden. K-5 richt zich op de meest prominente bronnen van methaan en lachgas: agricultuur en lekkages van fossiele brandstoffen. In K-6 wordt gekeken naar de emissies van onbekendere broeikasgassen, zoals halogeenkoolwaterstoffen en indirecte broeikasgassen (waterstof en koolmonoxide).

TNO neemt actief deel in een aantal Europese projecten met als doel 'de vinger aan de pols' te houden voor wat betreft de nieuwste ontwikkelingen op Europees en internationaal niveau. Methoden en interpretatie van luchtkwaliteit en broeikasgasgegevens ontwikkelen zich snel. De Nederlandse bijdrage (bijvoorbeeld vanuit dit programma) vindt zo ook zijn weg naar andere EU-lidstaten. Bovendien genereert het Europese werk een multiplier op de beschikbaar gestelde subsidie wat de impact van dit werk aanzienlijk vergroot. In 2022 was er geen deelname vanuit dit programma aan EU-projecten. Dit wordt de komende jaren wel weer verwacht.

Dit programma draagt ook financieel bij aan het onderhoud en de inzet van de mobiele infrastructuur binnen het Ruisdael programma. Dit is essentieel om te zorgen dat de aangeschafte instrumenten ook bruikbare en wenselijke gegevens blijven opleveren en goed gekalibreerd worden. TNO heeft bijvoorbeeld sinds 2020 via het Ruisdaelprogramma de beschikking over een high-precision multicomponent gas analyzer⁴. Met dit nieuwe instrument (MIRO) is het mogelijk om simultaan CH₄, N₂O, CO₂, CO, NO, NO₂, SO₂, O₃ en NH₃ te meten, waarmee het een essentieel instrument is voor het vergaren van fingerprinting geschikte data tijdens mobiele ritten.

2.1 Resultaten deelonderzoeksprogramma's Klimaat

2.1.1 K-1 Nationale emissie: Cabauw

De Cabauw toren in Lopik is ontworpen door het KNMI en had in de jaren '80 en '90 een internationaal leidende rol in studies van de meteorologie in het onderste deel van de atmosfeer. In 1993 startte ECN met de CO₂-metingen op de Cabauw toren die het

⁴ Van Miro Analytical technologies

broeikasgasdeel van het Cabauw-datarecord in gang hebben gezet. Dit is in 1994 aangevuld met CH₄-metingen. De installatie van het Europese ICOS-netwerk volgde, waarin de Cabauw-toren tegenwoordig een van de oudste meettoren is. In de loop der jaren zijn meer instrumenten toegevoegd aan het instrumentarium voor het meten van andere componenten zoals N₂O, CO, H₂ en SF₆.

TNO verricht een essentieel deel van het werk aan de geavanceerde ICOS- en ACTRIS-meetinstrumentaria in het Cabauw station. Het station faciliteert ook internationale teams om te komen meten in bilaterale projecten, vaak ondersteund door transnationale toegangsprogramma's. Dit levert veel extra kennis op voor de Nederlandse (onderzoeks-)gemeenschap.

Activiteiten en resultaten in 2022: Behoud van Cabauw



Figuur 2: Links: Een nieuwe set Picarro analyzers naast het Spectronus FTIR instrument op Cabauw. Rechts: testen van verschillende buffertanks gekoppeld aan de inlaatleidingen die bemonsteren op 27, 67, 127 en 207m hoogte.

In 2022 is er hard gewerkt aan diverse upgrades en behoud van het Cabauw observatorium, waardoor er minder tijd was voor data-interpretatie en het bouwen van een data-interface (waar dit budget voor bedoeld is). Eind 2022 is daarom besloten om het budget van K-1 te besteden aan reparaties van het ICOS instrumentarium⁵. De meetreeksen van CO₂ en methaan liepen ondertussen gewoon door.

Mede door inzet van TNO is in 2022 ook de relatie met het ICOS consortium weer hersteld. Het ministerie van EZK heeft via TNO de achterstallige contributies voor Nederland betaald en zal in de toekomst zorgdragen dat Nederland volwaardig deel blijft nemen aan dit Europese broeikasgasnetwerk. TNO neemt vanaf nu namens het ministerie gedelegeerd deel aan de General Assembly van ICOS, zorgt (samen met WUR) dat er bijeenkomsten zijn van ICOS-NL en neemt sinds kort ook de rol van focal point voor ICOS op zich.

2.1.2 K-2 Campagnes: fingerprinting en bronduiding

Waar de nationale emissie gemeten op Cabauw uit K-1 een beeld geeft over Nederland in z'n geheel, wordt er in K-2 gezocht naar specifieke locaties met hoge en lage emissies. Dit gebeurt aan de hand van diverse meetcampagnes.

Historisch gezien zijn onderzoeken in de milieuthema's relatief "verzuild" uitgevoerd.

Metingen van NO_x en PM onderzoek stonden bijvoorbeeld los van metingen aan broeikasgassen, en metingen van ammoniak stonden weer los van de andere componenten. Het verder ontwikkelen van dit soort multi-gassoort analyses of "fingerprinting" wordt echter langzaam populairder. Het huidige gecombineerde onderzoeksprogramma (van EZK en IenW

⁵ Zie projectvoorstel "Broeikasgasmetingen Cabauw 2022", 7 november 2022

samen) is uitermate geschikt om over die grenzen heen te stappen: door metingen van de verschillende componenten simultaan te gebruiken kan de luchtkwaliteit in Nederland steeds gedetailleerder in kaart gebracht worden.

Verder wordt er in dit deelprogramma gewerkt aan het verifiëren van emissiefactoren. Dat geeft vertrouwen in de meetmethoden en in de rapportages die hier voor de Nederlandse bronnen uit volgen. Uiteindelijk levert het ook vertrouwen op in de Nederlandse Emissie Registratie en het daarop gebaseerde beleid.

Activiteiten en resultaten in 2022: Ruisdaelcampagne Rotterdam en RWZI's

In 2022 is nieuwe mobiele data verzameld via mobiele ritten en campagnes, waarbij ook de Ruisdael-instrumenten zijn ingezet. In 2022 is ook gewerkt aan de verdere interpretatie van de mobiele data van de RITA campagne 2021 in de regio Utrecht. Hierbij is gebruik gemaakt van data van de Cabauw meetmast als continue databron en is daarnaast de mobiele meetwagen ingezet voor mobiele pluimmetingen van CH₄, CO₂, N₂O, NO, NO₂, O₃, SO₂, NH₃ en fijnstof. Ook is er een tweede semi-mobiele meetwagen (op één plek tijdens de campagne) ingezet voor CH₄, CO₂, CO en fijnstof. Tenslotte zijn er ook transects gemaakt met een meetvliegtuig.

De eerste resultaten zijn binnen het Ruisdael consortium gedeeld. De resultaten van de aerosol en ammoniak metingen zijn weergegeven in het IenW deel van dit rapport (*LKW-2b: Chemisch specificatie van fijnstof*). Verdere uitwerking van de data is nog gaande, maar de Ruisdaelcampagne 2022 in Rotterdam (zowel de voorbereidingen als de campagne zelf) heeft in 2022 prioriteit gehad.

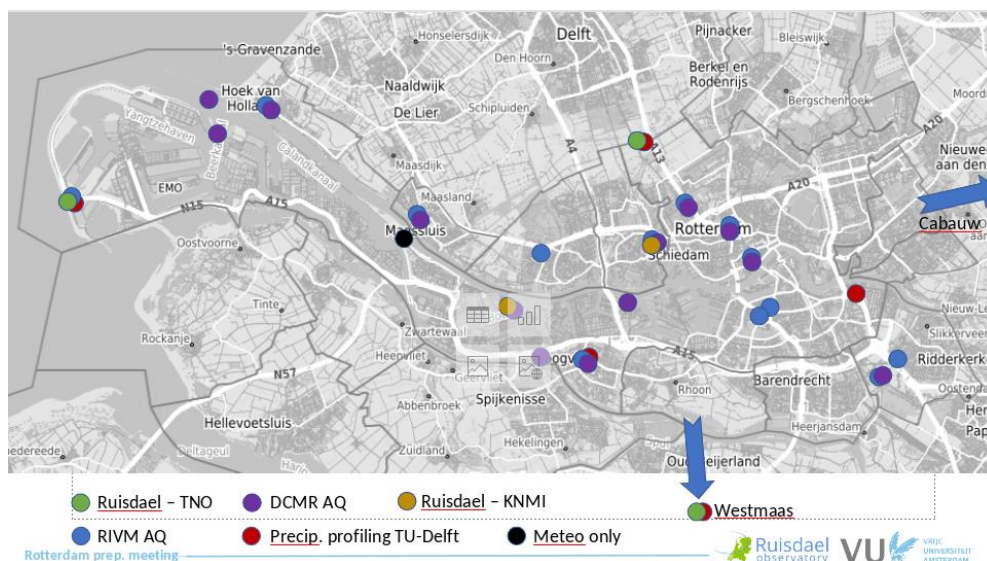


Figuur 3: Logo van de Rotterdam Ruisdael campagne in 2022.

Voor de nieuwe Ruisdaelcampagne in 2022 (Figuur 3), is gekeken naar emissies rondom de stad Rotterdam. Voor deze meetcampagne heeft TNO met verschillende meetlocaties en meettechnieken bijgedragen aan (Figuur 4):

- Broeikasgas- en aerosolmetingen op permanente meetsites (de Zweth, de Slufter en Westmaas).
- Mobiele meetwagen: monitoring CH₄, C₂H₆, CO₂, CO, N₂O, NO, NO₂, O₃, SO₂, NH₃, roet en de aerosol deeltjesgrootteverdeling voor emissie kwantificatie.
- Semi-mobiele meetwagen: monitoring aerosol-abundantie/samenstellingen, UFP en roet.

Daarnaast hebben de Ruisdael partners verschillende andere type metingen uitgevoerd waarbij onder andere gebruik is gemaakt van vliegtuigjes (PH-WUR en PH-SEL). Er zijn ook metingen gedaan met de fiets (NO₂).



Figuur 4: Locatie overzicht van de verschillende meetstations die binnen de Ruisdael Rotterdam campagne zijn gebruikt door de verschillende partners.

Figuur 5 geeft een voorbeeld van een deel van de resultaten van de mobiele metingen. Via deze visualisering kun je direct zien waar verhoogde concentraties van de verschillende componenten zich bevinden. Door meetdata te combineren met de windrichting, kan voor een meting nauwkeuriger een bron worden aangeduid. Een voorbeeld hiervan is de bepaling van de $C_2H_6:CH_4$ ratio om fossiele (thermogeen) bronnen te scheiden van biogene bronnen, want fossiele bronnen bevatten naast CH_4 ook C_2H_6 . De volgende stap is om de verschillende componenten te combineren en de fingerprinting methode hiermee verder te ontwikkelen. Zo kunnen verschillende emissiebronnen beter worden geduid.

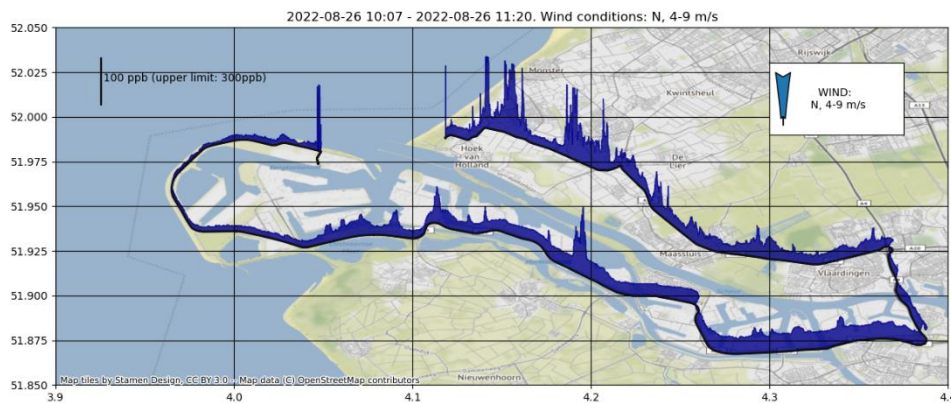
De mobiele meetgegevens kunnen ook worden gebruikt voor budgetberekeningen. Dit zijn berekeningen die bepalen hoeveel geëmitteerde stoffen een bepaald gebied toevoegt aan het totaal. Door bijvoorbeeld te bepalen hoeveel er van een bepaalde stof de stad inkomt en hoeveel eruit gaat, kan er geschat worden welk deel van de benedenwindse concentraties er afkomstig is van een stad. Figuur 6 geeft aan hoe een dergelijke budgetberekening tot stand komt, in dit geval voor Rotterdam. Er is een route gereden waarbij grote delen van de Rotterdamse haven zowel bovenwinds (noordelijk) als benedenwinds (zuidelijk) bemeten zijn. De methaanconcentratie is aangegeven voor elke “horizontale” kilometer, d.w.z. elke kilometer die oost- of westwaarts afgelegd wordt. Het verschil in concentratie tussen boven- en benedenwindse metingen kan gerelateerd worden aan de emissies die plaats vinden in het gebied. Deze gegevens, samen met de windsterkte en menglaaghoogte, kunnen worden gebruikt om een plaats-gemiddelde emissiesterkte te berekenen.

De eerste resultaten van de Ruisdaelcampagne in Rotterdam zijn gepresenteerd tijdens de Rotterdam Ruisdael data workshop op 14 november 2022. Ook zijn alle data gedeeld via de Ruisdael Research drive. Tijdens de Rotterdam campagne is ook een “controlled release” experiment gedaan in samenwerking met Universiteit Utrecht, met als doel om de kwantificering van CH_4 emissies te verbeteren. Dit kan onder andere gedaan worden door gebruik te maken van het Gaussisch Pluim model.

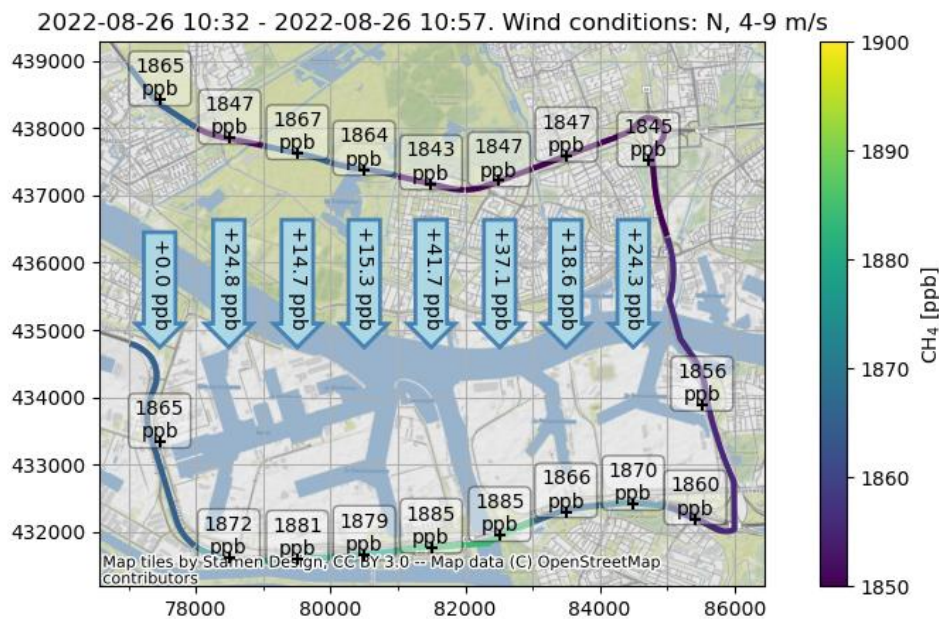
Tijdens de Rotterdam campagne is ook een promotie video gemaakt door TNO om te kunnen laten zien wat we doen aan klimaat en luchtkwaliteitsmetingen. De video is hier te vinden: <https://www.youtube.com/watch?v=XTBME3sjJow>

Bij de verdere uitwerking van de data van de Ruisdaelcampagne zal onderzocht worden of het toevoegen van fijnstof als relevante component het discriminerend vermogen van de fingerprinting routine verbetert. Deze component wordt doorgaans wel gemeten bij de

mobile ritten, maar nog niet meegenomen bij de brontoekenning van broeikasemitters. De mobiele data van de Ruisdaelcampagne is erg geschikt hiervoor, omdat alle benodigde componenten zijn gemeten en er veel verschillende bronnen zijn gepasseerd. Op dit moment zijn hier nog geen resultaten van beschikbaar, met name vanwege overleg met andere partners over de aanpak en taakverdeling.



Figuur 5: Voorbeeld van mobiele meetgegevens van CH₄. De hoogte is indicatief voor de concentratie, zoals aangegeven in de schaalbalk linksboven.

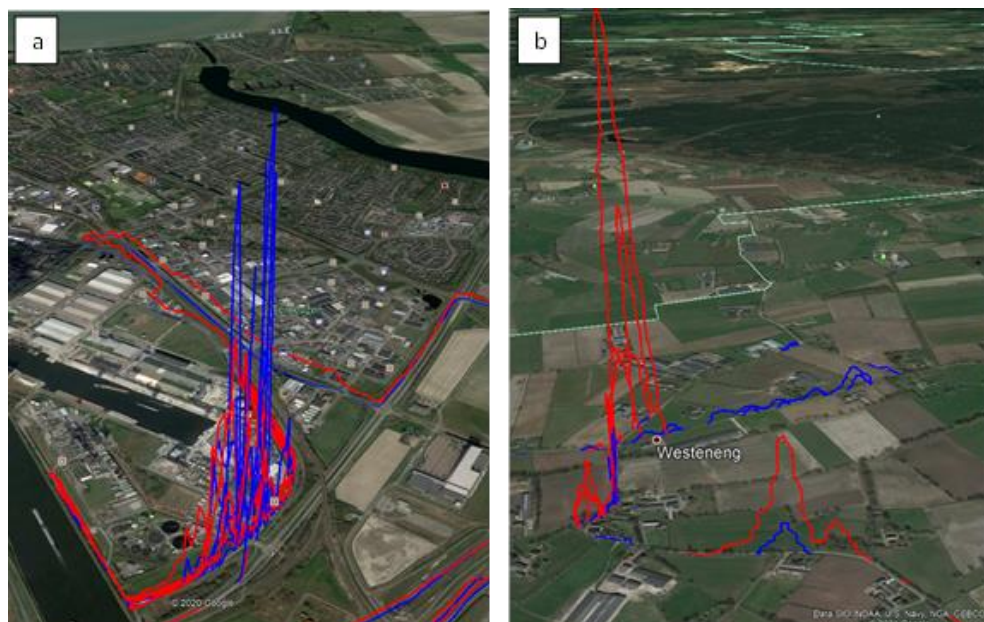


Figuur 6: Voorbeeld van een budget berekening voor CH₄ voor Rotterdam. De getallen bij de plus geven de gemiddelde CH₄-concentratie aan voor elke afgelegde kilometer oost-west (of v.v.). In de pijlen is de gemiddelde toegevoegde concentratie methaan te zien.

Vuilstortplaatsen en rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZIs) zijn geschikte bronnen om te gebruiken voor de verdere ontwikkeling van de fingerprinting methode. Dit zijn bronnen met emissies van verschillende componenten. Een eerste test met een aantal RWZIs heeft plaatsgevonden.

Figuur 7 laat een voorbeeld zien van twee verschillende bronnen van CH₄ en N₂O. de RWZI (links) heeft een CH₄:N₂O ratio tussen de 6 en 10, terwijl de boerderij (rechts) een CH₄:N₂O ratio >10 heeft. Op basis van dit soort ratio's kunnen verschillende typen bronnen worden onderscheiden. Eind 2022 zijn ook de emissies van drie stortplaatsen met mobiele metingen

bepaald. Deze worden in het voorjaar van 2023 nog een keer doorgemeten. Deze gegevens kunnen dan ook worden gebruikt als input voor de fingerprinting methode.



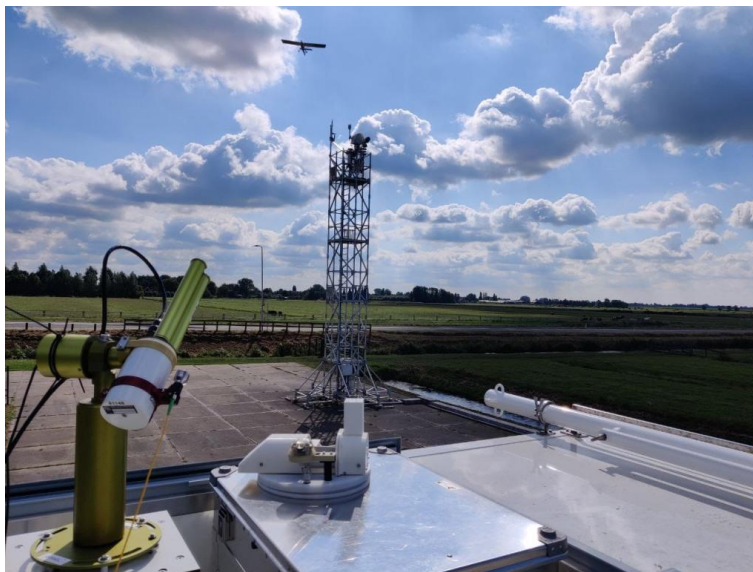
Figuur 7 CH_4 (rood) en N_2O (blauw) concentraties bepaald met mobiele metingen. a) RWZI met een $CH_4:N_2O$ ratio tussen de 6 en 10. b) een boerderij met een $CH_4:N_2O$ ratio >10 .

2.1.3 K-3 Koppeling GHG databronnen

Om de GHG-meetdata van satellieten op waarde te kunnen schatten zijn ground-truth datasets nodig. Dit zijn betrouwbare datasets met mobiele en stationaire metingen op of direct boven de grond (drones, vliegtuigen) die direct met satellietdata vergeleken kunnen worden. Daarnaast is ook een vergelijking van metingen op en boven de grond (vliegend) belangrijk, omdat elk van deze bronnen op een andere manier waardevolle informatie toevoegt.

Het doel van dit deelprogramma is daarom het bij elkaar brengen van grondwaarnemingen en bijbehorende metingen boven de grond en vanuit de ruimte, waarbij de concentratie van een gas, bijvoorbeeld methaan, uit alle richtingen wordt bemeaten. Dit geeft meer vertrouwen in de data en levert waardevolle informatie over de verspreiding van verschillende componenten.

Activiteiten en resultaten in 2022: kolommetingen & satelliet- en vliegtuigdata



Figuur 8: FTIR instrument (EM27, Bruker; rechts) en CIMEL (links) van de VU voor methaanmetingen ingebouwd in het dak van de semi-mobiele trailer.

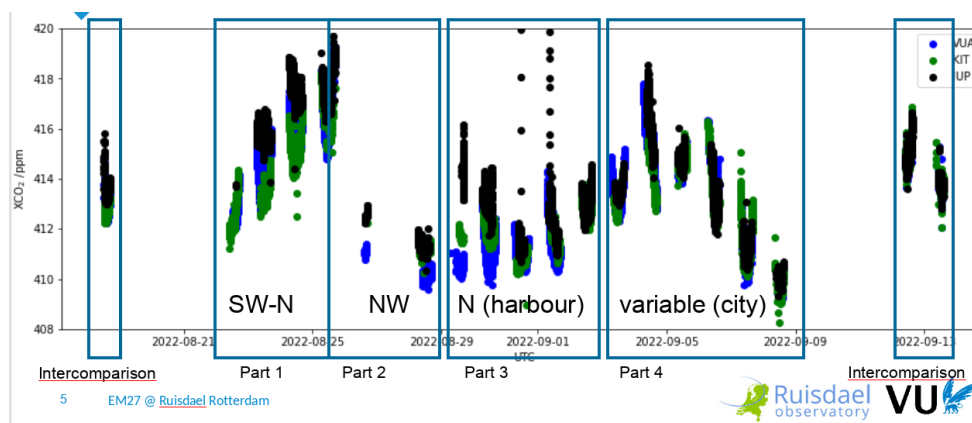
Via het Ruisdael consortium werkt TNO samen met de VU op het gebied van kolommetingen van methaan die kunnen worden vergeleken met de data van de Tropomi satelliet. Het hiervoor gebruikte FTIR-instrument, dat mobiel geopereerd kan worden vanuit de meetwagen van TNO, kijkt omhoog door dezelfde luchtkolom waardoor Tropomi naar beneden kijkt. De gemeten waarden kunnen gebruikt worden om de Tropomi data te ijken, het zogeheten “groundtruthing”. Doordat het instrument mobiel is, kan dit op meerdere plekken in Nederland worden gedaan, waardoor de waarden betrouwbaarder worden.

Bij de RITA campagne in 2021 zijn de eerste metingen met dit instrument in deze configuratie gedaan. PhD student Katharina Heimerl van de VU heeft deze toen uitgevoerd. De eerste resultaten binnen het Ruisdael consortium zijn door haar gepresenteerd tijdens een van de data workshops. Deze resultaten bestaan uit total column (X) profielen van XH_2O , XO_2 , XCO_2 , XCH_4 en XCO (X staat voor meting van de gehele kolom tot aan de menglaaghoogte) die zijn vergeleken met de satellietdata en modelberekeningen van CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service). Op kleine schaal (10-20 km^2) zijn er verschillen zichtbaar.

Daarnaast worden deze resultaten nog vergeleken met vliegtuigmetingen (XCO_2 , XCH_4 en XCO), die zijn uitgevoerd door de WUR met hun vliegtuig PH-WUR. Een wetenschappelijke publicatie over deze campagne is nog in voorbereiding.

De semi-mobiele trailer met het FTIR instrument (EM27, Bruker) is in 2022 ook ingezet tijdens de Ruisdaelcampagne Rotterdam. Daarnaast zijn er drie EM27 instrumenten van andere instituten beschikbaar gesteld om rondom Rotterdam de concentraties boven- en benedenwinds van de regio Rotterdam te kunnen bepalen.

Figuur 9 geeft de voorlopige XCO_2 resultaten van deze drie instrumenten voor Rotterdam weer. Voor XCO_2 zijn bij bepaalde windrichtingen verschillen in de orde van 1-2 ppm gezien voor verschillende locaties. Voor en na de campagne zijn alle instrumenten bij elkaar gezet voor een onderlinge vergelijking (intercomparison), waarbij deze verschillen niet zichtbaar waren, het verschil ligt dus niet aan de inzet van verschillende instrumenten. Ook deze data zullen worden vergeleken met satellietdata en vliegtuigmetingen, die ook tijdens deze campagne met de PH-WUR zijn gedaan. De resultaten zullen ook verder worden uitgewerkt in een wetenschappelijke publicatie.



Figuur 9 Voorlopige resultaten van de FTIR metingen in regio Rotterdam, genomen op drie verschillende locaties (afkomstig van K. Heimerl, VU).

Daarnaast wordt er bij TNO gewerkt aan een methaancamera, waarmee methaanconcentraties in de lucht in beeld gebracht kunnen worden. De waarde van dit instrument is tweeledig. Allereerst kan het gebruikt worden voor een snelle detectie van een emissiepluim. Daarnaast, door de foto's te vergelijken met hoogwaardige concentratiemetingen in dezelfde pluim, kan zowel de afschatting van methaanconcentraties in de pluim als de emissiebepaling uit mobiele metingen verbeterd worden, door betere kennis van de concentratiewaarden en de afmetingen van de pluim, respectievelijk.

Het instrument is nog verder in ontwikkeling en is daarom in 2022 niet ingezet bij campagnes. In 2021 bleek dat er nog meer ontwikkeling nodig was, bijvoorbeeld voor metingen bij lagere buitenlichtintensiteit. Zodra het weer mogelijk is om veldtesten te doen met de camera kan deze weer mee met een van de campagnes waarbij methaan gemeten wordt.

2.1.4 K-4 Diffuse bronnen N₂O en CH₄

Vuilstortplaatsen, rioolwaterzuiveringen en bijbehorende rioleringsystemen, maar ook waterrijke gebieden en veenweidegebieden zijn diffuse bronnen van CH₄ en N₂O.

Door gasonttrekkingsinstallaties en de verminderde toevoer van organisch materiaal, hebben vuilstortplaatsen bijgedragen aan een belangrijk deel van de methaanemissiereductie die in Nederland sinds 1990 is bereikt. De laatste serieuze meetinspanningen om de emissies van deze bronnen te duiden zijn echter meer dan tien jaar oud.

De onzekerheid in de uitstoot van lachgas bij rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) is nog relatief groot. Volgens het IPCC is dit 700 kton CO₂-eq. per jaar, maar de statistiek achter deze metingen is beperkt. Er zijn maar een beperkt aantal waterzuiveringen gedurende een korte periode bemeaten. De rioolwaterzuiveringen willen het uitgestoten methaan gaan opvangen als biogas, maar ook hier zijn betere cijfers voor nodig.

Naast dat rioolwaterzuiveringsinstallaties een belangrijke bron vormen voor de uitstoot van broeikasgassen, spelen de rioleringsystemen zelf ook een belangrijke rol. De processen en de grootte van de emissieconcentraties die voortkomen uit RWZI's en rioleringsystemen zijn nog vrij weinig in kaart gebracht, waardoor deze bronnen o.a. niet (accuraat) worden meegenomen in klimaatmodellen.

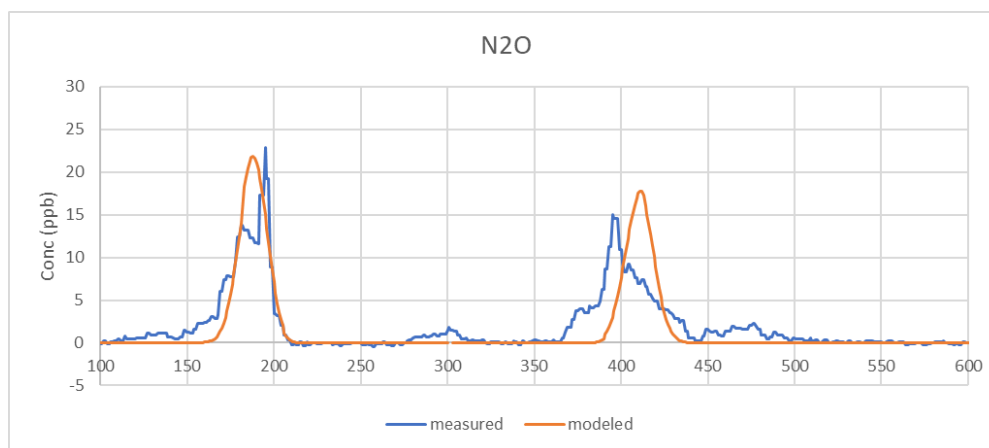
Ook bodemdaling in veenweidegebieden en natuurlijke productie van gassen bij waterige processen leveren naar verwachting een belangrijke bijdrage aan de nationale methaanemissie. Op deze processen valt lastig grip te krijgen en de gerapporteerde getallen zijn waarschijnlijk onderschat. Beschikbare gegevens zijn fragmentair en dateren vooral uit de periode 2006-2010 waarin meerjarige fluxmetingen van veenweidegebieden gedaan zijn. In het RINGO-project (2017-2021) is een eerste poging gedaan om methaanemissies uit waterrijke gebieden in kaart te brengen. Dit werk krijgt nu opvolging in het NOBV (Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden), waarbinnen TNO in 2021 en 2022 als

onderaannemer metingen uitgevoerd heeft. Vanaf 2023 is TNO volwaardig partner in dit programma.

Activiteiten en resultaten in 2022: afvalstortplaatsen en veenweidegebied

In het najaar van 2022 zijn drie afvalstortplaatsen bemeten met behulp van tracer release metingen. De eerste resultaten zijn uitgewerkt en worden nu in een tussenrapport verwerkt. Een voorbeeld van de gemeten en gemodelleerde N_2O pluimen bij een van de stortplaatsen is weergegeven in Figuur 10. Hier is te zien dat de werkelijkheid soms redelijk overeen komt met het model (linkerpiek), maar dat er ook complexere gevallen zijn waar beter naar gekeken moet worden (rechterpiek). Op basis van deze metingen kan de emissie van CH_4 per pluim worden bepaald.

In het voorjaar van 2023 zullen de stortplaatsen nog een keer worden bemeten om ook het seizoenseffect van de emissies te kunnen bepalen. Helaas was de methaancamera nog niet ver genoeg om mee te doen bij de emissiemetingen van de stortplaatsen.



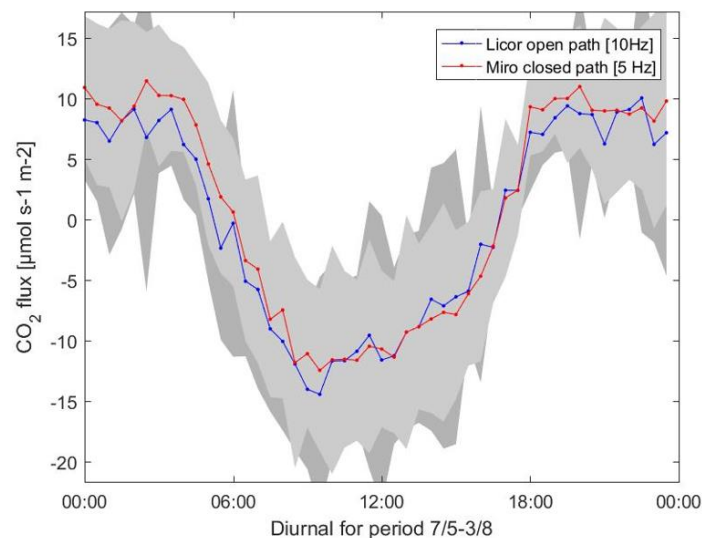
Figuur 10: Voorbeeld van twee transecten waarin de gemeten (measured; blauw) en gemodelleerde (modeled; oranje) lachgaspluimen zijn weergegeven.

Een aantal RWZI's die tijdens eerdere mobile campagnes zijn bemeten, zijn gebruikt voor een eerste casus om de fingerprinting methode te testen. Deze eerste resultaten zijn in K2 (2.1.2) beschreven.

Nieuwe gegevens over waterrijke gebieden kunnen een belangrijke rol spelen bij de discussie over de rol van veen in de nationale broeikasgasemissies. Het is daarom waardevol om te onderzoeken of er een onderbouwde koppeling gelegd kan worden tussen gemeten broeikasgasuitwisseling (CO_2 , CH_4 en N_2O) en de bijbehorende gegevens over bodemdaling, welke beschikbaar zijn bij de geologische dienst van TNO.

In dit kader doet TNO (via het NOBV project) N_2O flux metingen bij Zegveld, waarbij de effectiviteit van maatregelen op de uitstoot van broeikasgassen in veenweidegebieden wordt onderzocht. De focus lag hierbij tot nu toe op emissies van CO_2 en CH_4 door veenafbraak, maar dit verschuift nu richting het effect van maatregelen tegen veenafbraak op de emissie van N_2O . Als dit sterke broeikasgas toeneemt door een maatregel, dan heeft deze netto veel minder effect.

Standaard worden voor dit type onderzoek fluxkamermetingen gebruikt. Dit type metingen geeft inzicht in de uitwisseling tussen bodem en atmosfeer voor een klein, maar goed gedefinieerd, bodemoppervlak. Deze manier van meten geeft minder inzicht in de variatie over de dag en mogelijke emissie events. Bijvoorbeeld variaties door regen kunnen worden gemist.



Figuur 11: Vergelijking van CO₂ flux metingen met open pad en gesloten pad meet instrumenten.

TNO heeft daarom de Eddy Covariance methode hiervoor ingezet. Deze metingen geven inzicht in de continue uitwisseling tussen bodem en atmosfeer voor een groot gebied. Een voorbeeld van een resultaat met deze methode is te zien voor CO₂ metingen in Figuur 11. Voor N₂O metingen is deze methode nog niet eerder ingezet, omdat dit technisch en operationeel nog niet haalbaar was. De methode is in meer detail beschreven in 2.1.5.

TNO was in 2021 al gestart met fluxkamermetingen van N₂O, waarbij op drie velden met verschillende drainage systemen voor een periode van 6 weken is gemeten. In 2022 zijn de metingen met de Eddy Covariance methode gestart, waarbij drie velden in dezelfde periode worden gemeten door elk half uur van inlaat te wisselen met een automatische schakeling. Op deze manier kunnen meerdere velden simultaan bemeten worden. In 2023 worden deze metingen verder voortgezet.

Met de verkregen data, als onderdeel van het NOBV project, zullen de resultaten bijdragen aan de koppeling van bodemdaling van veenweidegebieden met de emissies van broeikasgassen en metingen bij grote waterlichamen.



Figuur 12: Impressie van N₂O metingen op 3 velden in Zegveld. Deze metingen worden gedaan om de bodemdaling en bijbehorende broeikasgasemissies in kaart te brengen.

2.1.5 K-5 Emissies van landbouw en fossiele brandstoffen

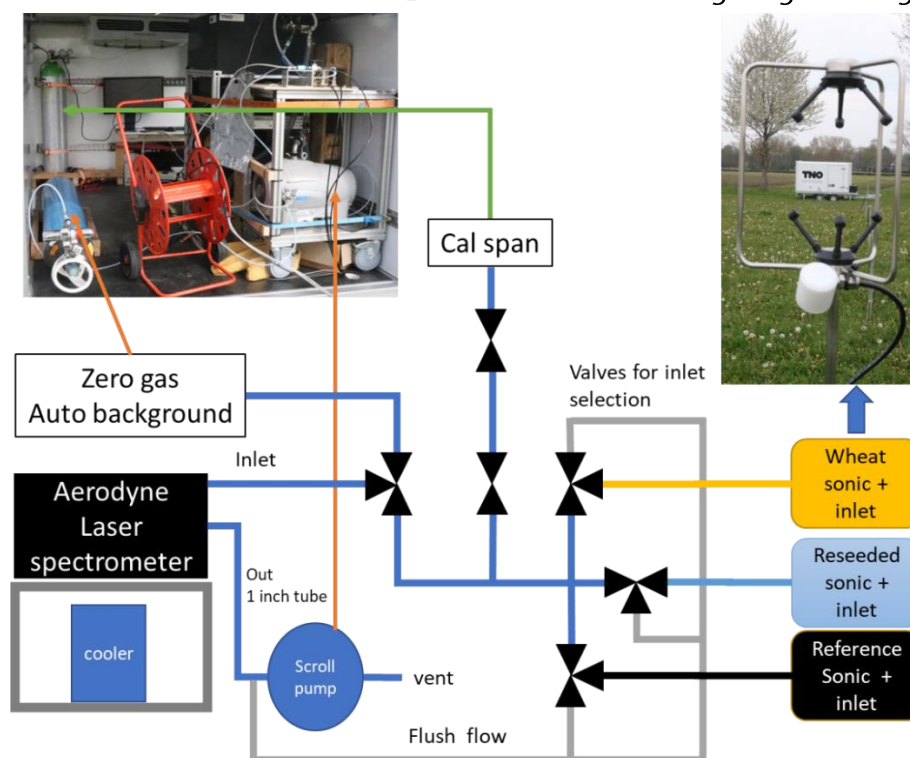
Er komt veel methaan vrij bij de productie van fossiele brandstoffen, bijvoorbeeld bij lekkages op boorplatforms of van gasleidingen. In 2019-2021 is er een forse upgrade van de meetinfrastructuur op Cabauw uitgevoerd in het kader van het Ruisdaelprogramma, waarvan

een groot deel op het gebied van broeikasgasmetingen. Een van deze upgrades is een opstelling voor continue ethaanmetingen bij Cabauw. Ethaan (C_2H_6) is een nuttige tracer voor methaanuitstoot in de olie- en gasindustrie. Ethaan komt samen met methaan uit fossiele brandstoffen, maar komt niet vrij bij methaanemissies uit de veehouderij of stortplaatsen. Op basis van een combinatie van de methaan- en ethaangegevens van Cabauw en mobiele campagnes kan daarom een schatting worden gemaakt van de fractionele bijdrage van landbouw en olie & gas aan de gemeten landelijke methaanuitstoot.

TNO heeft daarnaast ook de afgelopen jaren de methodiek van mobiele metingen van methaan verder ontwikkeld en toegepast voor onder andere Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) voor het zoeken en meten van gaslekken, voor de olie- en gasindustrie voor het bemeten van boorplatforms en pijpleidingen en bij het EU-project MEMO², waar in Roemenië bij diverse bekende methaanbronnen met een groot team metingen zijn verricht. Daarnaast zijn in 2022 de eerste metingen van CH_4 in zeewater uitgevoerd. Hierbij was de vraag of afgesloten gasputten in de Noordzee lekken.

Veehouderij en mestaanwending in de landbouw zijn ook grote bronnen van methaan en lachgas emissies. Methaan komt vrij bij vergistingsprocessen van mest en bij de spijsvertering van koeien. Lachgas kan vrijkomen uit gaswassers, maar de grootste productie van lachgas in Nederland vindt plaats na aanwending van mest op het land via stofwisselingsprocessen van schimmels en bacteriën. Kwantificering van deze processen is nog erg mager en TNO werkt aan een goede meetaanpak om dit soort metingen uit te voeren. De metingen gebeuren grotendeels in samenwerking met de WUR.

Activiteiten en resultaten in 2022: N_2O uit mestaanwending en gaslekkages



Figuur 13: Schematische weergave van de EC meetmethode, waarbij elk half uur geschakeld wordt naar het volgende veld.

Agricultuur

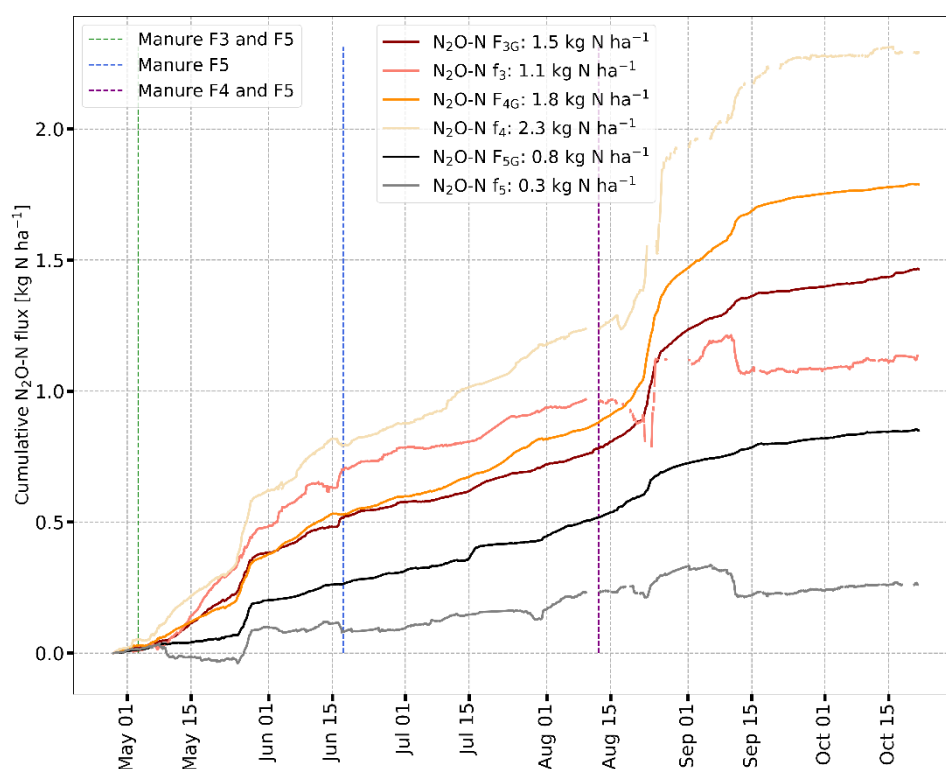
Wat betreft lachgasproductie bij mestaanwending is in samenwerking met de WUR (WLR) gemeten aan verschillende strategieën om CO_2 en N_2O emissies uit bemeste weilanden te

verminderen. Hiervoor zijn metingen uitgevoerd met Eddy Covariantie (EC) metingen en snelle kamermetingen.

Gelijktijdig zijn CO₂- en N₂O-ecosysteemitwisselingsmetingen gedaan op drie percelen, één referentiegraslandperceel dat “zoals gebruikelijk” werd beheerd en twee percelen die werden omgeploegd waarna gras en zomertarwe werden ingezaaid. Uit deze gegevens werd de gasuitwisseling (flux) van deze ecosystemen berekend met behulp van de EC methode. De totale netto-uitwisseling werd verkregen door de cumulatieve flux in de tijd te berekenen.

De fluxmetingen van CO₂ en N₂O met behulp van de EC techniek werden achtereenvolgens uitgevoerd op de drie verschillende velden met behulp van lange inlaatleidingen (Figuur 13). Aangezien de velden dicht bij elkaar lagen, werden de bijdragen van ten minste twee verschillende fluxbijdragers opgeteld, wat leidde tot unieke (co)spectra die waarschijnlijk niet goed verband houden met theoretische spectra.

Om dit te onderzoeken is in een intern project (binnen het vraaggestuurd programma P510) een nieuw machine learning algoritme gebruikt voor de analyse van deze data, dat gebruikmaakt van een random forest (RF)-benadering⁶ om de gegevens te analyseren. Met behulp van de RF-benadering zijn de gevonden N₂O-budgetten van het zomertarweveld en het grasveld geclassificeerd als vergelijkbaar. Deze zijn ook een factor 2,9 tot 4 groter dan het referentieveld (met toegepaste oppervlakteweging) (Figuur 14). Fluxen van kamermetingen waren een factor 2,2-2,9 lager voor de beheerde velden, wat nog steeds binnen een redelijk bereik ligt. De discrepantie tussen de EC- en kamerfluxen was het grootst voor het referentieveld.



Figuur 14: Cumulatieve N₂O uitwisseling van alle velden (F3=tarwe, F4=gras, F5=referentie) aangegeven met verschillende kleuren in kg N ha⁻¹.

⁶ In een random forest benadering worden door de computer meerdere “beslisbomen” (het “random forest”) voor classificatie van een object (in dit geval een meetdatapunt) tegelijk doorlopen. De uitkomst die het meest voorkomt, is de uiteindelijke classificatie. In dit geval is dit dus de classificatie of een gemeten concentratie van het ene of het andere veld afkomstig is.

Fossiele brandstoffen

In 2022 heeft nog geen nieuwe vergelijking van ethaan- en methaandata van Cabauw plaatsgevonden, aangezien de ethaan data nog niet continu goed binnen kwam en dat eerst verder uitgezocht moest worden. Wel zijn de CH₄ data van Cabauw gebruikt voor de validatie van de TOPAS tool voor CH₄. Daarnaast zijn de mobiele meetdata van CH₄ en C₂H₆ van de ROMEO campagne gebruikt voor een verbetering van de CH₄ en C₂H₆ inventarisaties.

C₂H₆ wordt vaak gebruikt als tracer van vluchtige olie- en gas-gerelateerde CH₄ emissies, aangezien het gelijktijdig wordt uitgestoten. Daarnaast heeft C₂H₆ een lagere atmosferische levensduur en daardoor een lagere achtergrondconcentratie en hogere concentratiegradiënten. Om C₂H₆ als tracer te gebruiken is het van belang dat de verhoudingen met het mee geëmitteerde CH₄ zo nauwkeurig mogelijk bekend zijn. Bijgewerkte methodologieën zijn ontleend aan de resultaten van een recent project voor DG Energie, waarin door het land ingediende emissiegegevens werden vergeleken met de resultaten van geavanceerde onafhankelijke gegevens. Er is een nieuwe methaanemissie-gerasterde dataset gecreëerd, vergelijkbaar met de bestaande TNO-CAMS-inventarisaties.

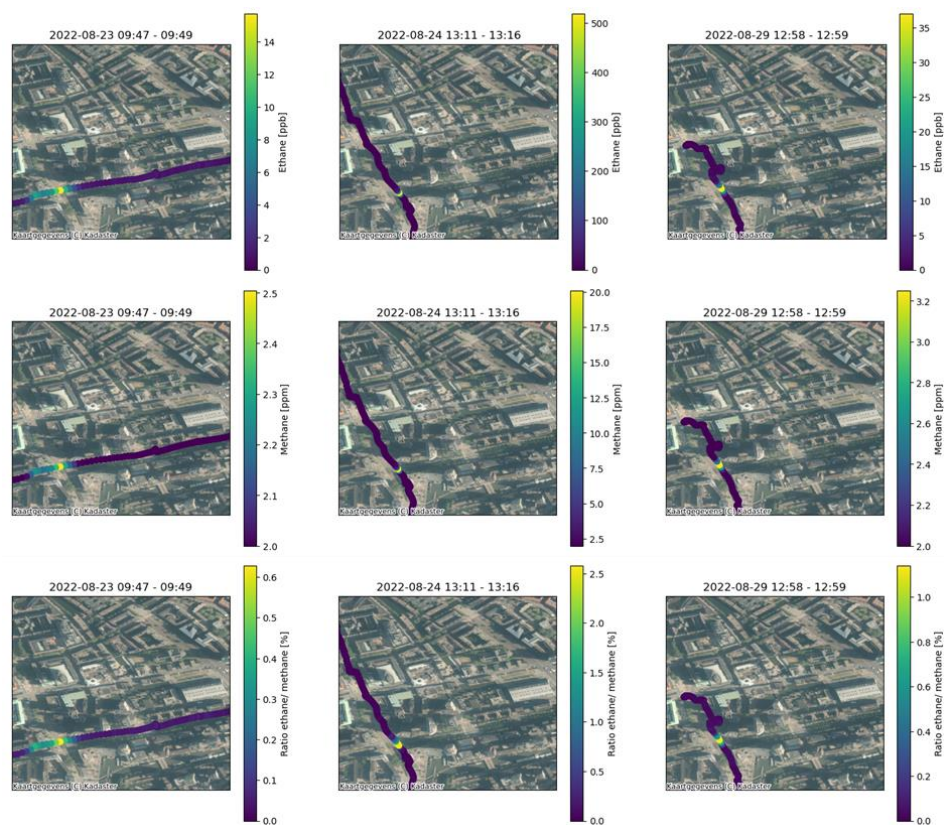
TNO is goed bekend met de gasindustrie en heeft de afgelopen jaren enkele adviesopdrachten uitgevoerd voor NOGEP⁷ en GERG⁸. Vanuit deze expertise is TNO door GERG voorgedragen voor de Scientific Oversight Committee van IMEO (International Methane Emission Observatory). Dit heeft uiteindelijk helaas geen doorgang gevonden.

Het kwantificeren van methaanbronnen blijft een punt van aandacht, omdat de bestaande methodes kostbaar en tijdsintensief zijn. Daarbij is er Europees de Level 5 OGMP 2.0 reporting framework, waarbij bottom-up en top-down afstemming vereist wordt. Dit betekent dat gerapporteerde emissies onafhankelijk gevalideerd moeten worden. Dit biedt kansen om emissiemetingen verder te ontwikkelen, zodat het minder arbeidsintensief kan worden en daardoor ook kostenbesparend. De mogelijkheden voor de koppeling van verschillende databronnen (meetwagen, drones, vliegtuigen en satellieten) voor het opsporen en kwantificeren van gaslekages, kunnen daarmee ook worden onderzocht.

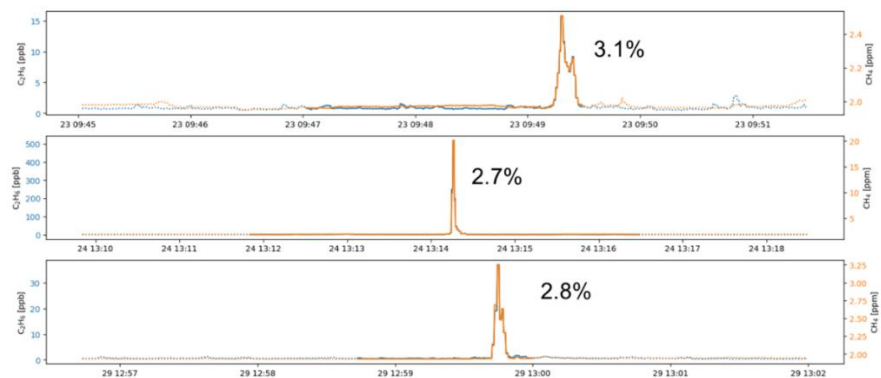
Tijdens mobiele meetcampagnes worden regelmatig concentratieverhogingen aangetroffen die duiden op een potentieel gaslek. Ook tijdens de Rotterdam Ruisdael campagne zijn potentiële gaslekken aangetroffen. Een voorbeeld van een gaslek is gezien bij de Koopgoot (Figuur 15 en Figuur 16). Figuur 15 laat concentratieverhogingen van CH₄ en C₂H₆ zien op drie afzonderlijke dagen tijdens de meetcampagne. Figuur 16 laat zien dat de C₂H₆:CH₄ ratio rond de 3% ligt, wat een indicatie is voor aardgas. Wanneer een duidelijk lek wordt aangetroffen, proberen we via het gasdistributie netwerk, gemeente of ander bevoegd gezag contact te zoeken om een melding te maken.

⁷ NOGEP staat voor Netherlands Oil and Gas Exploration and Production Association en is een samenwerkingsverband van Nederlandse bedrijven die naar gas zoeken en boren op de Noordzee (www.nogepa.nl).

⁸ GERG staat voor European Gas Research Group, een samenwerking van de Europese gasindustrieën ter bevordering van onderzoek en innovatie in de gasvoorziening. GERG houdt zich bezig met de Europese gas infrastructuur, maar ook o.a. met de transitie naar waterstof en biomethaan (www.gerg.eu).

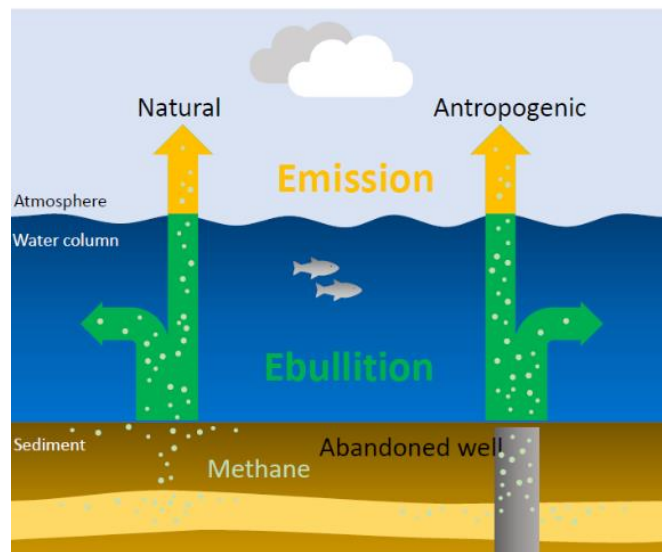


Figuur 15 Concentratieverhogingen van CH_4 en C_2H_6 bij de Koopgoot in Rotterdam op drie afzonderlijke dagen tijdens de Rotterdam Ruisdael campagne.



Figuur 16: De concentratiepieken van C_2H_6 en CH_4 met een ratio van rond de 3%, wat typisch is voor aardgas.

Meetcampagne voor methaan uit de Noordzeebodem

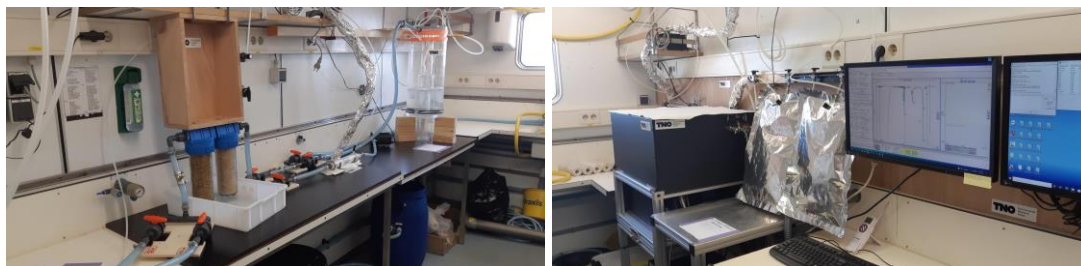


Figuur 17: Schematische weergave van de processen van ebullitie (afbeelding afkomstig van TNO-AGE).

Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft TNO en NIOZ gevraagd om onderzoek te doen op de Noordzee om methaanopborreling, ebullitie genoemd ("ebullition" in Figuur 17), bij verlaten putten vast te stellen en in perspectief te plaatsen van mogelijke natuurlijke ebullitie. Ebullitie is het proces waarbij methaangas via bellen van de bodem naar de waterkolom ontsnapt. Wanneer dat gas de atmosfeer bereikt, spreken we van methaanemissies. Om meer inzicht te krijgen in eventuele extra ebullitie, uit het voorzorgsprincipe en om klimaatproblemen zoveel mogelijk te voorkomen, hebben we in juni deelgenomen aan een eerste meetcampagne van 18 dagen op de Noordzee met onderzoeksschip Pelagia van het NIOZ. Allereerst zijn de meest interessante locaties voor deze metingen geselecteerd op basis van een door TNO AGE⁹ geleverd overzicht van verlaten putten, in combinatie met informatie over de sub-bodem (shallow gaslagen, bright spots, tunnel valleys, veenlagen). Het team van EMSA Petten is gevraagd om methaanmetingen in de waterkolom uit te voeren, omdat we met onze hoogwaardige instrumenten nauwkeurige atmosferische methaanconcentraties kunnen meten.

Een Multi-Beam Echosounder-systeem (MBES) werd gebruikt om de "bellenpluimen" te detecteren, een Sub Bottom Profiler detecteerde de bovenste laag van de zeebodem. Een magnetometer werd gebruikt om de exacte locatie van de verlaten putten te detecteren. Met de CTD (meet Conductivity, Temperature en Depth-profielen) werden op verschillende dieptes watermonsters genomen voor metingen van nutriënten, pH, zuurstof en methaan. Op het CTD-frame werd ook een methaansensor geplaatst om het methaanprofiel te meten. Methaan (CH₄), ethaan (C₂H₆), lachgas (N₂O), kooldioxide (CO₂) en koolmonoxide (CO) werden gemeten met een TILDAS-spectrometer (Aerodyne). Naast de watermetingen werden ook atmosferische metingen van CH₄ en CO₂ uitgevoerd met een Picarro G2310 gecombineerd met een GPS-gecorrigeerde 2D windsonische anemometer (Figuur 19, rechts).

⁹ De TNO Adviesgroep economische zaken (TNO AGE) geeft wetenschappelijk inzicht en advies over verantwoord en efficiënt gebruik van de diepe ondergrond. Voor zowel beleidsmakers, toezichthouders, stakeholders als het grote publiek.

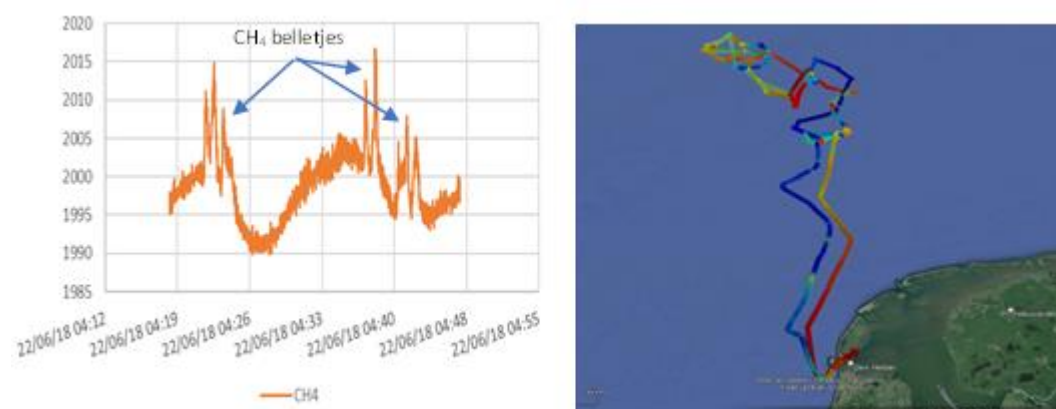


Figuur 18: Meetopzet in een 20ft container aan boord van de Pelagia voor het bepalen van methaan uit oude gasputten op de zeebodem.

Dit was de eerste keer dat TNO methaanmetingen in de waterfase uitgevoerd heeft. De opstelling is voor de campagne opgebouwd in een 20ft container van het NIOZ en “op het droge” getest (Figuur 18). Tijdens de campagne werd het water vanaf 5 m boven de zeebodem opgepompt naar de container via een slang (de SLURF) met een gewicht van 400 kg, waarbij het langs twee filters naar de Weiss equilibrator (van de universiteit van Bremen) gepompt werd of naar het methaanmembraan. Een Weiss equilibrator is een evenwichtssysteem, waarbij water via de bovenkant de equilibrator binnen druppelt door een headspace (lucht), waar uitwisseling van het gas uit de waterfase naar de lucht plaatsvindt. Dit is een veelgebruikte methode om de concentratie van gas in een vloeistof te bepalen.

Als de SLURF niet kon worden gebruikt (tussen meetlocaties in), werd het aquaflow-systeem gebruikt, waarbij water van 4 m onder zeeniveau bij de kiel van het schip werd gehaald. Zo was het gedurende de hele campagne mogelijk om methaan in de waterfase te meten. In Figuur 19 (links) is een voorbeeld te zien van CH_4 afkomstig uit de waterfase, wanneer ebullitie via de MBES zichtbaar was.

Deze eerste offshore meetcampagne was een succes qua instrumentprestaties. De opstelling aan boord was stabiel en heeft gedurende de hele campagne continu gemeten. In 2023 is een vervolgcampagne gepland, waarbij een aantal locaties zijn geselecteerd voor verder onderzoek.



Figuur 19: Links: Voorbeeld van CH_4 afkomstig uit de waterfase, de pieken bovenop de achtergrondconcentraties laten de methaan belletjes (ebullitie) zien, die op dat moment ook via de MBES zichtbaar waren. Rechts: Overzicht van atmosferische CH_4 concentraties gemeten gedurende de gehele campagne van de Pelagia over de Noordzee (rood is hoog, blauw is laag).

2.1.6 K-6 Indirecte en nieuwe broeikasgassen

De aanwezigheid van verschillende soorten gehalogeneerde koolwaterstoffen (halocarbons) in de atmosfeer heeft geleid tot een probleem van aantasting van de ozonlaag in de stratosfeer (het ozongat). Om dit te ondervangen zijn nieuwe chemische componenten ontwikkeld die minder effect hebben op ozon. Deze nieuwe gassen blijken echter ook

belangrijke broeikasgassen te zijn. In totaal hebben deze gassen een GWP dat in de buurt komt van dat van N_2O . Metingen in de atmosfeer zijn beschikbaar voor Zwitserland en het VK, maar ontbreken voor Nederland. Sinds 2021 worden er door het Cabauw station ook halocarbons gemeten door middel van analyses van flessensamples door de universiteit van Bristol. Eind 2021 tot aan zomer 2022 zijn er ook directe metingen gedaan met het Medusa instrument van EMPA. Hieronder worden deze activiteiten tot nu toe meer toegelicht.

CO en H_2 zijn indirecte broeikasgassen, omdat ze in de lucht reageren met het OH radicaal dat een belangrijke rol speelt bij het afbreken van methaan. Dit proces is belangrijk voor de kortere levensduur van methaan. CO is een tracer voor verbrandingsprocessen. Voor de emissies van CO bestaan dan ook al langere datseries, bijvoorbeeld op Cabauw. De interesse in waterstof was groot in de jaren 90, maar is begin deze eeuw weer verdwenen. Met de toename van elektriciteit uit zon en wind komt echter ook het genereren, opslaan en gebruik van waterstof weer terug op de agenda, wat mogelijk in de toekomst een grote bron zal vormen van waterstoflekkages naar de atmosfeer. De meetinfrastructuur is echter verdwenen en zal weer moeten worden hersteld.



Figuur 20: Links: Het Medusa systeem van EMPA, tijdelijk geïnstalleerd in het Cabauw station. Rechts: Flessensampling in het Cabauw station.

Activiteiten en resultaten in 2022: metingen van halocarbons

Van november 2021 tot augustus 2022 zijn continue metingen van gehalogeneerde koolwaterstoffen uitgevoerd met een Medusa systeem dat door een Zwitsers team van EMPA (Zurich) op Cabauw is geplaatst (Figuur 20 links). Vanaf 2021 heeft TNO om de dag flessensamples (Figuur 20 rechts) genomen die op eenzelfde Medusa worden geanalyseerd door de Universiteit Bristol. Deze metingen zijn geïnitieerd omdat het Benelux gebied een hotspot blijkt te zijn van emissies van gehalogeneerde koolwaterstoffen. Dit blijkt uit bekende emissieregistraties en inversiemodellering, waarbij metingen in onder andere UK en Zwitserland als input hebben gediend. Om meer inzicht te krijgen deze hotspot regio heeft EMPA een project gestart met continue metingen op Cabauw en is TNO in samenwerking met Universiteit Bristol de flessensampling gestart. Op deze manier wordt het inzicht in de Nederlandse bijdrage van gehalogeneerde koolwaterstoffen, waaronder F-gassen, en de inverse modellering van bronnen van deze gassen in de UK verbeterd. De metingen kunnen, in combinatie met transportmodellen, aangeven waar de bronnen zouden moeten zijn en hoeveel die bij kunnen dragen aan de metingen op Cabauw.

Een betere nauwkeurigheid van dit type metingen kan worden verkregen door een tracergas met een van tevoren ingestelde flow los te laten bij een bekende bron. Vervolgens wordt zowel de concentratie van het tracergas als van het te traceren gas op Cabauw gemeten. De verdunning van het tracergas en het onderzochte gas zijn bij benadering bij aankomst op Cabauw hetzelfde. Daarom, en omdat van een van de gassen de emissiesterkte nauwkeurig

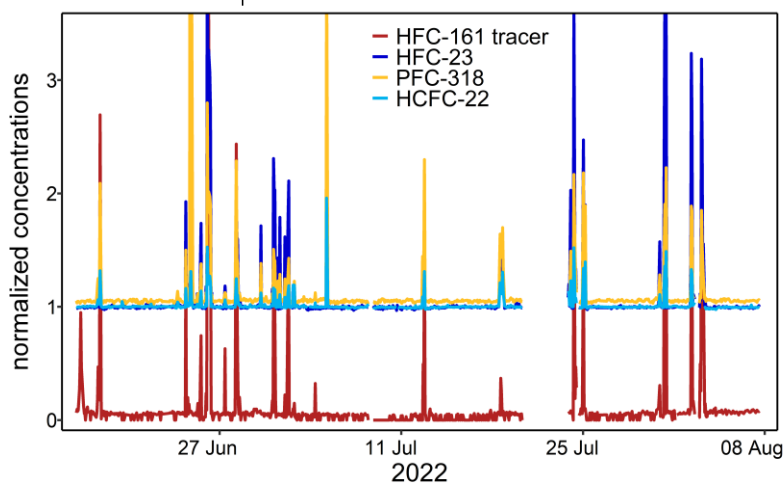
bekend is, kan door gebruik te maken van gelijke verhoudingen de emissiesterkte van het onderzochte gas uit de gemeten concentratie teruggerekend worden. Deze techniek is in 2022 ook voor de metingen aan halocarbons vanuit een bedrijf in Dordrecht gebruikt.

Het chemisch transport van het tracergas, en daarmee het gas zelf, moet wel vergelijkbaar zijn met dat van het onderzochte gas. In het geval van halocarbons is daarom een vergunning nodig om een tracer release te kunnen doen. Het verkrijgen van de vergunning was niet eenvoudig en is een tijdrovend proces geweest. De vergunning is door DCMR aan TNO verleend onder de vigerende vergunning van het bedrijf in Dordrecht, zodat de proefnemingen hebben kunnen plaatsvinden.



Figuur 21: Tracer release van HFC-161, gestart met EMPA team in Dordrecht. Aantonen van pieken op de Medusa op Cabauw. Bij release op Cabauw parkeerterrein waren de pieken goed te zien op de Medusa.

Van 16 juni tot 8 augustus en in november zijn proefnemingen met een tracergas gedaan parallel aan de continue metingen met de Medusa. Ook zijn er flessensamples genomen en geanalyseerd van 207 m hoogte van de Cabauw meetmast. Voor de proefnemingen is HFC-161 gebruikt en losgelaten vanaf de bronlocatie in Dordrecht (Figuur 21). De eerste resultaten zijn gegeven in Figuur 22. Er zijn pieken van drie verschillende typen halocarbons duidelijk gedetecteerd op Cabauw (over een afstand van 27 km). EMPA heeft de leiding in de verdere uitwerking van de resultaten en publicaties van het onderzoek.



Figuur 22: Voorlopige resultaten van het tracer release experiment in Dordrecht.

Het onderzoek naar de indirecte broeikasgassen koolmonoxide (CO) en waterstof (H₂), heeft in 2022 wat minder aandacht gekregen, mede door het werk aan de halocarbons.

Voor metingen van lage concentraties van waterstof is het nog lastig om de juiste instrumenten te vinden binnen een betaalbare range. TNO is in gesprek met Aerodyne over een instrument om H₂ zowel mobiel als op Cabauw te kunnen meten, naar verwachting kan deze halverwege 2023 worden aangeschaft. Aangezien het belangrijk is om het meten van H₂ in de atmosfeer zo snel mogelijk te starten, is het plan om in 2023 een gaschromatograaf (GC) aan te schaffen, zodat we zo snel mogelijk op Cabauw H₂ kunnen gaan meten. Een GC is nauwkeurig, maar niet zo snel, waardoor mobiel meten van H₂ hiermee nog niet mogelijk is.

2.2 Conclusies Milieuonderzoek Klimaat 2022

Dit jaar is de kennis en infrastructuur van de Nederlandse broeikasgasemissies verder versterkt en omgezet in relevante informatie die voor het Nederlandse beleid op dit gebied ingezet kan worden.

Er is hard gewerkt aan de verdere ontwikkeling van het instrumentarium, met name op Cabauw. De Cabauw toren heeft diverse upgrades gehad is bijna gereed voor de upgrade naar klasse 1 binnen ICOS. CH₄ data van Cabauw zijn gebruikt voor de validatie van de TOPAS tool voor CH₄. TNO heeft in 2022 ook bijgedragen aan het herstel van de relatie met het ICOS consortium, waarbinnen TNO nu namens Nederland ook een aantal extra taken op zich neemt.

De grootste meetcampagne van 2022 was de Ruisdaelcampagne in Rotterdam in september. Hier zijn niet alleen mobiele metingen van broeikasgassen gedaan, maar ook de luchtkwaliteitscomponenten zijn hierin meegenomen. Naast mobiele metingen met de meetwagen en stationaire metingen zijn er ook metingen gedaan op de fiets en met vliegtuigjes. De campagne heeft een grote variatie aan meetgegevens van verschillende broeikasgas- en luchtkwaliteitscomponenten opgeleverd die met verschillende partners van het Ruisdael consortium verder worden uitgewerkt.

Ook is er verder gewerkt aan de fingerprinting techniek. De software om pluimen van verschillende componenten van een bepaalde bron te analyseren is sterk verbeterd en typische fingerprints van verschillende bronnen zijn in kaart gebracht, waaronder RWZI's, stortplaatsen en boerderijen. In 2022 is extra aandacht besteed aan de detectie van gaslekken.

Wat betreft het combineren van verschillende databronnen is gekeken naar de kolomconcentratie metingen die gedaan zijn bij de Ruisdaelcampagnes rond Utrecht (2021) en Rotterdam (2022). Bij de campagne in 2021 zijn kolomconcentratie metingen (XH₂O, XO₂, XCO₂, XCH₄ en XCO) gedaan door de VU vanuit de semi-mobiele trailer van TNO. De data zijn vergeleken met CAMS data, waarbij wat verschillen zichtbaar waren op kleinere schaal (10-20 km). De data zullen ook worden vergeleken met de vliegtuigmetingen van de WUR binnen dezelfde campagne. De resultaten zullen in detail door een AIO van de VU, in samenwerking met het TNO team, worden uitgewerkt in een wetenschappelijke publicatie. Bij de Ruisdaelcampagne in 2022 zijn ook kolomconcentratie metingen op drie locaties boven- en benedenwinds van Rotterdam uitgevoerd. Voor XCO₂ zijn hierbij voor bepaalde windrichtingen verschillen in de orde van 1-2 ppm gezien voor verschillende locaties. Deze metingen zullen in 2023 verder worden uitgewerkt.

Voor de kennisopbouw over diffuse bronnen van N₂O en CH₄ zijn er metingen uitgevoerd aan stortplaatsen en veenweidegebieden. Bij de stortplaatsen was het hoofddoel om de gerapporteerde emissies te kunnen verifiëren, maar ook om de stortgasmodellen te kunnen toetsen aan metingen. Sommige stortgaspluimen zijn goed te benaderen met een model, maar ook complexere pluimen zijn waargenomen, waarvoor verdere interpretatie nodig is.

In 2022 heeft TNO de Eddy Covariance techniek ook ingezet voor het meten van N₂O fluxen uit veenweidegebieden, met als doel een koppeling te vinden tussen gegevens over

bodemdaling en de gemeten waarden van N_2O uitgassing. Deze metingen lopen nog door in 2023.

Er zijn in 2022 ook uitgebreide metingen gedaan van gehalogeneerde koolwaterstoffen (halocarbons) op Cabauw, die zowel voor de gezondheid relevant zijn als voor het broeikas-effect (op de 4^{de} plaats van broeikas-actieve stoffen). Extra (continue) metingen met de Medusa van EMPA uit Zurich zijn in augustus gestopt, maar de flessensamples met bijbehorende analyse door de Universiteit van Bristol lopen de komende jaren door.

In 2022 is een halocarbon tracer release experiment uitgevoerd met hulp van het Zwitserse instituut EMPA. Hierbij is bij de juiste windrichting een tracer losgelaten bij een bedrijf in Dordrecht, waarna concentraties van zowel de tracers als van andere halocarbons zijn gemeten op Cabauw. Hierbij zijn pieken van drie verschillende typen halocarbons duidelijk gedetecteerd (over een afstand van 27 km).

Ook de interesse in waterstof als indirect broeikasgas neemt toe. In 2023 zal, indien mogelijk, een waterstof meetinstrument geïnstalleerd worden op Cabauw.

Dit rapport geeft ook een kort overzicht van de belangrijkste resultaten uit aanpalende projecten gericht op agrarische emissies en olie & gas, waarvoor de basis methodeontwikkelingen in dit programma ook worden ingezet.

- De methode die is ontwikkeld voor het meten van veenweidegebieden is ook ingezet voor het meten van de effecten van landbewerkingsmethoden op N_2O emissies. Gelijktijdig zijn CO_2 - en N_2O -ecosysteemuitwisselingsmetingen gedaan op drie percelen, één referentiegraslandperceel dat “zoals gebruikelijk” werd beheerd en twee percelen die werden omgeploegd waarna gras en zomertarwe werden ingezaaid. Uit deze gegevens werd de gasuitwisselingen (flux) van deze ecosystemen berekend.
- De verzamelde gegevens van de ROMEO campagne in Roemenië zijn gebruikt voor verbetering van de CH_4 en C_2H_6 inventarisaties en verschillende wetenschappelijke publicaties. Op basis van het werk in dit programma kon TNO ook in 2022 ook een adviseursrol aannemen bij een inventarisatie van methodologieën voor de kwantificering van methaanemissies. TNO zal deze rol naar verwachting de komende jaren voortzetten.
- TNO EMSA is door TNO AGE gevraagd om metingen uit te voeren bij een campagne voor het meten van methaan uit oude boorputten op de Noordzeebodem. Deze campagne is uitgevoerd in juni 2022 in opdracht van SodM en in samenwerking met het NIOZ. Het is hierbij gelukt om methaan zowel opgelost als via ebullitie (gasbelletjes) te meten met een mobiele opzet aan boord van de Pelagia van NIOZ, waarmee in juni een campagne van enkele weken is uitgevoerd.

3 Luchtkwaliteit – IenW

In dit onderdeel van het programma is ingezet op een aantal speerpunten die vooral gericht zijn op het ontwikkelen van kennis en methodieken voor de invulling van het thema Luchtkwaliteit in relatie tot gezondheid.

Het doel van deelprogramma LKW-1 is om IenW te ondersteunen met ad-hoc onderzoeksvragen. Ieder jaar zijn er bepaalde actuele vraagstukken op het gebied van luchtkwaliteit waarbij snel ondersteuning nodig is. Voor TNO heeft dit als voordeel om te innoveren op maatschappelijk relevante onderwerpen. In 2022 is de inbreng van TNO bij de opkomende discussie over meestoken van waterstof bij aardgasverbranding en het effect hiervan op emissies een belangrijk onderwerp voor beleidsondersteuning.

Het sensorontwikkelingsprogramma binnen TNO (LKW-2) is gericht op het toekomstbestendig maken van de Nederlandse meetinfrastructuur. De ontwikkeling van betaalbare sensoren van hoge kwaliteit voor monitoring van luchtkwaliteit is een zeer belangrijke pijler binnen dit deel van het programma (LKW-2a). Het betreft de ontwikkeling en toepassing van sensoren voor een variatie aan luchtverontreinigende componenten, waarbij vaak bestaande technieken slim gemodificeerd worden. Op deze manier kan de meetkwaliteit sterk verbeterd worden, zonder dat de kosten sterk toenemen. Ook is het belangrijk dat nieuw ontwikkelde sensoren goed aansluiten bij de eigenschappen van zowel de verontreinigende component als van de bron. Het is maatwerk. Daarnaast is er extra aandacht voor NH₃ sensoren. In LKW-2b wordt aandacht besteed aan het chemisch specifiek meten van fijnstof. Verdere ontwikkeling van de ACSM¹⁰ en de MARGA¹¹ instrumenten zijn hierbij de speerpunten. Onze deelname aan NEN en CEN-normcommissies voor standaardisatie van metingen aan stoffen en deeltjes valt in deelprogramma LKW-2c.

Mobiele en stationaire 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 voor emissies van verschillende antropogene bronnen. Voor 2022 heeft LKW-3a minder aandacht gehad. De onderwerpen scheepvaart, luchtvaart en agrarische emissies (LKW-3b, LKW-3c en LKW-3d) vielen samen met andere opdrachten binnen de afdeling, waardoor hier de focus op lag. LKW-3e is gecombineerd met LKW-2 en de Ruisdaelcampagnes.

Het budget van dit deelprogramma is zelden toereikend om uitgebreide ontwikkeling te doen op alle vijf de deelonderwerpen. Daarom is gekozen om voor enkele onderwerpen de resultaten te delen die mede door ontwikkelingen in dit project in andere opdrachten zijn behaald. Het gaat hierbij alleen om publiekelijk beschikbare resultaten (EU-projecten, overheidsopdrachten).

Deelprogramma LKW-4 beslaat het budget dat gereserveerd is voor de cofinanciering van het Ruisdaelprogramma, met in 2022 een meetcampagne die in de regio Rotterdam heeft plaatsgevonden.

LKW-5 gaat over het in overleg met het ministerie gekozen focusonderwerp. Het focusonderwerp 2022 was opnieuw houtstook, vanwege het aanvullende werk voor de Samenwerking Houtrookonderzoek. Daarnaast is er ook aandacht geweest voor Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS).

¹⁰ Aerosol Chemical Speciation Monitor

¹¹ Monitor of AeRosols and Gases in ambient Air, Metrohm

3.1 Resultaten deelonderzoeksprogramma's Luchtkwaliteit

3.1.1 LKW-1 Beleidsondersteuning

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

Activiteiten en resultaten in 2022: studie waterstofverbranding en routewijzer houtstook

In 2022 is er binnen dit deelprogramma gewerkt aan een rapport¹² over het meestoken van waterstof (H₂) bij aardgasverbranding en het effect hiervan op emissies. De vraag richt zich hierbij op de NO_x-emissies bij het verwarmen van lucht tot hoge temperaturen, wat gebeurt bij kleine en middelgrote stookinstallaties die worden bedreven op aardgas, verrijkt met een bepaald percentage waterstof. Een bijkomende vraag is of en welke (technische) aanpassingen mogelijk of noodzakelijk zijn aan verschillende soorten stookinstallaties om eventuele emissie-effecten te reduceren. De resultaten van deze studie zijn hieronder kort samengevat.

Studie waterstofverbranding en stikstofemissies

De verwachting is dat er door de noodzakelijke verduurzaming van de energievoorziening de komende jaren steeds meer waterstof gebruikt gaat worden. Voorkomen moet worden dat het gebruik van duurzaam waterstof als brandstof ten koste gaat van de reductie van NO_x-emissies. Waterstof heeft een grotere vlamsnelheid dan aardgas. Ook heeft het bij verbranding per eenheid van energie minder zuurstof nodig. Als hier geen maatregelen voor genomen worden, leidt dit tot hogere vlamtemperaturen en daarmee ook tot hogere NO_x-emissies dan bij aardgasverbranding.

Er is onderzocht wat de stand van zaken is bij waterstofverbranding in diverse type installaties en bij verschillende fabrikanten. Hierbij is allereerst naar Europese en Nederlandse wetgeving gekeken. Er zijn vaak al normen voor andere gassen dan aardgas, er zijn echter geen specifieke normen voor waterstof of voor mengsels van aardgas met een hoog percentage waterstof. En omdat waterstof een kleiner (droog) rookgasvolume heeft per eenheid van energie dan aardgas, pakt eenzelfde eis in mg/Nm³ voor waterstof eigenlijk strenger uit. Meer duidelijkheid in wetgeving is gewenst. Desalniettemin is de algemene conclusie dat het goed mogelijk is om bij (mee)verbranding van waterstof tot vergelijkbare NO_x-emissies als met aardgasverbranding te komen.

Algemene inzichten uit de studie

- Als men de waterstofverbranding goed in de hand heeft, zijn vergelijkbare emissie reductietechnieken toepasbaar als bij aardgas.
- In Europa worden op diverse plekken stappen gezet om 20% waterstof (~8% op energiebasis) in het aardgasnet mogelijk te maken. Dit lijkt bij veel installaties, na testen, niet tot problemen te leiden.
- De verwachting is dat er ruim voor 2030 voor de meeste installaties (retrofit) oplossingen beschikbaar zijn om naar waterstof over te schakelen. Er wordt ook gesproken over nieuwe waterstof ready apparaten, die te zijner tijd eenvoudig zijn om te bouwen.

¹² TNO-rapport R10343 Waterstofverbranding en stikstofemissies (in concept 2023)

- Fabrikanten verwachten niet dat 100% waterstof continue beschikbaar zal zijn. Daarom richt men zich op systemen die zowel 100% aardgas, 100% waterstof alsook mengsels goed kunnen verbranden. Goede verbranding en lage NO_x-emissies over deze hele range, maakt het realiseren van lage NO_x-emissies extra complex.
- De overgang van aardgas naar waterstof zal met de nodige kosten gepaard gaan. Het gelijktijdig realiseren van lage NO_x-emissies, zal hierin maar een beperkte kostenpost zijn.
- Tenslotte kan ook nagedacht worden over emissie-eisen als geïmporteerd waterstof, in de vorm van ammoniak, direct als brandstof ingezet zou gaan worden. Het voldoen aan emissie-eisen vergt dan een veel stringenter reductie-aanpak.

Conclusies per type installatie

- Bij **CV-ketels < 400 kW** op waterstof worden NO_x-emissieniveaus gerapporteerd die op minder dan de helft van Europese Ecodesign richtlijn liggen. Dit is niet zo verwonderlijk als bedacht wordt dat veel Nederlandse CV-ketels op aardgas ook al een veel lagere emissie hebben. De mogelijkheden voor Nederland om eigen (strenger) beleid te voeren bij installaties die onder de Ecodesign richtlijn vallen zijn overigens beperkt.
- Voor **branders in ketels, fornuizen en overige installaties** wordt gesteld dat als met het verbrandingsproces eenmaal goed beheerst, met aardgas vergelijkbare reductiemaatregelen toegepast kunnen worden. De Europese BREF-LCP noemt bij aardgas voor de beste beschikbare technieken een niveau van 30-70 mg/Nm³ NO_x-emissies bij 3% O₂. De 30 mg/Nm³ is ook bij 100% waterstof haalbaar. Een gangbare techniek om nog meer NO_x te reduceren is de vlamtemperatuur te beperken door rookgasrecirculatie (RGR). Waar dit problematisch is, kan altijd nog actieve NO_x-reductie met SCR of SNCR worden toegepast.
- Fabrikanten van **gasturbines** zijn druk bezig om gasturbines te kunnen garanderen voor 20% waterstof en werken ook aan turbines voor 100% waterstof. Men richt zich hier vaak op ruimere NO_x-eisen dan in Nederland gebruikelijk zijn. Dit betekent dat in Nederland wellicht SCR moet worden toegepast. Dit wordt ook genoemd voor gasturbines die flexibel moeten kunnen wisselen tussen 100% aardgas, aardgas-waterstof mengsels en 100% waterstof. Omdat er regio's zijn waar eisen beneden de 10 ppm (20,5 mg NO_x/Nm³ bij 15% O₂) liggen, worden er ook branders voor 100% waterstof ontwikkeld die zich hierop richten. Deze hebben dan een veel lagere emissie dan de 35 mg/Nm³ bij 15% O₂ in het rookgas uit het Nederlandse activiteitenbesluit.
- Bij **gasmotoren op waterstof** richt men zich op het voldoen aan de Duitse eisen van, omgerekend, 186 mg/Nm³ bij 15% O₂. Er zijn echter motoren die richting de helft hiervan gaan. Nederland heeft voor aardgas een eis van 95 mg/Nm³ voor motoren kleiner dan 2,5 MWth (waar dus al aan voldaan kan worden) en 35 mg/Nm³ voor installaties ≥2,5 MWth. Om aan deze laatste eis te voldoen wordt bij aardgas meestal SCR toegepast. Bijzonder is dat bij waterstof naar een veel grotere luchtvermaat gegaan kan worden, waardoor 35 mg/Nm³ bij 15% O₂ wellicht haalbaar is zonder SCR.
- **Brandstofcellen op waterstof** hebben zelf geen NO_x-emissie, maar er kan wel emissie ontstaan als een rest waterstof om technische redenen verbrand moet worden. Dan moet onnodige NO_x-emissie vermeden worden.

Bijdrage aan Routewijzer Houtstook & Overlast

TNO heeft in de eerste helft van 2022 actief in een aantal sessies deelgenomen en meegeschreven aan de Routewijzer Houtstook & Overlast. Het doel van deze Routewijzer (zie de kamerbrief¹³) was om een handreiking op te stellen met praktisch toepasbare tips en opties om handhaving bij overlast in de praktijk vorm te kunnen geven. Hierbij is gekeken naar zowel de huidige juridische mogelijkheden als de mogelijkheden onder de omgevingswet.

¹³ [Kamerbrief over ontwikkelingen houtrookemissies | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl](#)

Het resultaat van deze sessies¹⁴ was een Routewijzer als hulpmiddel, met handvatten voor beleidsmedewerkers en toezichthouders bij gemeenten en omgevingsdiensten voor de aanpak van uitstoot of overlast van houtstook op particulieren. Hierbij is zowel gekeken naar de directe overlast als naar het verbeteren van de luchtkwaliteit in een gemeente in het algemeen, afhankelijk van het ambitieniveau van een gemeente op lange en/of korte termijn.

3.1.2 LKW-2 Kennis- en sensorontwikkeling

De ontwikkeling van betaalbare sensoren van hoge kwaliteit voor monitoring van luchtkwaliteit is een zeer belangrijke pijler binnen dit deel van het programma (LKW-2a). Het betreft de ontwikkeling en toepassing van sensoren voor een variatie aan luchtverontreinigende componenten, waarbij vaak bestaande technieken slim gemodificeerd worden. In 2022 was met name werk aan de NH₃ sensoren en de roetsensor gepland. Uiteindelijk kon een deel van het werk aan de NH₃ sensoren opgevangen worden binnen een ander project, waardoor er nog budgettaire ruimte beschikbaar was om ook in 2022 nog aandacht te besteden aan de NO₂ sensoren in het sensornetwerk in Eindhoven.

In LKW-2b wordt aandacht besteedt aan de chemische specificatie van fijnstof. Voor de gezondheid is de chemische samenstelling van een stofdeeltje mogelijk nog belangrijker dan de maat. Het verschil in deeltjesgrootte bepalen tussen verschillende (fracties van) emissies is al niet eenvoudig, maar het real-time bepalen van de chemische samenstelling van die deeltjes is echt heel lastig. Het kennen van de chemische samenstelling van deeltjes in de atmosfeer kan echter van cruciaal belang zijn om te duiden waar de deeltjes vandaan komen, om overzicht te krijgen welke bronnen in welke mate bijdragen aan de totale concentratie van deeltjes in de lucht en om in te schatten wat de gevolgen van de gemeten fijnstofemissies voor de gezondheid zullen zijn.

Ook de deelname van TNO aan NEN en CEN-normcommissies voor standaardisatie van metingen aan stoffen en deeltjes valt in dit deelprogramma (LKW-2c).

Activiteiten en resultaten in 2022

LKW-2a De ontwikkeling van sensorsystemen ter verbetering van stedelijke luchtkwaliteit

NO₂ sensoren in de sensornetwerken

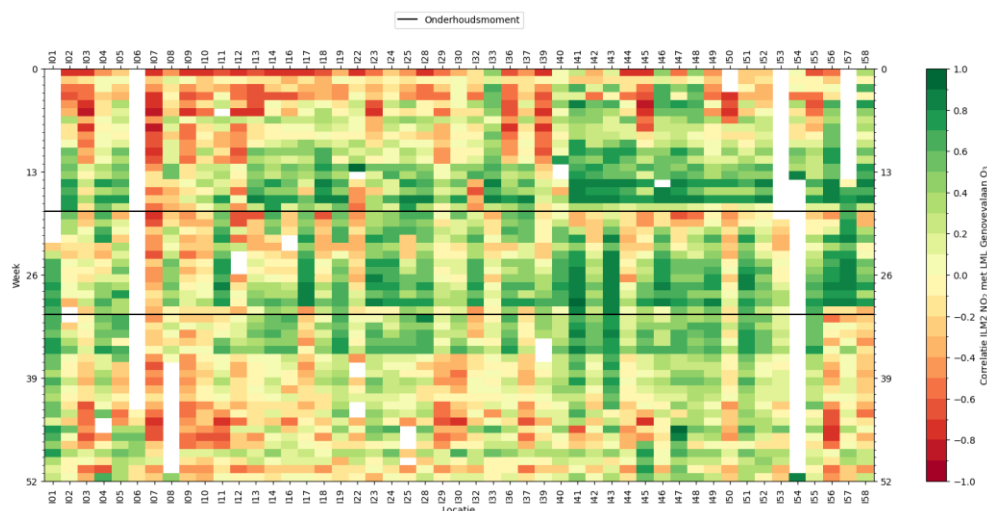
Om te komen tot goede metingen van stedelijke luchtkwaliteit, heeft TNO, samen met andere partijen in het AiREAS collectief, een innovatief luchtmeetnet opgezet¹⁵. Dit luchtmeetnet wordt veel gebruikt in diverse studies om luchtkwaliteit te onderzoeken. In dit meetnetwerk wordt de NO₂-concentratie gemeten met behulp van elektrochemische sensoren. Deze sensoren hebben als voordeel dat ze relatief goedkoop zijn en daardoor erg geschikt zijn voor gebruik in meetnetwerken. Het nadeel is dat ze onder sommige omstandigheden minder betrouwbaar zijn. In 2022 zijn er twee onderzoeken uitgevoerd naar de NO₂ sensoren.

In 2022 is onderzocht hoe de meting van NO₂ verbeterd kan worden in de bestaande meetopstelling. Eind 2022 is een masterstudent van de Universiteit van Amsterdam begonnen met een literatuurstudie om mogelijke oorzaken voor de lagere betrouwbaarheid van de sensoren te vinden. Hierbij zal ook gezocht worden naar mogelijke bestaande oplossingen om de betrouwbaarheid te verhogen. Het resultaat van dit onderzoek wordt in 2023 verwacht.

Los van dit onderzoek is er ook een nieuwe, verbeterde elektrochemische sensor op de markt gebracht door Honeywell. Deze sensor (AQ7ND) zou uitgerust zijn met een ozonfilter, wat de betrouwbaarheid van de metingen ten goede zou moeten komen.

¹⁴ [Routewijzer houtstook en overlast - Schone lucht akkoord](#)

¹⁵ [AiREAS: Sustainability for a Healthy City - NCBI Bookshelf \(nih.gov\)](#)



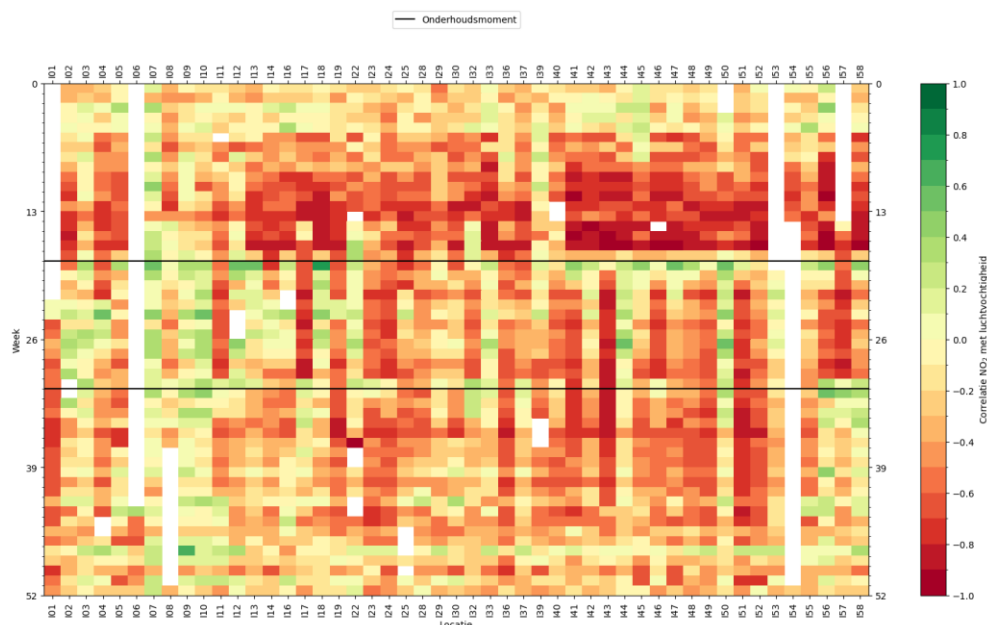
Figuur 23: Correlatie tussen de gemeten NO_2 -concentratie en de aanwezige ozon, zoals gemeten door het LML op de Genovevalaan in Eindhoven. Op de x-as zijn alle locaties in het meetnetwerk weergegeven, en op de y-as de week in 2022. Een groene kleur geeft aan dat er een grote positieve correlatie is tussen ozon en NO_2 . Een rode kleur geeft een grote negatieve correlatie aan. Kleine correlaties zijn geel aangegeven. Onderhoudsmomenten zijn met een zwarte lijn aangegeven.

Naast de literatuurstudie is er onderzoek verricht naar hoe de kwaliteitscontrole van de elektrochemische sensoren het beste gedaan kan worden. In een data-gedreven onderzoek is er gezocht naar factoren die de verschillen tussen de gemeten concentraties in het LML en het meetnetwerk kunnen verklaren. Er zijn hierbij twee factoren gevonden: (1) de aanwezigheid van ozon en (2) de relatieve luchtvochtigheid. De effecten van beide factoren worden hieronder nader toegelicht.

Het was al bekend dat de NO_2 sensoren gevoelig zijn voor ozon.¹⁶ Wanneer de correlatie tussen ozon en de gemeten NO_2 -concentratie te hoog is, worden de meetwaarden afgekeurd. Normaal gesproken is er een negatieve correlatie tussen NO_2 en de in het LML gemeten ozon concentratie. Ozon zorgt er namelijk voor dat NO_2 kan worden afgebroken. Maar ozon kan ook de elektrochemische sensor aantasten, waardoor er een positieve correlatie ontstaat. Deze kennis wordt dus in de kwaliteitscontrole van de sensoren gebruikt. De correlatie vermindert na het uitvoeren van onderhoud (Figuur 23).

De relatieve luchtvochtigheid beïnvloedt de kwaliteit van de metingen ook (Figuur 24). Er wordt vermoed dat de elektrochemische sensoren kunnen uitdrogen, waardoor de elektrolyt in de sensoren niet goed werkzaam meer is. Wanneer dit gebeurt, is de sensor vooral de relatieve luchtvochtigheid aan het meten. De meetwaarden worden afgekeurd wanneer de correlatie tussen de relatieve luchtvochtigheid en de NO_2 -concentratie te veel negatief wordt. In Figuur 24 zien we dat de duidelijk aanwezige negatieve correlatie vaak verdwijnt na een onderhoudsmoment.

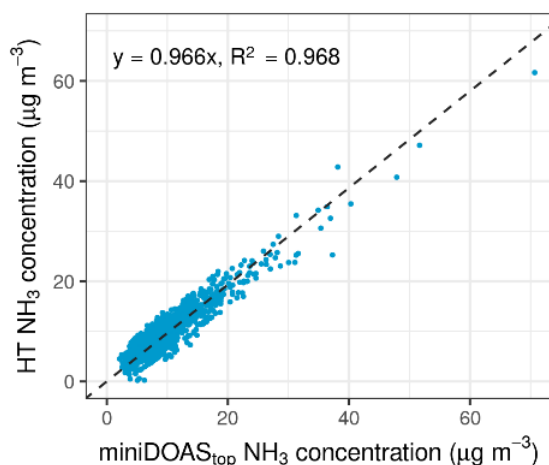
¹⁶ [Sensoren voor \$\text{NO}_2\$ | Samen meten aan luchtkwaliteit](#)



Figuur 24: Correlatie tussen de gemeten NO₂-concentratie en de luchtvochtigheid. Op de x-as zijn alle locaties in het meetnetwerk weergegeven, en op de y-as de week in 2022. Een groene kleur geeft aan dat er een grote positieve correlatie is tussen luchtvochtigheid en NO₂. Een rode kleur geeft een grote negatieve correlatie aan. Kleine correlaties zijn geel aangegeven. Onderhoudsmomenten zijn met een zwarte lijn aangegeven.

Een nieuw instrument voor depositiemetingen van ammoniak

Een nieuw, snel, compact en draagbaar instrument is in 2022 met succes getest voor het meten van bijna-realtime NH₃ droge depositiefluxen. Datasets van NH₃-fluxen zijn momenteel schaars en hebben over het algemeen op zijn best maandelijkse resolutie. Een belangrijke reden hiervoor is dat het meten van de NH₃-flux onder droge omstandigheden erg moeilijk is. Er is namelijk nog geen goede standaard referentie meettechniek voor deze metingen, wat het testen van nieuwe technieken compliceert.



Figuur 25 NH₃-concentraties gemeten met de mini-DOAS geplote tegen de (temperatuur gecorrigeerde) meetwaarden met het HT8700E instrument. De correlatielijijn gaat door de oorsprong.

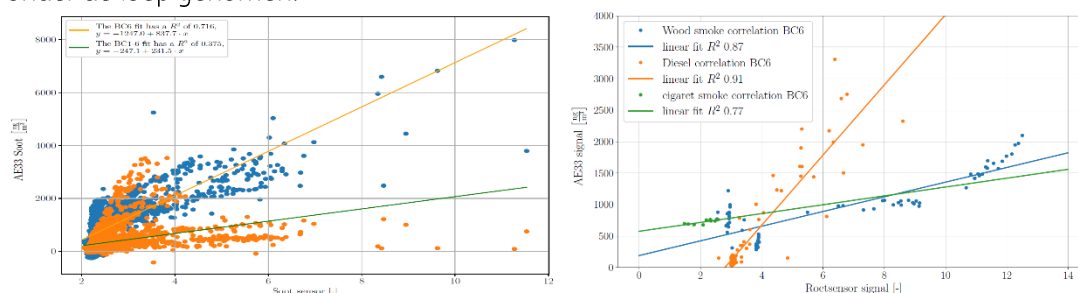
In 2021 werden twee optische "open-pad"-technieken naast elkaar vergeleken bij het Ruisdael Station in Cabauw: de Mini-DOAS 2.2D van het RIVM, waarbij de depositieflux werd bepaald met de gradiënttechniek, en de commerciële Healthy Photon HT8700E, waarbij de

depositieflux werd bepaald met behulp van de Eddy Covariantie-techniek. In 2022 werd de data o.a. binnen dit programma verder uitgewerkt. Met beide technieken kon met een voldoende hoge tijdsresolutie gemeten worden, en de resultaten waren zeer vergelijkbaar (zie Figuur 25). Wat kleine verschillen waren zichtbaar in de totale, cumulatieve flux (~10%) voor een homogeen terrein, vrij van nabijgelegen obstakels. Het flexibele, nieuwe instrument zal de bepaling van droge depositie van ammoniak in de toekomst sterk vergemakkelijken en de parametrisatie van het depositieproces in chemische transportmodellen verbeteren, wat cruciale kennis is om in het lopende stikstofdebat de koppeling te kunnen maken tussen stikstofemissies en de daadwerkelijke depositie in Natura 2000 gebieden. Dit werk is uitgevoerd in nauwe samenwerking met het RIVM en heeft geleid tot een peer-reviewed publicatie (Swart et al. 2022 ¹⁷).

Ontwikkeling van de roetsensor

In 2021 bleek de roetsensor van TNO goed geschikt voor het meten van houtrookemissies in wijken, vergelijkbaar met de resultaten van de veel duurdere aethalometer (AE33). De TNO roetsensor is een prototype dat is ontworpen als toekomstige uitbreiding van de CAIRebox. De CAIRebox is een door ECN ontworpen sensorbox voor het bemeten van luchtkwaliteit in stedelijke netwerken, waarmee NO₂, PM2.5 en PM10 continu gemeten worden. Meetnetwerken van meerdere CAIReboxen zijn o.a. te vinden in en rondom Eindhoven en rondom Tata Steel. In dit programma is verder gewerkt aan het testen en de ontwikkeling van de roetsensor, zodat deze in de toekomst ook daadwerkelijk ingezet kan worden. Een groot deel van dit werk is uitgevoerd door een afstudeerstudent van de Haagse Hogeschool.

De werking van de roetsensor is in dit onderzoek geëvalueerd aan de hand van zeven karakteristieke meetpieken uit de meetcampagne in Bergen (Samenwerkingsonderzoek Houtrook 2020-2021) en nieuwe metingen aan drie verschillende bronnen, met de AE33 als referentie. De emissiebronnen voor deze nieuwe metingen waren houtrook, sigarettenrook en de uitlaatgassen van een graafmachine (diesel). Ook is het technisch ontwerp van de sensor onder de loop genomen.



Figuur 26: Links: correlatie tussen de AE33 metingen (verticaal) en de roetsensor metingen (horizontaal) voor een specifieke meetpiek tijdens de houtrook meetcampagne in Bergen. In blauw de correlatie met kanaal 6 van de aethalometer en in oranje de correlatie met kanaal 1 – kanaal 6. Rechts: Correlatie tussen de AE33 en de roetsensor voor drie verschillende bronnen: houtrook (blauw), diesel (oranje) en sigarettenrook (groen).

Bij de evaluatie van de metingen bleek in alle gevallen de meetdata van de roetsensor zeer goed gecorreleerd met die van de AE33. Echter, bij enkele pieken konden duidelijk trends met verschillende hellingen in de correlatieplots geobserveerd worden (Figuur 26 links), mogelijk toe te wijzen aan verschillende aanwezige bronnen in deze periode. Dit beeld wordt bevestigd door de metingen aan drie verschillende bronnen: voor dieselloet is de helling veel steiler dan voor houtrook of sigarettenrook. De metingen met een steile helling kwamen echter veel minder frequent voor tijdens de Bergen campagne, waardoor de correlatie over de gehele

¹⁷ [AMT - Field comparison of two novel open-path instruments that measure dry deposition and emission of ammonia using flux-gradient and eddy covariance methods \(copernicus.org\)](https://www.copernicus.org/)

campagne (met houtstookroet), nog steeds heel goed was. Door onderscheid te maken tussen de verschillende bronnen, zou deze correlatie echter nog kunnen verbeteren.

Uit de review van het ontwerp kwamen vervolgens enkele kleine technische verbeteringen (bijv. het oplossen van enkele kleine luchtlekken) en zijn er wat verbeteringen aan de software doorgevoerd, waardoor de data nu real-time gelogd en geplot kan worden. De software verbetering was nodig om de sensor later bij inzet in het veld tegen de referentie te kunnen checken en kalibreren.

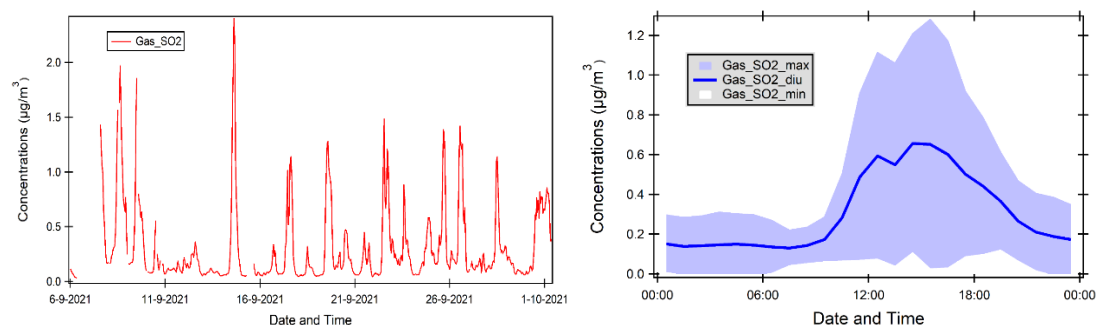
Vervolgens is er gewerkt aan een verbeterd ontwerp van het instrument en de bijbehorende software om in de toekomst beter onderscheid te kunnen maken tussen verschillende bronnen. In dit nieuwe ontwerp kan niet alleen het aantal deeltjes, maar ook een deeltjesgrootteverdeling bepaald worden op het tweede meetkanaal. De eerste tests van het extra kanaal zagen er veelbelovend uit, wel vereist het een nieuwe kalibratie van het geheel. In 2023 zal verder gewerkt worden aan het nieuwe tweede kanaal en aan het verkleinen van het instrument, zodat deze later beter in de CAIRebox ingebouwd kan worden.

LKW-2b: Chemisch specificatie van fijnstof

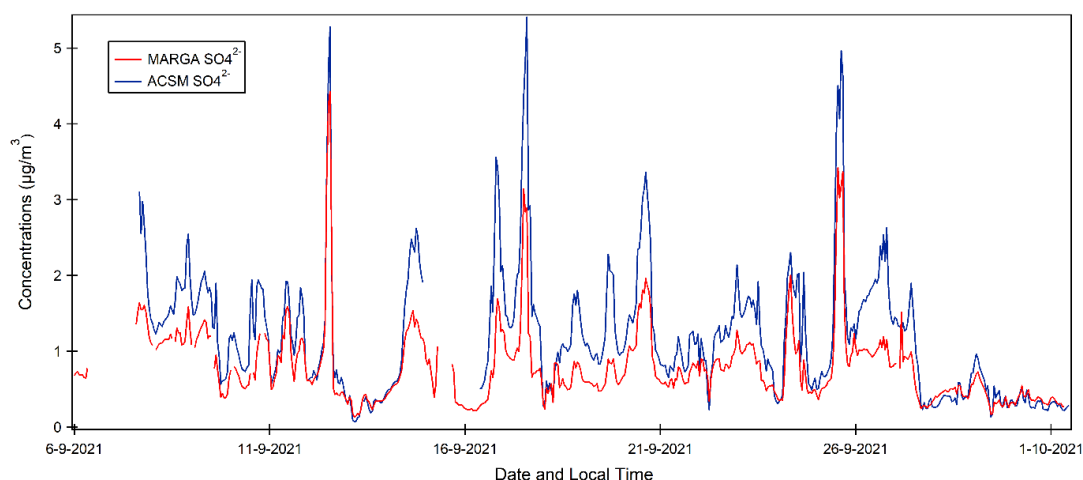
In LKW-2b is de correlatie tussen de chemisch specifieke aerosolmetingen van de ACSM en de MARGA onderling en met andere instrumenten nader bekeken. Hiervoor is gebruik gemaakt van data van de Ruisdaelmeetcampagnes van 2021 en 2022.

Tijdens de RITA Ruisdaelcampagne in september 2021 hebben de MARGA en de ACSM bij het Cabauw station parallel gemeten in de semi-mobiele trailer. De MARGA meet zowel gassen (HCl, HNO₃, HONO, SO₂, NH₃) als aerosolen (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Mg²⁺, K⁺, NH₄⁺, Na⁺, Ca₂⁺). De ACSM meet aerosolen (NO₃, SO₄, NH₄, Cl en de organische fractie).

Figuur 27 toont een voorbeeld van de tijdserie en het dagelijkse profiel van SO₂, gemeten met de MARGA bij deze campagne. Figuur 28 geeft een vergelijking voor SO₄²⁻ is tussen de MARGA en de ACSM. Een goede correlatie tussen de instrumenten is zichtbaar.

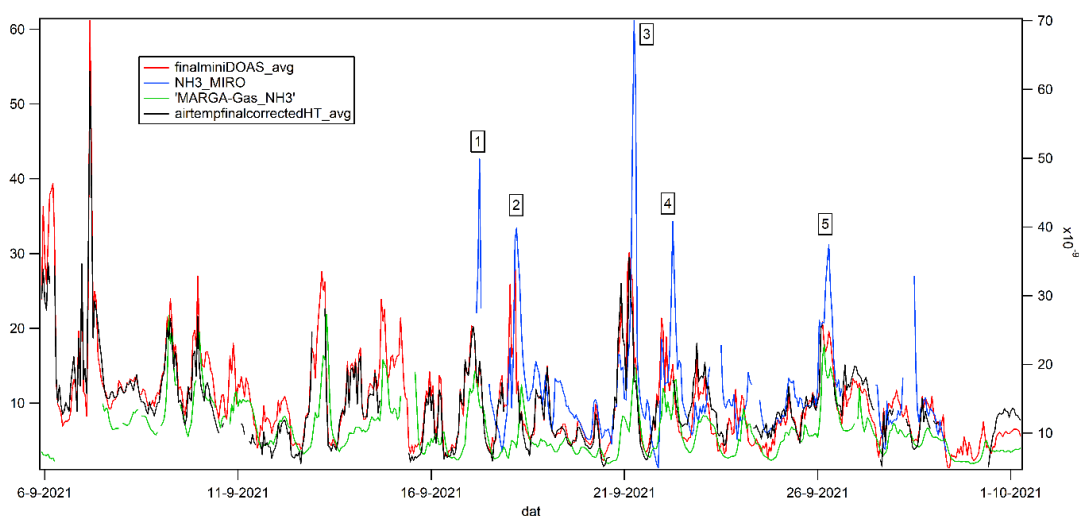


Figuur 27: Links: De tijdserie van SO₂ gemeten met de MARGA tijdens de RITA campagne op Cabauw. Rechts: Dagelijks profiel van SO₂ gemeten met de MARGA tijdens de RITA campagne op Cabauw.



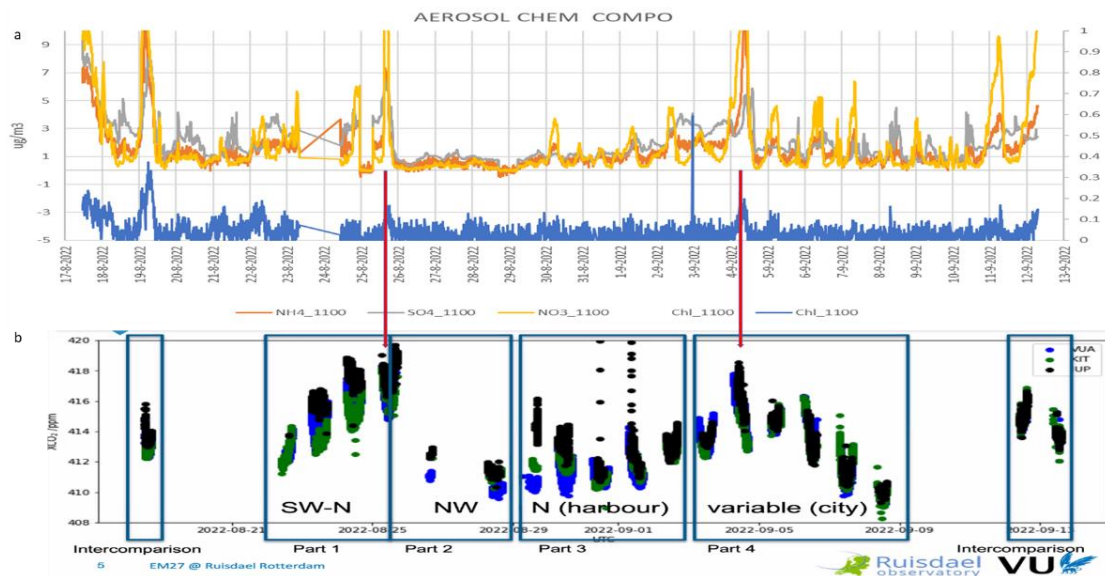
Figuur 28: Tijdsree van aerosol SO_4^{2-} metingen van de MARGA en de ACSM tijdens de RITA campagne bij het Cabauw station.

In dezelfde campagne zijn ook ammoniakmetingen uitgevoerd met de spectrometer van Miro, de HT8700E en twee mini-DOAS instrumenten bij het Cabauw station (zie LKW-2a: NH_3 sensoren). Deze metingen zijn nu ook vergeleken met de ammoniakmetingen van de MARGA (Figuur 29). Hieruit blijkt dat de MARGA ook goed bruikbaar is voor metingen van ammoniak, wat handig kan zijn bij de inzet van dit instrument in de toekomst. De tijdsresoluties van deze vier instrumenten zijn echter niet vergelijkbaar en om meer inzicht te krijgen in de waarde van deze vergelijking, zullen de vijf genummerde pieken in Figuur 29 in meer detail uitgewerkt worden.



Figuur 29: Tijdsree van de NH_3 metingen van de MARGA, MIRO, mini-DOAS en HT tijdens de RITA campagne op Cabauw.

Tijdens de Ruisdaelcampagne 2022 in Rotterdam heeft de ACSM in de semi-mobiele trailer vlakbij de Van Brienenoordbrug gestaan. De eerste resultaten van de ACSM (aerosol NH_4 , SO_4 , NO_3 en Cl) zijn weergegeven in Figuur 30a. De resultaten zijn vergeleken met de CO_2 total column resultaten van de FTIRs gemeten door de VU Amsterdam, zoals weergegeven in Figuur 8 uit 2.1.3. De pieken van de ACSM zijn ook de zien voor CO_2 (Figuur 30 a en b). De volgende stap is om verder in de data te verdiepen om meer duidelijkheid te krijgen over de mogelijke bronnen, die hieraan hebben bijgedragen.



Figuur 30: a) ACSM resultaten van NH_4 , SO_4 , NO_3 en Cl . b) FTIR resultaten van XCO_2 . De rode pijlen laten zien dat de pieken van de ACSM en de FTIR overeen komen.

LKW-2c CEN/NEN deelname

Binnen de NEN is TNO EMSA Petten betrokken bij werkgroep 390050, de normcommissie werkplek- en buitenluchtmetingen, specifiek daarbinnen in de expertgroep 2, 4 en 5. Dit zijn respectievelijk de expertgroepen metingen van deeltjes, metingen van anorganische stoffen en metingen van organische stoffen. CEN/NEN documenten met betrekking tot deze onderwerpen komen in deze expertgroepen langs ter stemming. Namens werkgroep 390050 heeft TNO EMSA Petten zitting in CEN/TC WG42 Air quality sensors.

Een draftversie van een technische specificatie voor PM sensoren is inmiddels in de maak. In 2023, zal deze naar verwachting, ter stemming worden aangeboden. Aangezien gebruik van sensoren een vrij brede interesse binnen de EU geniet zijn er veel partijen betrokken in de discussie. Dit maakt de discussie tijdrovend. Namens Nederland zijn naast TNO, RIVM en VSL betrokken bij CEN-werkgroep 42.

3.1.3 LKW-3 Emissies van antropogene bronnen

Mobiele en stationaire meetcampagnes voor metingen met (nieuwe) hoogwaardige en low-cost instrumenten zijn van groot belang voor de kennisontwikkeling en beleidsondersteuning bij actuele luchtkwaliteitsvraagstukken. Door expertise te behouden en te vergaren van de toepassing van zowel hoogwaardige als low-cost meetoplossingen, is de monitoring van de lokale luchtkwaliteit betrouwbaarder en toekomstbestendiger en is het mogelijk gedegen adviezen hierop te baseren. In dit deelprogramma wordt daarom aandacht besteed aan meetcampagnes gericht op de emissies van verschillende, specifieke antropogene bronnen.

De onderwerpen scheepvaart, luchtvaart, agrarische emissies en ultrafijnstof zijn veel aan bod geweest in aanpalende projecten en programma's. De inzet van apparatuur voor het bemeten van deze bronnen is alleen mogelijk door de ontwikkeling van meetmethodieken voor deze specifieke toepassingen en kalibraties van de instrumenten die binnen het milieuonderzoeksprogramma worden gedaan.

Daarbij lenen de aanpalende projecten zich vaak niet goed voor uitgebreide analyses om kennis of de meettechnologie verder te ontwikkelen. De financiering in dit deelprogramma wordt dan ingezet om op basis van de vergaarde gegevens de algemene kennis en expertise op het gebied van luchtkwaliteit en metingen verder te brengen. Hierdoor kunnen we steeds

beter meten, blijven state-of-the-art meetcampagnes ook in de toekomst mogelijk en wordt er efficiënt met de middelen omgegaan. Waar sprake is van data die is vergaard in aanpalende projecten, zal dit in onderstaande activiteitenbeschrijvingen expliciet aangegeven worden.

Ook worden de luchtkwaliteit gerelateerde metingen binnen de Ruisdaelcampagnes, met betrekking tot specifieke bronnen, gedragen door dit deelprogramma.

Activiteiten en resultaten in 2022

LKW-3a Emissies uit verkeer

In 2022 is binnen dit deelprogramma aandacht besteed aan het onderscheid tussen UFP-emissies uit verkeer en uit luchtvaart. Zie voor meer detail LKW-3^e Herkomst en verspreiding van (ultra-)fijnstof.

LKW-3b Emissies uit scheepvaart

Het onderzoek aan scheepvaartemissies werd in 2022 grotendeels gedragen door andere projecten. De bijdragen aan deze projecten was mogelijk door de kennis en infrastructuur uit de milieusubsidie. Hieronder volgt een kort overzicht van de resultaten binnen de projecten SCIPPER¹⁸ en ILT¹⁹. Bij SCIPPER ligt de focus op zeevaart. Voor ILT monitorde TNO-EMSA de zwavelgehalten van zeevaartschepen die de haven bij Rotterdam in- en uitvoeren in 2021.

Voor Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) zijn metingen verricht aan zeescheepvaart in Rotterdam. Dit zijn doorlopende metingen aan wal, waarbij concentraties van zwaveldioxide (SO₂), NO en CO₂ bepaald worden. Het doel is het zwavelgehalte van de brandstof van de schepen te bepalen. Het zwavelgehalte van de brandstof van zeevaart nabij land is gebonden (door middel van regelgeving) aan een maximum van 0,1%. Uit de aan wal gemeten concentraties wordt een zwavelgehalte per schip berekend en “near real-time” doorgegeven aan een website die beschikbaar is voor ILT. Wanneer er op deze manier een overschrijding geconstateerd wordt, kan ILT ervoor kiezen inspecteurs aan boord te sturen om een brandstofsamprol te nemen. Wanneer ook bij inspectie een te hoog zwavelgehalte wordt geconstateerd, zal een boete worden opgelegd.

Het zwavelgehalte wordt bepaald aan de hand van de gemeten CO₂-, SO₂- en NO-concentraties. De CO₂-concentratie geïntegreerd over een gemeten piek geeft aan hoeveel brandstof er verbruikt wordt. De SO₂-concentratie over dezelfde piekperiode geeft aan hoeveel zwavel er in de gebruikte brandstof zit. NO wordt gezien als de beste tracer om aan te geven wanneer een emissiepluim van een schip aanwezig is.

In 2022 is een rapportage gepubliceerd over de bruikbaarheid van de NO-gegevens om ook de NO_x emissie van schepen te bepalen en deze te gebruiken voor compliance-monitoring (van Dinther et al., 2022a). Vanuit de International Maritime Organization (IMO) is er binnen het MARPOL Protocol regelgeving met betrekking tot de maximale emissies van SO_x and NO_x van scheepvaart. Voor NO_x moeten schepen voldoen aan bepaalde Tier normen, afhankelijk van de kiellegging datum van een schip. De Tiernormen zijn gegeven in g NO_x per kWh en hangen af van het nominale motortoerental (in het Engels Rated Engine Speed, RPM). Doordat deze NO_x-norm gesteld is op kWh (en niet zoals voor SO_x per kg brandstof), is ook kennis van de motorbelasting van het schip nodig. De data waarmee de motorbelasting ingeschat kan worden is echter niet gemakkelijk toegankelijk. In de studie zijn daarom de NO_x emissies van alle gemeten pluimen (in totaal 13.000) tussen 10-10-2019 en 1-11-2021 bepaald met behulp van een constant geschatte brandstofefficiency van 200 kg brandstof/kWh. Hieruit kwam naar voren dat, zoals te verwachten, bij een hogere vaarsnelheid de NO_x-emissie hoger

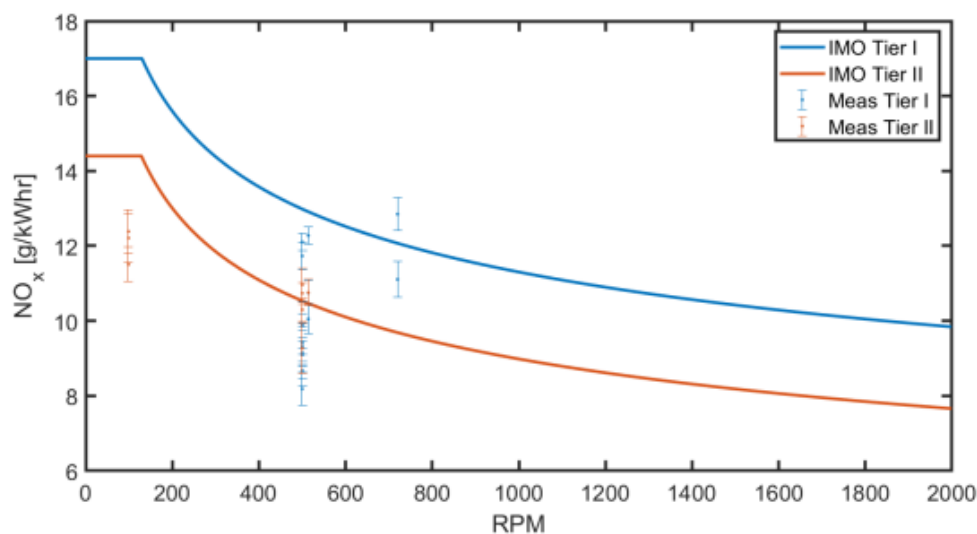
¹⁸ Shipping Contributions to Inland Pollution Push for the Enforcement of Regulations, EU H2020

¹⁹ Inspectie Leefomgeving en Transport

is. Vervolgens is voor de 23 vaakst langskomende schepen een specifieke brandstofefficiëntie gebruikt in de berekening van NO_x -emissie op basis van geschatte motorbelasting en vergeleken met de IMO Tiernormen (zie Figuur 31 Gemiddelde NO_x emissie (in g/kWh) per schip gegeven hun nominaal motortoerental (RPM) voor Tier I (blauw) en Tier II (oranje). De lijn geeft de IMO Tier normen aan. Hieruit blijkt dat, rekening houdend met de foutmarge, één van de schepen boven de IMO-norm zit (een Tier I schip). Er kan echter niet worden geconcludeerd dat dit schip non-compliant is, omdat de daadwerkelijk motorbelasting niet bekend is.

Ook kan geconcludeerd worden dat de gemiddelde NO_x -emissie van de Tier II schepen zelfs licht hoger ligt dan van de Tier I schepen, terwijl andersom verwacht mag worden. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de motoren van Tier II schepen met name geoptimaliseerd worden voor lage NO_x -emissies bij een hoog motorvermogen. Dichtbij de kust en de haven van Rotterdam is het motorvermogen over het algemeen laag. Aanbevelingen uit de studie zijn, onder andere, dat een database met de RPM van de scheepsmotoren wenselijk is. Ook is het belangrijk om de motorbelasting te weten, bijvoorbeeld door deze toe te voegen aan het AIS-sigitaal dat schepen uitzenden.

De NO_x -normen voor Tier III schepen (met kiellegging datum vanaf 1-1-2021) zijn een stuk strenger dan voor Tier I en Tier II schepen (factor vier tot vijf verschil). Daarom gebruiken Tier III schepen over het algemeen systemen om de NO_x -emissie te reduceren, die ook uitgeschakeld kunnen worden. Dit in combinatie met de lagere IMO NO_x -normen maakt het geheel kwetsbaar voor overtredingen. Aan de andere kant maakt de lagere IMO norm overtredingen makkelijk detecteerbaar. De ILT-data worden ook binnen SCIPPER gebruikt ter vergelijking met data van andere EU-partners.



Figuur 31 Gemiddelde NO_x emissie (in g/kWh) per schip gegeven hun nominaal motortoerental (RPM) voor Tier I (blauw) en Tier II (oranje). De lijn geeft de IMO Tier normen aan.

Binnen SCIPPER (EU-project) is met name gewerkt aan de uitwerking van de meetcampagne van 2020. Tijdens deze campagne is er data verzameld van SO_2 , CO_2 , NO_2 , NO , NO_x , PM, UFP en zwarte roet. De onshore metingen vonden plaats door in totaal drie groepen; TNO, BSH²⁰ (Duitsland) en Chalmers University (Zweden). Daarnaast is er met drones gemeten door Explicit (Denemarken) en Chalmers University.

Voor alle gassen en deeltjes is per gemeten pluim een emissie berekend per kg brandstof. Vervolgens zijn de berekende emissies met elkaar vergeleken. Hierbij zijn eerst de zwavelgehaltes geanalyseerd, omdat deze gebonden zijn aan regelgeving. Voor bepaling van de zwavelgehaltes zijn voor enkele schepen ook brandstofsamples genomen, die daardoor

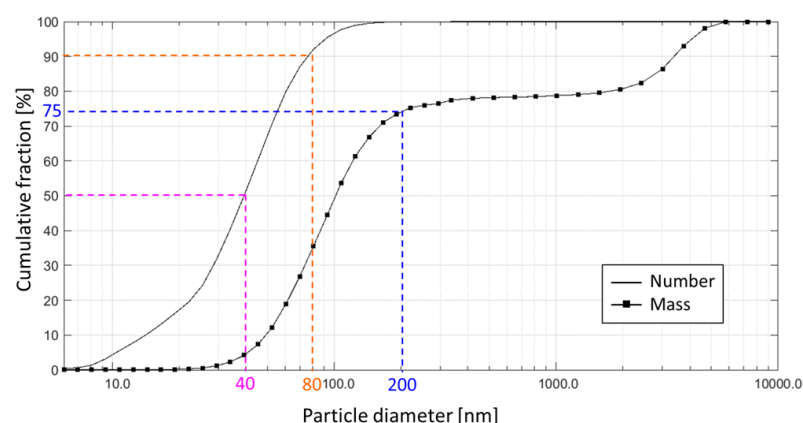
²⁰ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in Duitsland

voor sommige gevallen bekend zin. Door de regelgeving zijn de zwavelgehalten over het algemeen laag ($<0.1\%$). Dit bemoeilijkt de onderlinge vergelijking, omdat de waarden deels binnen de ruis van de apparatuur valt. Uit alle metingen blijkt echter dat alle schepen die langs gevaren zijn compliant²¹ waren met de regelgeving. Ook bleek dat de snuffelmetingen over het algemeen een lagere zwavelgehalte opleveren dan uit de brandstofanalyse en/of brandstofleveringsnota's mag worden verwacht. Er is in 2022 hard gewerkt aan een wetenschappelijk artikel, die in 2023 ingediend zal worden.

TNO richt zich binnen het consortium met name op de vergelijking van emissies van deeltjes uit verschillende schepen. Op het gebied van deeltjes is er op dit moment nog geen regelgeving voor scheepvaart. Wel is hiervan bekend dat te hoge concentraties van deeltjes de gezondheid negatief beïnvloeden en er is daarom ook EU-regelgeving op maximale concentratiewaarden van PM_{2.5} (deeltjes tot $2,5\ \mu\text{m}$) en PM₁₀ (deeltjes tot $10\ \mu\text{m}$) waaraan burgers per jaar mogen worden blootgesteld. Onderlinge vergelijking van schepen en motoren is van belang, mocht er in de toekomst regelgeving op het gebied van emissie van deeltjes komen voor scheepvaart. Vergelijkingscampagnes op het gebied van deeltjes zijn schaars voor de scheepvaart, wat dit een zeer unieke dataset maakt.

De deeltjesgrootteverdeling (aantal deeltjes per deeltjesgrootte per volume per tijd) is ook door de verschillende groepen aan wal gemeten, welke weer omgerekend kan worden naar massa PM. De teams van BSH en Chalmers hebben exact dezelfde apparatuur gebruikt en bepalen daarmee ook precies dezelfde deeltjesgrootteklassen. De apparatuur van TNO verdeelt de deeltjes in meer verschillende klassen (99 i.p.v. 44), de ondergrens van de instrumenten ligt echter wel hoger (90 nm i.p.v. 7 nm).

In Figuur 32 is de cumulatieve fractie geplot van deeltjes aantallen en massa gegeven de deeltjes diameter. Hieruit komt naar voren dat voor deeltjes aantallen 90% van de deeltjes een diameter van 80 nm of lager hebben. Voor massa is 75% van de deeltjes 200 nm of kleiner. Dit toont aan dat de LAS gebruikt door TNO met een kleinste diameter van 90 nm een groot deel van de deeltjes mist.



Figuur 32: Cumulatieve fractie (in %) gegeven de deeltjes diameter voor zowel deeltjes aantallen (zwarte lijn) en deeltjes massa (zwarte lijn met vierkanten) gemeten tijdens de meetcampagne in Wedel (Duitsland) door het meetsysteem van de BSH.

De gevonden emissie factoren (EF) voor deeltjes zijn met elkaar vergeleken voor de verschillende gebruikte instrumenten, zowel voor deeltjesaantallen (uitgedrukt in aantal deeltjes/kg brandstof) als voor deeltjesmassa (in mg deeltjes/kg brandstof). Voor de vergelijking zijn alleen de emissiefactoren meegenomen waarbij alle systemen dezelfde pluim hebben gemeten, in totaal bijna 60 pluimen. Het standaard BSH systeem (BSH_{AP}) is genomen als de referentie. Dit is een arbitraire keuze, de werkelijke emissie is niet bekend.

²¹ Compliant is in dit geval een term die ook in de Nederlandse rapporten van ILT gebruikt wordt. Deze is daarom hier aangehouden. Het betekent uiteraard "in overeenstemming met".

De BSH_{AP} referentie is vergeleken met een ander mobiel systeem van BSH (BSH_{MMS}) en de systemen van TNO en Chalmers University. De gevonden regressiestatistiek voor deeltjesaantallen is zichtbaar in Tabel 3. Hieruit komt duidelijk naar voren dat de twee BSH systemen een grote overeenstemming hebben ($R^2 \geq 0.79$ voor alle diameters). Ook het TNO systeem komt redelijk goed overeen met R^2 boven 0.69. Het systeem van Chalmers komt met name goed overeen voor de grotere deeltjes van 300 tot 10.000 nm.

Tabel 3 Regressie statistiek (helling, slope; offset en R^2) voor de emissie factoren voor deeltjesaantallen gegeven verschillende diameters (Size Range) met BSH_{AP} systeem.

Size Range [nm]	BSH _{MMS}			TNO			Chalmers		
	Slope	Offset	R^2	Slope	Offset	R^2	Slope	Offset	R^2
≤ 100	0.83	$1.2 \cdot 10^{15}$	0.79	NA	NA	NA	0.59	$2.6 \cdot 10^{15}$	0.47
90-300	0.86	$3.4 \cdot 10^{13}$	0.88	0.66	$8.4 \cdot 10^{13}$	0.69	0.99	$1.7 \cdot 10^{14}$	0.55
300-10000	1.1	$-2.3 \cdot 10^{11}$	0.98	1.3	$1.7 \cdot 10^{12}$	0.68	0.82	$8.1 \cdot 10^{11}$	0.83

De vergelijking tussen de instrumenten op basis van deeltjesmassa is gegeven in Tabel 4, waarbij ervoor gekozen is zowel naar de gehele massa te kijken als die vanaf 90 nm (aangeduid met PM_{0.09-...}). Opnieuw is er veel overeenstemming tussen de twee BSH systemen ($R^2 \geq 0.83$ voor alle PM fracties). Voor het TNO systeem komt duidelijk naar voren dat er te veel deeltjes gemist worden die kleiner zijn dan 90 nm om goede emissiefactoren voor PM te schatten. Wanneer alleen PM vanaf 90 nm wordt meegenomen zijn zowel de PM_{0.5} als PM₁ fractie vergelijkbaar met BSH_{AP} (R^2 van 0,82 en 0,70 respectievelijk). Het Chalmers systeem is met name vergelijkbaar met BSH_{AP}, wanneer de gehele PM fractie tot 0.5 μm of 1 μm wordt meegenomen (R^2 van 0,73).

Tabel 4 Regressie statistiek (helling, slope; offset en R^2) voor de emissie factoren voor deeltjesmassa gegeven verschillende PM fracties (PM fractions) met BSH_{AP} systeem.

PM fraction	BSH _{MMS}			TNO			Chalmers		
	Slope	Offset	R^2	Slope	Offset	R^2	Slope	Offset	R^2
PM _{0.3}	0.86	62	0.85	0.26	$3.1 \cdot 10^2$	0.23	0.94	$4.7 \cdot 10^2$	0.43
PM _{0.5}	0.89	37	0.86	0.42	$1.4 \cdot 10^2$	0.44	1.4	$-1.1 \cdot 10^2$	0.73
PM ₁	0.86	39	0.86	0.45	$2.1 \cdot 10^2$	0.40	1.4	-90	0.73
PM _{2.5}	0.88	90	0.86	0.45	$7.9 \cdot 10^2$	0.16	1.2	72	0.67
PM _{0.09-0.3}	0.93	39	0.83	1.1	$1.2 \cdot 10^2$	0.65	1.2	$3.3 \cdot 10^2$	0.35
PM _{0.09-0.5}	0.98	17	0.88	1.1	65	0.82	2.1	85	0.62
PM _{0.09-1}	0.99	16	0.88	1.1	$1.4 \cdot 10^2$	0.70	2.1	$1.2 \cdot 10^2$	0.61
PM _{0.09-2.5}	0.81	$1.5 \cdot 10^2$	0.83	0.48	$1.1 \cdot 10^3$	0.084	1.5	$1.3 \cdot 10^3$	0.38

Deze studie toont aan dat het mogelijk is vergelijkbare emissiefactoren van schepen te bepalen zowel voor deeltjes aantallen als massa. Met name de ondergrens van de gebruikte apparatuur is van belang om betrouwbare emissie factoren te schatten. In 2023 wordt er geschreven aan een wetenschappelijk artikel over deze studie, aangezien een unieke dataset is verzameld. Ook zullen de bevindingen gepresenteerd worden op wetenschappelijke symposia, zoals de EGU General Assembly.

Naast uitwerking van de campagne is er binnen SCIPPER ook gekeken hoe verschillende snuffelmetingen die gedaan worden binnen Europa geharmoniseerd kunnen worden. Resultaten hiervan zijn gepubliceerd in Deliverable 2.3 (Melqvist et al., 2022). Hieruit kwam naar voren dat de emissiefactoren voor zwavelgehalte en NO_x op dezelfde manieren bepaald worden. Wel zijn er verschillen in de berekening van de foutmarge. Voor zwavelgehaltes bleek uit de vergelijking van de SCIPPER campagne data dat de foutmarges voor de snuffelmetingen

te laag worden ingeschat. Betere harmonisatie van de berekening van de foutmarges is wenselijk. Ook moet er voor de zwavelgehalten gekeken worden waar de lagere schatting gevonden in de campagne in Wedel vandaan komt. Hier zal in 2023 onder andere door vergelijkingsmetingen bij de verschillende snuffelpalen naar gekeken worden.

3.1.3.1 LKW-3c Emissies uit luchtvaart

Ook voor luchtvaartemissies heeft het werk met name in een ander project plaatsgevonden. Voor luchtvaart is er gemeten in Eindhoven, zowel op Eindhoven Airport (van Dinther et al., 2022b) als vliegbasis Eindhoven (van Dinther et al., 2023), en bij Rotterdam-The Hague Airport (de Bruin-Hoegeé, 2023). Binnen deze studies was het doel gelijk; in kaart brengen welke ultrafijnstof (UFP)-concentraties voorkomen op het platform van de luchthavens. Het ging hierbij om een verkennend onderzoek, waarbij het doel was een *indicatie* te krijgen van de UFP-concentraties waaraan de medewerkers mogelijk blootgesteld (kunnen) worden. Alle studies maakten gebruik van een worst-case benadering, waarbij er stationair gemeten is op locaties waar de hoogste UFP-concentratie wordt verwacht en er tevens medewerkers deels aanwezig zijn.

De studies bij Eindhoven Airport en vliegbasis Eindhoven vonden plaats in dezelfde periode. De metingen zijn gedaan van 7 april tot en met 9 mei 2022. Er zijn in totaal vier meetlocaties ingericht (twee op Eindhoven Airport en twee op vliegbasis Eindhoven), waarbij deeltjes aantallen gemeten zijn. Tevens is op twee locaties de roetconcentratie gemeten (één op Eindhoven Airport en één op vliegbasis Eindhoven). De metingen zijn succesvol verlopen en de windcondities waren tijdens de meetperiode variabel.

De statistieken van de verzamelde data op de luchthavens in Eindhoven zijn zichtbaar in Tabel 5. Hieruit komt naar voren dat de UFP-concentraties op de platforms van Eindhoven Airport over het algemeen hoger zijn dan op Vliegbasis Eindhoven. Hoogste UFP-concentraties worden gemeten op LIMA-2, een locatie centraal op de platforms. Verklaring voor de hogere UFP-concentraties op Eindhoven Airport is waarschijnlijk een hoger aantal vluchten in vergelijking met Vliegbasis Eindhoven.

Tabel 5 Statistiek van de gemeten UFP-concentraties (in # cm⁻³) voor LIMA-3 en LIMA-4 op Vliegbasis Eindhoven en voor LIMA-1 en LIMA-2 op Eindhoven Airport (van Dinther et al., 2023).

	Locatie	Rekenkundig gemiddelde	Mediaan	90e percentiel
Vliegbasis Eindhoven	LIMA-3	24.000	12.000	48.000
	LIMA-4	20.000	10.000	40.000
Eindhoven Airport	LIMA-1	33.000	11.000	38.000
	LIMA-2	76.000	15.000	111.000

De wind speelt, naast de aanwezigheid van vliegtuigen, een cruciale rol bij de UFP-concentratie die gemeten wordt. Wanneer de wind vanaf de opstelplaatsen en start- en landingsbaan richting de meetpunten staat worden de hoogste UFP-concentraties gemeten. Voor Vliegbasis Eindhoven worden er met name verhogingen in UFP waargenomen bij Noordenwind vanaf de platforms van Eindhoven Airport.

Het 8 uren lopend gemiddelde variëren op Eindhoven airport tussen de 10.000 en 450.000 # cm⁻³ voor LIMA-2 en tussen 5.000 en 250.000 # cm⁻³ voor LIMA-1. Op Vliegbasis Eindhoven liggen de 8-uurs lopend gemiddeldes lager (tussen de 3.000 en 80.000 # cm⁻³). Voor Eindhoven Airport ligt deze 8-uursgemiddelde concentratie geregeld boven de tijdelijke referentiewaarde van 60.000 # cm⁻³ van het RIVM (2010) en de 50.000 # cm⁻³ door Rijkswaterstaat gehanteerde bedrijfsgrenswaarde (Wander en Verbist, 2016). Aanbeveling aan Eindhoven Airport is dan ook om persoonlijke blootstellingmetingen uit te voeren om meer inzicht te krijgen in de UFP-concentraties waaraan werknemers daadwerkelijk worden blootgesteld. Hiernaast wordt, voor zowel Eindhoven Airport als Vliegbasis Eindhoven, aanbevolen waar mogelijk UFP-bronnen weg te nemen.

Op Rotterdam-The Hague Airport (RTHA) hebben metingen plaatsgevonden van 30 juni tot en met 27 juli 2022. Hiertoe zijn er op de platforms van RTHA twee meetstations ingericht. Op

één locatie is alleen UFP gemeten en op de andere locatie is naast UFP ook roet en zwaveldioxide (SO₂) gemeten. De reden om ook SO₂ mee te nemen is om meer inzicht te krijgen of de UFP verhogingen uit vliegtuigen dan wel wegverkeer gekomen. Aangezien de zwavelgehaltes in kerosine veel hoger zijn dan in diesel en benzine. De statistiek van de meting op RTHA zijn zichtbaar in Tabel 6. De metingen op RTHA zijn licht verhoogd ten opzichte van Eindhoven Airport (zie Tabel 5). Mogelijke oorzaak hiervan is de redelijk korte afstand tussen vliegtuig en meetlocatie op het RTHA. Tevens kan de bebouwing op RTHA een rol hebben gespeeld in combinatie met de windrichting die vaak uit het Noordwesten kwam (50% van de tijd). Het 8 uren lopend gemiddelde van UFP varieerde op het RTHA tussen de 6.000 en 405.000 # cm⁻³. Gezien het feit dat de 8-uurs gemiddeldes regelmatig geregeld boven de tijdelijke referentiewaarde van 60.000 # cm⁻³ van het RIVM (2010) en de 50.000 # cm⁻³ door Rijkswaterstaat gehanteerde bedrijfsgrenswaarde (Wander en Verbist, 2016) ligt wordt ook hier aangeraden blootstellingsmetingen te doen.

Tabel 6 Statistiek van UFP-concentratie (alle in # cm⁻³) gemeten op Rotterdam-The Hague Airport (de Bruin-Hoegeé et al., 2023).

Locatie	Gemiddeld e	Standaard- deviatie	Mediaan	10 ^e percentiel	90 ^e percentiel
MIKE-1	94.000	417.000	16.000	6.000	121.000
MIKE-2	89.000	466.000	16.000	6.000	98.000

Onderzoek naar de verspreiding van UFP-verspreiding rondom luchthaven Schiphol en de bijbehorende rekenmethode (zie Voogt et al., 2019) is inmiddels (in 2022) ingediend bij een wetenschappelijk tijdschrift (Atmospheric Environment) om te publiceren. TNO is coauteur van deze publicatie, vanwege onze bijdrage aan dit onderzoek. Reactie van het tijdschrift wordt verwacht in 2023.

3.1.3.2 LKW-3d Agrarische emissies

In 2022 is door het ministerie van LNV een specifiek, meerjarig programma voor het bemeten van agrarische emissies toegekend aan WLR, TNO en het Vlaamse ILVO. TNO is binnen dat programma verantwoordelijk voor de ontwikkeling en demonstratie van remote meettechnieken voor het bemeten van (meerdere) agrarische bedrijven. Met behulp van mobiele metingen kan relatief snel een schatting van emissies uit de stal en van andere objecten op het terrein gemaakt worden. Ook kan de mobiele meetwagen gebruikt worden om snel hoogwaardige concentratiemetingen in de stal uit te voeren (mits het mogelijk is om de mobiele wagen de stal in te rijden, bij melkvee is dit vaak het geval).

In 2021, in een voorloper van dit programma, zijn door TNO al mobiele metingen uitgevoerd bij De Marke, een proefstal in Gelderland²². De mobiele opstelling voor de ammoniakmetingen gaf toen nog geen goede resultaten, doordat de HT87000E, die met behulp van dit IenW milieuonderzoeksprogramma kon worden getest en gekalibreerd, in de wagen in een grote buis in de aanhanger was geplaatst.

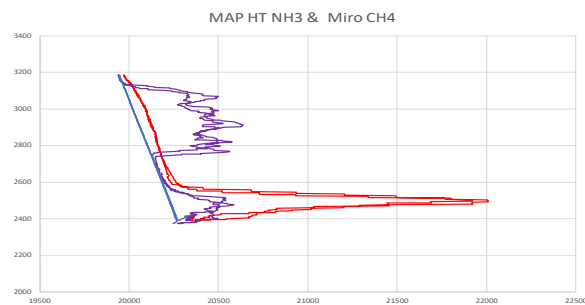
In 2022 is de plaatsing van het instrument aangepast. De HT87000E is op het dak van de trailer geplaatst, zodat de buitenlucht zo direct mogelijk bemeten kan worden (zie Figuur 33, links). Eind 2022 is deze nieuwe opstelling met succes getest in het LNV programma bij een melkveehouderij in Middenmeer. TNO heeft hiermee nu de eerste mobiele meetopstelling in Europa waarmee gelijktijdig en met hoge tijdsresolutie emissiepluimen van methaan en ammoniak gemeten kunnen worden. Door met deze mobiele meetopstelling meerdere rondritten te maken, waarbij meerdere agrarische en niet-agrarische bronnen van ammoniak en methaan of lachgas op een dag bemeten kunnen worden, kunnen typische emissiefactoren en verhoudingen tussen emissies van verschillende typen bronnen bepaald worden. Deze waarden kunnen vervolgens gebruikt worden ter verbetering van de

²² Een samenvatting van deze resultaten is te vinden in het jaarrapport van de milieusubsidie over 2021.

emissieregistratie of modellen, om onbekende bronnen (bijvoorbeeld van bedrijven) in kaart te brengen en om een snelle indruk te krijgen van de effectiviteit van verschillende innovaties die worden toegepast om emissies te reduceren.

Doordat beide gasen snel en gelijktijdig gemeten kunnen worden, kan nu ook een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen, bijvoorbeeld, emissies uit bemeste weilanden en emissies uit stallen (zie rechts in Figuur 33). De totale ammoniakemissie uit bemeste weilanden is normaliter hoger dan uit stallen. De gemeten concentraties ammoniak in de lucht zijn per gereden meter weliswaar maar iets hoger voor weilanden dan voor stallen, maar de bron is veel uitgestrekter, waardoor de geïntegreerde waarde hoger is. De emissie van methaan uit een bemest weiland is echter veel lager dan die van een (melkvee)stal. Door dus zowel methaan als ammoniak te meten kunnen de emissies van deze bronnen beter onderscheiden en bepaald worden.

Ook worden er typische verschillen gezien in de verhouding methaan/ammoniak voor varkensstallen en melkveestallen, maar het is nog te vroeg om hier kwantitatieve uitspraken over te doen. In 2023 zal hier beter naar gekeken worden.

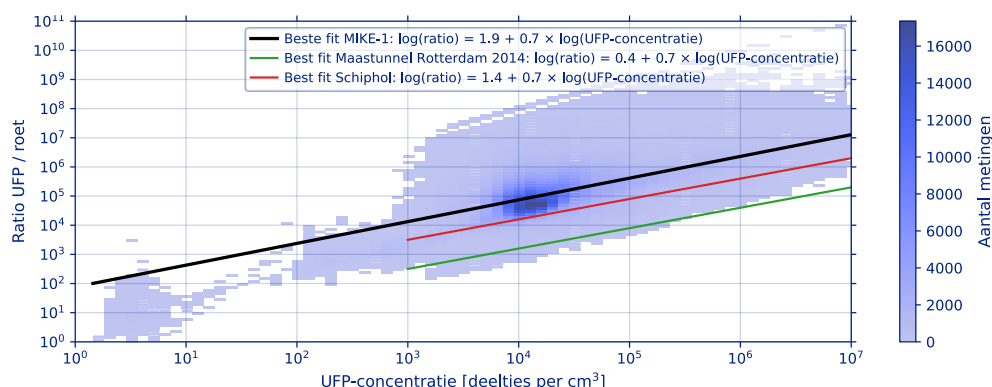


Figuur 33: Links: de HT-8700 voor metingen van ammoniak bevestigd op het dak van de trailer van de mobiele meetwagen. Rechts: ammoniak (paars) en methaan (rood) emissies gemeten uit een bemest weiland (linkerpiek) en de daarnaast gelegen melkveehouderij (rechterpiek). Voor deze grafiek is de meetwagen langs beide bronnen gereden en de grafieken van de heen- en terugweg zijn over elkaar heen geplot. Dit toont aan dat de metingen goed reproduceerbaar zijn.

LKW-3^e Herkomst en verspreiding van (ultra-)fijnstof

Binnen de luchtvaartonderzoeken (zie LKW-3c) is er tevens gekeken naar het mogelijke onderscheid tussen UFP uit vliegtuigen en wegverkeer. Hiertoe is er op Eindhoven Airport en Vliegbasis Eindhoven naast UFP op beide locaties ook één meetopstelling met roet geplaatst. Bij Rotterdam-The Hague Airport (RTHA) is er één meetpunt ingericht die naast UFP ook roet en SO₂ meet.

Bij RTHA (de Bruin-Hoegée et al., 2023) is er gekeken naar de ratio van UFP en roet (zie Figuur 34). Deze ratio wordt vergeleken met de ratio UFP/roet gevonden in een studie in de Maastunnel (afkomstig van wegverkeer, uitgevoerd door TNO in januari 2014 voor het project NanoNextNL (Tromp, 2017)) en van de studie op Schiphol (afkomstig van vliegverkeer). Uit de figuur is op te maken dat de ratio UFP/roet hoger (ruim 10 keer) ligt in de huidige studie dan bij de studie in de Maastunnel. Dit betekent dat de toename van UFP-emissies in het geval van vliegverkeer minder gepaard gaat met een toename in rotemissie dan we bij wegverkeer zien. Dit komt overeen met de literatuur, waaruit blijkt dat vliegtuigmotoren minder roet uitstoten dan dieselmotoren (van wegverkeer).



Figuur 34 Ratio UFP/roet uitgezet tegen de UFP-concentratie in deeltjes per cm^3 , gemeten met de EPC en AE-33. In groen is de ratio weergegeven dat in een studie in de Maastunnel is gevonden, waarbij de UFP en roet van wegverkeer zijn gemeten. In rood is de gevonden ratio uit de studie in Schiphol van Tromp et al. (2021) weergegeven. De blauwe kleur illustreert het aantal metingen per concentratie, met aan de rechterkant de kleurenbalk (de Bruin-Hoegée et al., 2023).

Er is bij RTHA tevens gekeken naar SO_2 , waarbij de SO_2 concentratie naar verwachting verhoogd is uit vliegtuigemissies (hoger zwavelgehalte in kerosine dan benzine en diesel). Het feit dat naast vliegtuigbewegingen ook, zware industrie in de haven van Rotterdam aanwezig is, waarbij SO_2 geëmitteerd wordt bemoeilijkt de analyse. Wel kan er gesteld worden dat er bij hoge UFP pieken ook regelmatig een verhoogde SO_2 concentratie wordt gemeten.

Bij hoge UFP concentraties vanuit vliegtuigen worden dus over het algemeen geen verhoogde roet concentraties gemeten en wel verhoogde SO_2 concentraties. Dit is het algemene patroon, exacte uitsplitsing, van UFP emissies uit wegverkeer en vliegverkeer blijft lastig. In 2023 wordt door EMSA een Fast Mobility Particle Sizer (FMPS) aangeschaft van TSI. Deze meet de deeltjesgrootteverdeling (het aantal deeltjes uitgesplitst in verschillende deeltjesgroottes) zeer snel, op 1 Hz meetfrequentie. Hierdoor wordt het mogelijk ook in een relatief korte pluim de deeltjesgrootteverdeling te bepalen. Aangezien vliegverkeer kleinere deeltjes uitstoot dan wegverkeer is het mogelijk beter onderscheid te maken tussen deze twee UFP bronnen.

3.1.4 LKW-4 Cofinanciering van Ruisdael programma

Meetmethoden voor en interpretatie van luchtkwaliteit ontwikkelen zich snel. TNO neemt daarom regelmatig deel aan Europese projecten met als doel 'de vinger aan de pols' te houden voor wat betreft de nieuwste ontwikkelingen op Europees en internationaal niveau. De Nederlandse bijdrage (bijvoorbeeld vanuit dit programma) vindt zo ook zijn weg naar andere EU-lidstaten en vergroot hiermee de impact aanzienlijk.

Een deel van dit programma (25 k€) is daarom ingezet voor het behouden en verbeteren van de aerosoltrailer en het aerosolinstrumentarium in het Cabauw station, welke onderdeel zijn van de Ruisdael infrastructuur. Beiden zijn ook ingezet bij de Ruisdaelcampagne 2022 in de regio Rotterdam.

3.1.5 LKW-5 Houtrook en/of zeer zorgwekkende stoffen (ZZS)

Eind 2020 is de Samenwerking Houtrookonderzoek gestart, een project in samenwerking met RIVM, IRAS (UU) en GGD Amsterdam. Binnen dit project is in het houtstookseizoen 2020-2021 onderzoek gedaan naar blootstelling aan en gezondheidseffecten van houtrook in wijken met (vermoedelijk) veel houtrook. TNO heeft hierbij één van de centrale meetpunten in Bergen beheerd. Het doel van de metingen in dit onderzoek was het over een langere periode betrouwbaar meten van de aanwezige concentraties van houtrookcomponenten in een wijk.

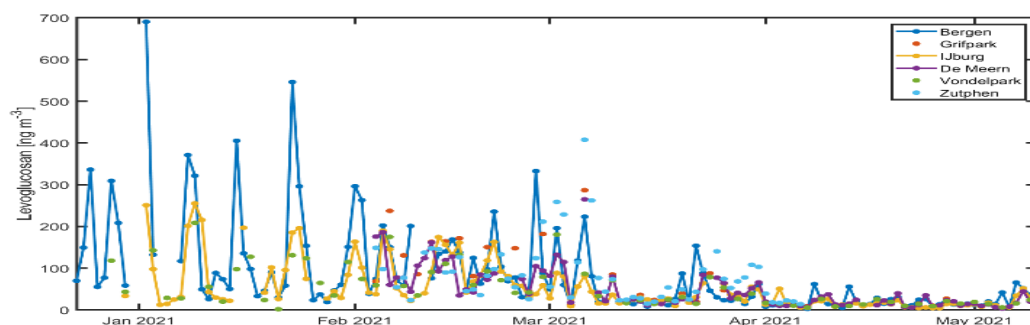
De resultaten zijn vervolgens gebruikt voor de bepaling van de relatie tussen de aanwezigheid van houtrook in een wijk en de, door IRAS met een panelstudie in kaart gebrachte, gezondheidsklachten bij bewoners.

TNO heeft in Bergen dezelfde meetset ingezet als op de andere meetpunten, maar daarnaast ook nog de roetsensor, de ACSM, een UFP-monitor, een CO₂-monitor en de sensorkastjes van Munisense (CO, CO₂, PM). Dit deelprogramma is in 2020-2022 ingezet als aanvullend budget voor de extra instrumenten bij deze samenwerking en om alle data-analyse en rapportage mogelijk te maken.

Daarnaast is nog een klein deel van het ingezet voor een verkennende studie naar de bruikbaarheid van Positive Matrix Factorization (PMF) voor de brontoekenning van vluchtige organische componenten (VOCs). Dit is gedaan op basis van eerder door INRA gemeten PTR-MS data.

Activiteiten en resultaten in 2023: Houtrook en ZZS

Houtrook: Afronding samenwerking houtrookonderzoek



Figuur 35: Levoglucosan gemeten op de 4 centrale meetpunten en LML stations Griftpark en Vondelpark. De pieken zijn het hoogst in Bergen, maar de trends zijn vergelijkbaar voor de stedelijke meetpunten.

TNO heeft voor het haalbaarheidsonderzoek binnen de Samenwerking Houtrookonderzoek in de periode van 16 december 2020 t/m 10 mei 2021 verschillende meetapparatuur ingezet. Naast high-end apparatuur zijn er ook sensoren ingezet (mid-range en low-end qua prijs) om te onderzoeken of deze geschikt zijn voor het meten van houtrook. Na de meetperiode is alle data op kwaliteit gecontroleerd en geconverteerd naar waarden op uurbasis, waarna deze gedeeld zijn met de overige partners.

Begin 2022 zijn er veel uren gemaakt binnen dit programma om de resultaten van dit onderzoek te verwerken tot de Beleidssamenvatting Samenwerking Houtrookonderzoek en de bijbehorende bijlage²³. Ook heeft TNO het blootstellingsdeel van de meetresultaten gepresenteerd bij een bijeenkomst van de SLA themagroep op 14 april. In de box hieronder zijn de belangrijkste conclusies voor het deel van TNO kort samengevat.

²³ [Kamerbrief over ontwikkelingen houtrookemissies | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl](#)

Conclusies TNO deel samenwerking houtrookonderzoek

Op 4 centrale meetlocaties zijn o.a. de volgende stoffen gemeten:

Levoglucosan (houtrooktracer), **fijnstof** (PM1, PM2,5 en PM10), **roet** (BC), **koolmonoxide** (CO) en **ultrafijnstof** (UFP).

Kosteninschatting van de geteste instrumenten

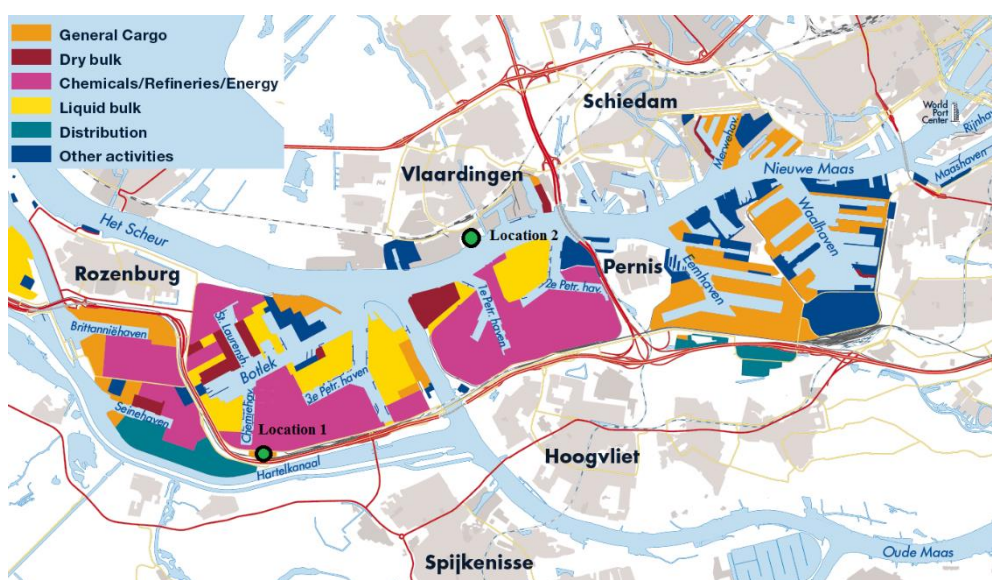
- High-end instrumenten kosten 10.000 - 40.000 Euro. De aethalometer (roet) is het duurst.
- Compacte, draagbare mid-range instrumenten/sensoren kosten 300 - 13.000 Euro. Roet en UFP sensoren zijn het duurst en vergelijkbaar in prijs.

Beste instrument voor houtrookmetingen

- De high-end aethalometer kan "Houtstookroet" goed meten als zelfstandige indicator voor houtrook. Dit volgt uit de vergelijking met Levoglucosan.
 - Roetsensoren lijken ook geschikt om houtstookroet te detecteren, met name de TNO roet-sensor. Dit volgt uit de vergelijking met de high-end aethalometer.
 - PM, UFP en CO zijn geen zelfstandige indicatoren voor houtrook (want komen ook uit andere bronnen) maar zijn doorgaans wel verhoogd bij houtstook.
 - De PM, UFP en CO pieken die correleerden met houtstook (Levoglucosan/roet) waren niet opvallend hoog t.o.v. achtergrondpieken, onafhankelijk van high-end of sensormetingen.
- **Houtrook is een lokale bron** (t.o.v. niet stedelijke achtergrond), de overall trends zijn echter regionaal/landelijk (Figuur 35)

Zeer zorgwekkende stoffen: VOCs in Rotterdam

In januari 2017 zijn concentraties van vluchtige organische componenten (VOC) gemeten door INRA (Frankrijk) met een PTR-MS (proton-transfer-reaction mass spectrometer) aan boord van de TNO meetwagen (toen nog ECN). Continue metingen (1 Hz) hebben plaatsgevonden op twee locaties gedurende een periode van vijf dagen (Figuur 36). Daarnaast zijn er ook flessamples genomen op verschillende locaties in de regio Rotterdam.



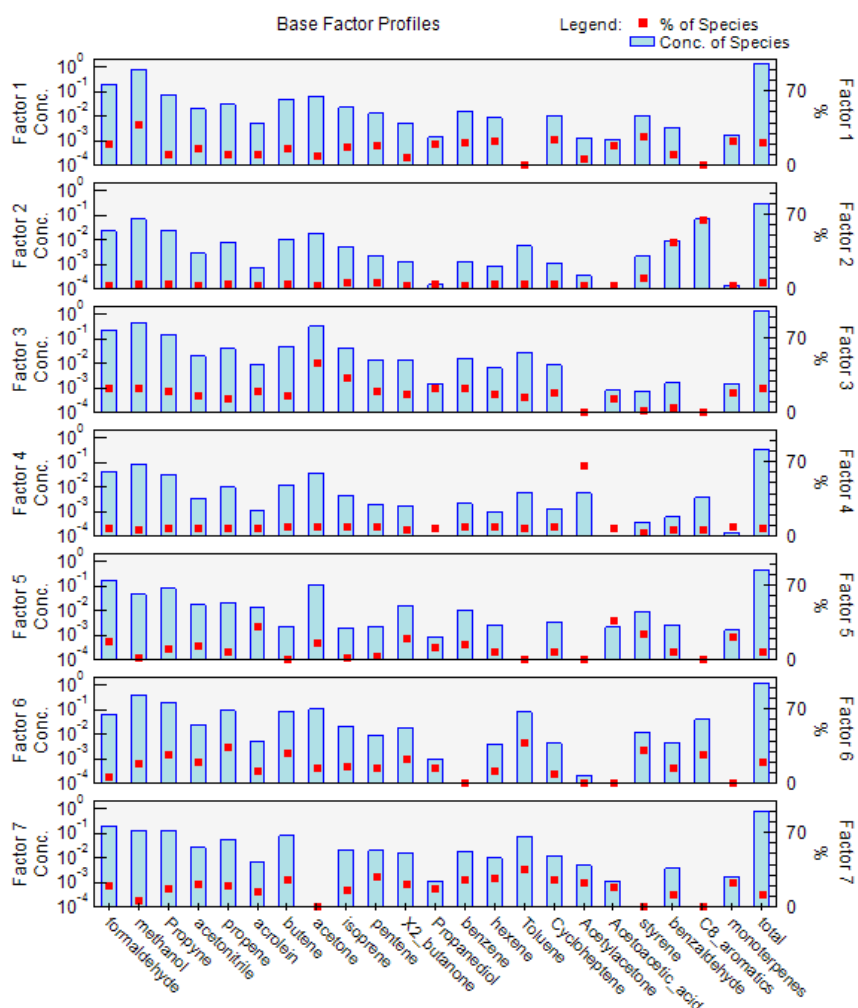
Figuur 36: Weergave van de locaties van de continue VOC metingen (groene punten op de kaart)²⁴.

²⁴ Bron: Facts and figures-document van Havenbedrijf Rotterdam, <http://www.portofrotterdam.com> 2017

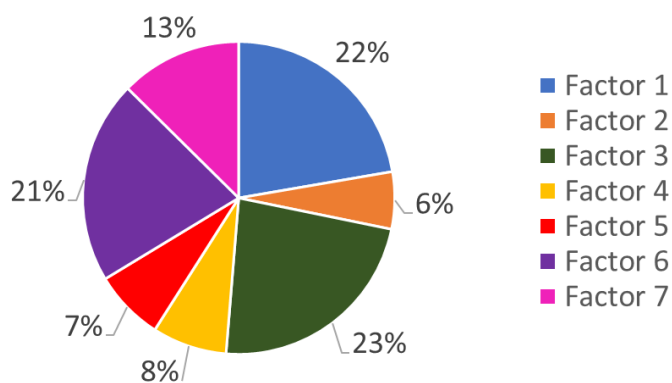
Dit jaar zijn we gestart met een voor het team nieuwe techniek voor data analyse: Positive Matrix Factorization (PMF). Hiervoor zijn de data van locatie 1 (**Figuur 36**, De Punt) gebruikt, op basis van het hoogste aantal geselecteerde VOC en de hogere data kwaliteit ten opzichte van locatie 2 (Delta Hotel). Het US EPA PMF 5.0 model is gebruikt voor deze studie.

De factoren die volgen uit een PMF analyse zijn mogelijke bronnen met een typisch, statistisch herkenbaar profiel, zonder dat van tevoren bekend is bij welke bron een bepaald profiel hoort. Op basis van het bronprofiel en kennis over wat voor bronnen typisch zo'n profiel afgeven, kan dan vervolgens gereconstrueerd worden welke bronnen hebben bijgedragen aan de op een bepaalde locatie gemeten concentratie. Dit wordt gedaan met behulp van externe parameters zoals kennis van mogelijke bronlocaties, meteorologische variabelen, dagelijkse variaties en tijdseries, metingen vlakbij de bron (flessamples) en trace-gassen (CO, NO_x, SO₂ etc.), aangevuld met literatuur.² etc.), aangevuld met literatuur.

Figuur 37 toont de 7 verschillende gevonden bronprofielen voor De Punt. De verdeling tussen de verschillende factoren is te zien in Figuur 38. Wat opvalt is dat in alle gevonden typen bronemissies formaldehyde en methanol in aanzienlijke mate voorkomt, typisch voor industriële emissies. Ook een aantal andere stoffen komt bijna in alle bronnen voor, wat weliswaar reëel kan zijn voor een industrieel gebied, maar het voorkomen van dezelfde stoffen in gelijke mate over de hele range van factoren is verdacht en moet nader onderzocht worden. Doordat de totale hoeveelheid meetdata beperkt is (5 dagen), kan er ook nog maar weinig afgeleid worden uit de dagelijkse variatie en meteorologische gegevens, wat de interpretatie ook bemoeilijkt. Verdere duiding en waarschijnlijk ook langere meetreeksen zijn nodig om dit soort profielen goed aan bronnen toe te kennen.



Figuur 37 Het PMF bron profiel van de VOC metingen van locatie 1 (De Punt) op basis van metingen met de PTR-MS bij de Punt in Rotterdam in 2017. De blauwe balkjes geven de gemeten concentraties weer die zijn toegekend aan dit brontype. De rode blokjes zijn een weergave van het aandeel van deze factor voor deze specifieke stof in het geheel.



Figuur 38 Verdeling van de bijdrage van de zeven PMF factors van de VOC metingen van locatie 1 (De Punt), verkregen met de PTR-MS in 2017.

3.2 Conclusies Milieuonderzoek Luchtkwaliteit

In 2022 zijn er binnen dit programma bij TNO weer flinke stappen gemaakt in de kennis en expertise op het gebied van luchtkwaliteitsmetingen en emissies van specifieke bronnen.

Binnen LKW-1 is een studie gedaan over het effect van meestoken van waterstof (H_2) bij aardgasverbranding op NO_x -emissies. Het meestoken van waterstof leidt tot een hogere vlamtemperatuur, maar dit leidt niet noodzakelijk ook tot hogere NO_x -emissies dan het stoken van aardgas. In de meeste gevallen zijn namelijk ook dezelfde NO_x reductietechnieken toepasbaar. Het realiseren van deze reductietechnieken vormt bij de meeste installaties ook maar een zeer beperkte kostenpost t.o.v. de waterstofaanpassing van het systeem zelf. Ook heeft TNO in LKW-1 bijgedragen aan de Routewijzer Houtstook & Overlast, welke een handreiking vormt voor gemeenten bij de aanpak van houtstook. De Routewijzer is in oktober 2022 gepubliceerd.

In LKW-2a is onderzocht hoe de kwaliteitscontrole van de NO_2 sensoren in het Eindhovense ILM2 netwerk kunnen worden verbeterd. Hierbij is gekeken naar de correlatie met ozon en luchtvochtigheid. Door de NO_2 -metingen van alle sensoren in het netwerk over een langere periode te vergelijken met de ozon- en luchtvochtigheidswaarden van het LML kan ingeschat worden bij welke omstandigheden de data van de sensoren onbetrouwbaar is en kan aan de hand hiervan een oplossing gevonden worden.

Ook is in LKW-2a gekeken naar het de toepasbaarheid van een nieuwe ammoniaksensor, de HT8700E, voor het uitvoeren van ammoniak depositiefluxmetingen. Het instrument blijkt zeer goed bruikbaar, de resultaten zijn binnen 10% gelijk aan de referentiewaarden die zijn gevonden met een mini-DOAS gradiënt opstelling, ook voor depositiefluxmetingen, die naast dit instrument was geplaatst. De test is uitgevoerd op Cabauw in samenwerking met het RIVM, welke de mini-DOAS metingen heeft gedaan.

Tenslotte is in LKW-2a verder gewerkt aan de ontwikkeling van de roetsensor, die eerder al goed bruikbaar leek voor het detecteren van houtrook. De roetsensor blijkt ook gevoelig voor dieselrook, maar het lijkt erop dat het instrument goed onderscheid kan maken tussen de verschillende typen rook. Er wordt gewerkt aan een verbeterde versie van de sensor en de bijbehorende software, zodat deze in de toekomst dit onderscheid automatisch kan maken op basis van de deeltjesgrootteverdeling en beter inzetbaar zal zijn in stedelijke netwerken.

In LKW-2b is gezocht naar correlaties tussen de chemisch specifieke aerosolmetingen van de ACSM en de MARGA, onderling en met andere instrumenten tijdens de Ruisdaelmeetcampagnes van 2021 en 2022. Zo is er een goede correlatie gezien tussen sulfaatmetingen met de ACSM en de MARGA, vergelijken de ammoniakmetingen van de MARGA goed met de metingen van veel nieuwere ammoniakmeetmethoden en is er bij de Ruisdaelcampagne in Rotterdam een sterke correlatie gezien tussen pieken in de kolommetingen van CO_2 en pieken in de metingen van anorganische aerosolen met de ACSM. De volgende stap is nu om de gemeten pieken beter te bestuderen, de bronnen te duiden en de kleine meetverschillen tussen de instrumenten beter te begrijpen.

In LKW-2c heeft TNO ook weer deelgenomen aan bijeenkomsten van de werkgroep CEN/TC 264 42 waarbinnen wordt gewerkt aan een norm voor de technische specificatie van fijnstofsensoren.

In LKW-3b is aandacht besteed aan een uitgebreidere analyse van data die vergaard is voor de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) en het EU-project SCIPPER. Uit de analyse van de ILT data blijkt dat de meeste schepen in Rotterdam, op basis van een geschatte motorbelasting, voldoen aan de Tier normen in g/kWh voor NO_x emissies van de International Maritime Organization (IMO). De NO_x -emissies van Tier II schepen liggen, tegen de verwachting in, in meerdere gevallen hoger dan die van Tier I schepen, wat mogelijk verband houdt met het lagere motorvermogen binnen het havengebied.

Uit de analyse van de data van de SCIPPER campagne in 2020 blijkt dat alle bemeten schepen compliant waren met de regelgeving wat betreft het zwavelgehalte. Wel bleek dat de snuffelmetingen lagere waarden geven dan de brandstofanalyses. Dit zal nader worden toegelicht in een wetenschappelijke publicatie in 2023. Verder zijn binnen SCIPPER de instrumenten waarmee fijnstof deeltjes zijn gemeten met elkaar vergeleken. In deeltjesaantallen mist de TNO monitor de deeltjes met een diameter onder de 90 nm, waardoor een aanzienlijk deel van de deeltjes niet gemeten wordt. Het instrument komt qua deeltjesaantallen redelijk overeen ($R^2 > 0.68$) met de referentie van BSH voor grotere diameters. De deeltjesmassa's komen goed overeen voor $PM_{0.5}$ en $PM_{1.0}$.

In LKW-3c zijn UFP-studies vergeleken voor Eindhoven Airport, vliegbasis Eindhoven en twee platforms van Rotterdam-The Hague Airport (RTHA). De concentraties op Eindhoven Airport waren hoger dan op de vliegbasis, waarschijnlijk vanwege het hogere aantal vluchten, en zijn het hoogst wanneer de wind uit de richting van de opstelpunten en de start- en landingsbaan komt. De waarden liggen geregeld boven de tijdelijke referentiewaarden van $50.000 \text{ \# cm}^{-3}$ (RIVM) en $60.000 \text{ \# cm}^{-3}$ (Rijkswaterstaat) en gerichte blootstellingsmetingen voor medewerkers worden geadviseerd. De metingen op RTHA zijn nog licht hoger dan voor Eindhoven Airport, mogelijk is dit gerelateerd aan de kortere meetafstand en/of de bebouwing. Het blijft lastig om onderscheid te maken tussen UFP uit vliegtuigen en wegverkeer (LKW-3e) ook met additionele roet en SO_2 metingen. De ratio UFP/roet ligt ruim hoger bij de huidige studie dan bij de studie in de Maastunnel, want vliegtuigmotoren stoten minder roet uit dan dieselmotoren (in overeenstemming met de literatuur). Bij hoge UFP pieken werden ook hogere SO_2 concentraties gemeten. Naar verwachting zal de FMPS in 2023 een nieuw handvat bieden om dit onderscheid te maken.

Wat betreft agrarische emissies (LKW-3d) kon eind 2022 is een verbeterde mobiele opstelling voor gelijktijdige metingen van methaan en ammoniak met succes getest bij een melkveehouderij in Middenmeer. Door met deze mobiele meetopstelling meerdere rondritten te maken, waarbij meerdere agrarische en niet-agrarische bronnen op een dag bemeten kunnen worden, kunnen in de toekomst typische emissiefactoren en verhoudingen tussen emissies van verschillende typen bronnen bepaald worden.

LKW-4 is besteed als cash bijdrage voor het behouden en verbeteren van de aerosoltrailer en het aerosolinstrumentarium in het Cabauw station.

In LKW-5, het focusonderwerp, is dit jaar zowel aan houtstook als aan zeer zorgwekkende stoffen aandacht besteed. De Samenwerking Houtrookonderzoek 2020-2021 is begin 2022 gerapporteerd, waarbij de belangrijkste conclusies waren dat betaalbare roetsensoren geschikt lijken om in een wijk de aanwezigheid van houtstook te bepalen en dat, hoewel houtstook een zeer lokale bron is, de landelijke en regionale trends in het wel of niet aanwezig zijn van houtrook op wijkniveau vergelijkbaar zijn.

Daarnaast is in LKW-5 ook een test gedaan met de Positive Matrix Factorization methode voor brontoekenning van gemeten concentraties van een bredere range aan componenten. De methode is toegepast op een dataset van vluchtige organische stoffen, gemeten gedurende 5 dagen in 2017 in Rotterdam. Er lijken 7 verschillende karakteristieke brontypen te onderscheiden in de data, maar de profielen lijken erg op elkaar, wat verdacht is. Verdere duiding en langere meetreeksen, bijvoorbeeld van Cabauw of uit de houtrookcampagne, zijn waarschijnlijk nodig om met meer zekerheid deze methode te kunnen toepassen.

Ondertekening

TNO › Energy & Materials TransitionEnergy & Materials Transition › Petten, 7 april 2023

Peter Petiet
Research Manager

Paula Bronsveld
Auteur

Bijlage A

Publicaties

Anthony, M. A., Crowther, T. W., Van Der Linde, S., Suz, L. M., Bidartondo, M. I., Cox, F., ... & Averill, C. (2022). Forest tree growth is linked to mycorrhizal fungal composition and function across Europe. *The ISME journal*, 16 (5), 1327-1336.

de Bruin-Hoegée, G.J., Esveld, J.C., Moerman, M.M., Lollinga, J.P., van Doorn, L.B., van Dinther, D., Tromp, P.C., Korstanje, T.J. (2023). Concentraties ultrafijnstof op het platform van Rotterdam-The Hague Airport. *TNO rapport R12273*, Petten.

Delre, A., Hensen, A., Velzeboer, I., van den Bulk, P., Edjabou, M. E., & Scheutz, C. (2022). Methane and ethane emission quantifications from onshore oil and gas sites in Romania, using a tracer gas dispersion method. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 10(1).

Mellqvist, J., Beecken, J., Conde, V., van Dinther, D., Duyzer, J., Griesel, S., Irjala, M., Knudsen, B., Knudsen J., Moerman, M., Ntziachristos, L., Weigelt, A. (2022). Quality assurance of remote monitoring systems and harmonised reporting. *SCIPPER Project Deliverable 2.3*.

Menoud, M., van der Veen, C., Maazallahi, H., Hensen, A., Velzeboer, I., van den Bulk, P., ... & Röckmann, T. (2022). CH₄ isotopic signatures of emissions from oil and gas extraction sites in Romania. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 10(1).

Ražnjević, A., van Heerwaarden, C., van Stratum, B., Hensen, A., Velzeboer, I., van den Bulk, P., & Krol, M. (2022). Interpretation of field observations of point-source methane plume using observation-driven large-eddy simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(10), 6489-6505.

Swart, D., Zhang, J., van der Graaf, S., Rutledge-Jonker, S., Hensen, A., Berkhout, S., ... & van Goethem, T. (2022). Measuring dry deposition of ammonia using flux-gradient and eddy covariance methods with two novel open-path instruments. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1-32.

van Dinther, D., Duyzer, J.H., de Bie, S., Moerman, M.M., Lollinga, J.P., Maarschalkerweerd, T.V.P. (2022a). Measurements of emission factors of nitrogen oxides of seagoing vessels in the port of Rotterdam. *TNO report R11458*, Petten.

van Dinther, D., Moerman, M.M., Lollinga, J.P., van Doorn, L.B., Korstanje, T.J. (2022b). Concentraties ultrafijnstof op het platform van Eindhoven Airport. *TNO report R11315*, Petten.

van Dinther, D., Moerman, M.M., Lollinga, J.P., van Doorn, L.B., Korstanje, T.J. (2023). Concentraties ultrafijnstof op het platform van vliegbasis Eindhoven. Report pending.

Vinković, K., Andersen, T., de Vries, M., Kers, B., van Heuven, S., Peters, W., ... & Chen, H. (2022). Evaluating the use of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based active AirCore system to quantify methane emissions from dairy cows. *Science of the Total Environment* 831, 154898.

Energy & Materials TransitionEnergy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl