

Nieuwkoopse Plassen en de Haeck

Verspreiding en depositie van stikstofhoudende
verbindingen meten en modelleren





TNO 2025 R12387 – 31 oktober 2025

Nieuwkoopse Plassen en de Haeck

Verspreiding en depositie van stikstofhoudende
verbindingen meten en modelleren

Auteurs	Arjan Hensen, Pim van den Bulk, Harmen van Mansom, Jun Zhang, Pascal Wintjen, Leon Geers, Hannah Jonas, Richard Kranenburg, Martijn Schaap, Martin van der Werff, Susanna Rutledge-Jonker, Miranda Braam, Marina Sterk, Albert Bleeker, Guðrún Thorkelsdóttir, Pim Meijer, Shelley van der Graaf, Bernadet Overbeek, Peter Laloli
Rubricering rapport	TNO Intern
Titel	TNO Intern
Rapporttekst	TNO Intern
Aantal pagina's	64 (excl. voor - en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Provincie Zuid -Holland
Projectnaam	Stikstofmeetnet Nieuwkoopse Plassen
Projectnummer	060.59334

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 en het RIVM.

© 2025 TNO en RIVM

Samenvatting

De provincie Zuid-Holland gaf TNO en het RIVM opdracht om samen een stikstofmeetnetwerk op te zetten in het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen en De Haeck (kortweg: Nieuwkoopse Plassen) en daar twee jaar te meten en te modelleren.

Het doel van de provincie is dat dit meetnetwerk

1. meer kennis oplevert over de stikstofdepositie op het gebied en inzicht geeft in
2. de herkomst van de depositie,
3. het effect van emissiereducerende maatregelen en
4. de bijdrage van vliegverkeer aan de stikstofdepositie in het gebied.

Om de gewenste inzichten te krijgen, is ervoor gekozen om lokale metingen van de concentraties en depositie van diverse stikstofverbindingen te combineren met modellering. TNO en het RIVM hebben hiervoor een uitgebreid meetnetwerk opgezet en diverse modellen klaargezet, die zullen worden gebruikt als er voldoende gegevens uit de metingen zijn.

Het meetprogramma startte in maart 2025 en is sinds mei volledig in gebruik. In deze meetperiode ligt de laagst gemeten ammoniakconcentratie tussen de 4-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, met incidentele pieken tot boven 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Op basis van de metingen is het op dit moment (najaar 2025) nog te vroeg om kwantitatieve uitspraken te doen over de fluxen en de depositieniveaus of de bijdrage van verschillende brontypen. Zodra ook de winterdata zijn toegevoegd, ontstaat een eerste indruk. Wanneer in mei 2026 data uit alle vier de seizoenen beschikbaar zijn, is het mogelijk om een heel jaar te analyseren. Daarover zijn dan de eerste conclusies te trekken. Voor een totaalbeeld is één jaar nog niet voldoende is vanwege jaar tot jaar variatie.



Figuur 1: Diverse meetopstellingen die gebruikt worden in en om het N2000 gebied Nieuwkoopse Plassen en de Haeck.

Als onderdeel van het onderzoek zijn er overzichtsberekeningen gemaakt. Deze overzichtsberekeningen uit de modellen geven een indicatie van de herkomst van de stikstofdepositie en de bijdragen van verschillende typen bronnen op jaarbasis. Deze berekeningen maken gebruik van generiek beschikbare informatie en laten zien dat de bijdrage van de verschillende bronnen binnen de eerste 5km rond het gebied 24% is. Deze is als volgt verdeeld: Landbouw 20.5%, Wegverkeer 0.9%, luchtvaart <0.05% industrie en energie <0,05%, scheepvaart 0.1% en alle overige categorieën 1.8%. Dit betekent dat als alle emissie uit het gebied binnen 5 km terug te brengen zou zijn tot 0, dan vermindert de depositie op het N2000 gebied 24%. Hoewel er nog geen specifieke scenario's zijn doorgerekend, geven deze eerste berekeningen een globale indicatie van het mogelijke bereik van emissiereducerende maatregelen.

De indicatieve berekeningen geven een eerste indruk welke reducties theoretisch haalbaar zijn met lokale maatregelen. In de loop van het project zullen de meetgegevens en nadere analyses gaan bijdragen aan een beter onderbouwd beeld van de effecten van verschillende typen maatregelen.

Dankwoord

TNO en het RIVM willen graag van de gelegenheid gebruik maken om een aantal mensen te bedanken voor hun medewerking:

- De betrokken agrariërs, vertegenwoordigers van natuurbeheerders en waterschappen die het mogelijk maken op hun bedrijven/terreinen te meten.
- De mensen uit het gebied die hun activiteiten doorgeven en daarmee waardevolle informatie aanleveren.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Begrippenlijst	7
1 Inleiding	8
1.1 Achtergrond	9
1.2 Doelen provincie Zuid-Holland	10
1.3 Onderzoeksvragen	11
1.4 Afbakening	11
1.5 Samenwerking RIVM en TNO	11
1.6 Organisatie	12
1.7 Leeswijzer	12
2 Nieuwkoopse Plassen en de Haack	13
2.1 Beschrijving omgeving	13
2.2 Natura 2000-gebied	14
3 Strategie	19
3.1 Samenhang meten en modelleren	19
3.2 Meetstrategie	20
3.3 Modelstrategie	21
4 Aanpak	22
4.1 Meetaanpak	22
4.2 Modelaanpak	27
4.3 Informatie over activiteiten in het gebied	31
5 In detail	32
5.1 Metingen in detail	32
5.2 Modellen in detail	42
6 Resultaten	52
6.1 Metingen	52
6.2 Modellen	58
7 Voortgang	61
7.1 Doel 1: Meer kennis van depositie	61
7.2 Doel 2: Welke bronnen zijn belangrijk?	61
7.3 Doel 3: Wat doen de maatregelen?	61
7.4 Doel 4: Wat is de invloed van vliegverkeer?	62
7.5 Vervolg	62
Referenties	63

Begrippenlijst

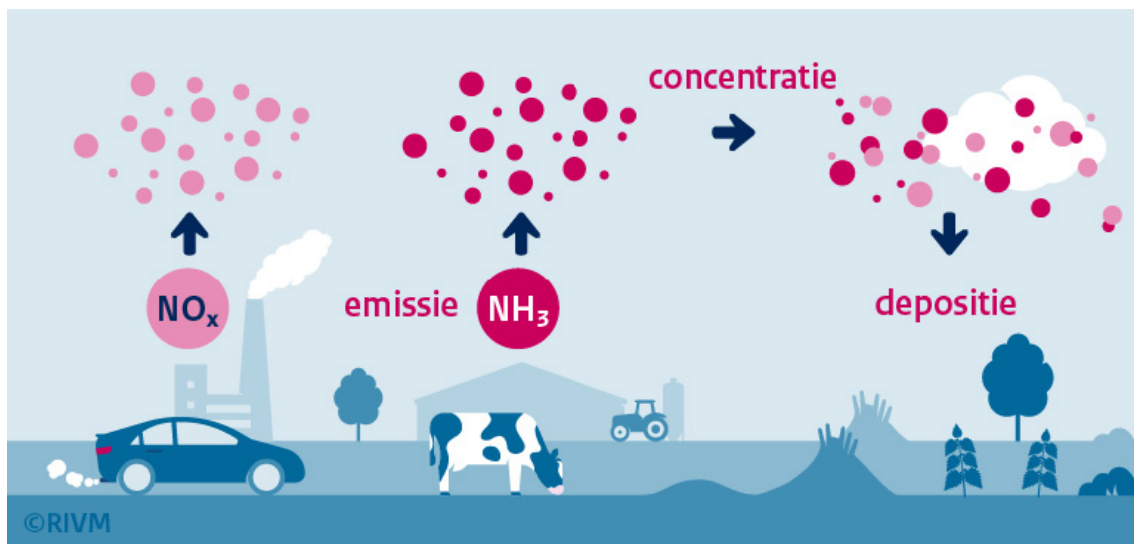
Begrip	Toelichting
Atmosferische menglaag	De onderste atmosferische laag rondom het aardoppervlak. Overdag is in deze laag een sterke menging door turbulente luchtwervels. Het opwarmen en afkoelen van het aardoppervlak beïnvloeden de hoogte (of “diepte”) en mate van turbulentie sterk.
Concentratie	De hoeveelheid gas of deeltjes in de lucht, ook uitgedrukt in microgram per kubieke meter lucht ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of in een mengverhouding zoals parts per billion, deeltjes per miljard deeltjes in de lucht (ppb) of parts per million (ppm).
Deeltjes	Vaste deeltjes of vloeibare druppeltjes in de lucht van variërende grootte. Ook aangeduid als fijnstof, particulate matter (PM) of aerosol
Depositie	De verwijdering van gassen en deeltjes uit de atmosfeer naar het oppervlak. De totale depositie bestaat uit: droge depositie en natte depositie. Vaak uitgedrukt in equivalenten per hectare per jaar (eq/ha/jr) of kilogram stikstof per hectare per jaar (kg N /ha/jr).
Depositiesnelheid (Vd)	Een maat voor de snelheid waarmee gassen en deeltjes worden verwijderd uit de atmosfeer en neerslaan op het oppervlak.
Dispersie	De verspreiding en het transport van gassen en deeltjes in de atmosfeer nadat deze uitgestoten zijn.
Droge depositie	De directe verwijdering van gassen en deeltjes uit de atmosfeer aan het oppervlak, waarbij neerslag geen rol speelt.
Emissie	De uitstoot van al dan niet verontreinigende gassen en deeltjes naar de lucht. De emissie vindt plaats vanuit een bron, zoals een schoorsteen, stal of voertuig.
Natte depositie	De verwijdering van deeltjes en gassen uit de atmosfeer (naar het oppervlak) door neerslag. Dit wordt meestal bepaald door de opname in wolken- en regendruppels en de neerslag hieruit.
NHx	Groep van gereduceerde stikstofverbindingen van soortgelijke aard, waaronder ammoniak (NH_3) en ammonium (NH_4^+).
NOx	Verzamelnaam voor de gassen NO en NO_2 , die nauw met elkaar verbonden zijn. De concentratie of emissie van NO_x is de som van de concentraties of emissies van NO en NO_2 , uitgedrukt in equivalenten NO_2 .
NOy	Groep van geoxideerde stikstofverbindingen van soortgelijke aard, waaronder NO, NO_2 , NO_3^- en HNO_3 .
Oppervlak	Grensvlak tussen de aarde en de atmosfeer. Hier wordt zowel de bodem, de wateroppervlakken en de daarop groeiende vegetatie bedoeld.
Pluim	De fysieke uiting van een gas dat zich vanuit een puntbron verspreidt.
Puntbron	Een bron met een specifieke locatie.
Reactief stikstof	Alle stikstofverbindingen behalve moleculair stikstof (N_2). Reactief stikstof is direct of indirect nodig en beschikbaar voor leven op aarde.
Turbulentie in de atmosfeer	Bewegingen van de lucht, onder andere veroorzaakt door verschillen in temperatuur, windsnelheid en de aanwezigheid van obstakels (ruwheid van het oppervlak). Turbulentie kenmerkt zich door chaotisch en onvoorspelbaar gedrag.

1 Inleiding

De provincie Zuid-Holland heeft TNO en het RIVM opdracht gegeven om samen een stikstofmeetnetwerk op te zetten in het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen en De Haeck (kortweg Nieuwkoopse Plassen). In dit gebied wordt gedurende twee jaar gemeten en gemodelleerd. Dit rapport gaat in op hoe dit wordt aangepakt.

In dit rapport worden veel (wetenschappelijke) termen gebruikt. Drie belangrijke termen die ieder op een andere manier iets zeggen over de hoeveelheid stikstofverbindingen zijn (zie ook Figuur 2):

1. Emissie: de uitstoot van stikstofverbindingen in de lucht vanuit bronnen die deze verbindingen produceren.
2. Concentratie: de hoeveelheid stikstofverbindingen die op een bepaald moment in de lucht aanwezig is.
3. Depositie: de hoeveelheid stikstofverbindingen die neerslaat op de vegetatie en op de bodem. Depositie vindt dus overal plaats. Er zijn verschillende typen depositie:
 - a. Natte depositie: de hoeveelheid stikstofverbindingen die door regen, sneeuw of hagel uit de atmosfeer wordt verwijderd,
 - b. Droge depositie: de hoeveelheid stikstofverbindingen die direct uit de lucht wordt verwijderd, bijvoorbeeld door opname door planten of de bodem.



Figuur 2: Emissie, concentratie en depositie van stikstofverbindingen (bron: RIVM)

1.1 Achtergrond

De Nederlandse emissies van stikstofverbindingen bestaan voor 61% uit ammoniak (NH_3) en voor 39% uit stikstofoxiden ($\text{NO} + \text{NO}_2 = \text{NO}_x$). Het grootste deel van de ammoniakemissies komt uit de landbouw. De emissies van stikstofoxiden komen van verschillende sectoren; de belangrijkste zijn verkeer en vervoer (43%) en industrie en elektriciteitsproductie (27%). Om adequate maatregelen en de doelmatigheid daarvan te definiëren, is helder inzicht in het gedrag van stikstofverbindingen van uitstoot tot depositie cruciaal. (TNO rapport R10757, 2024)

Het gedrag van stikstofverbindingen in de atmosfeer hangt van veel variabelen af. Het weer, de stofeigenschappen van de verbindingen en het landgebruik spelen een doorslaggevende rol. Ammoniak en stikstofoxiden verspreiden zich als pluimen vanaf de bron. Met de nieuwste technieken zijn deze pluimen van individuele bronnen steeds nauwkeuriger te meten en in kaart te brengen.

Over Nederland is een beeld te vormen van brongebieden waar verhoogde concentraties van stikstofoxiden (NO en NO_2) en ammoniak (NH_3), voorkomen. De bijdragen van individuele bronnen steken hier bovenuit. De concentraties van andere stoffen die door omzettingen in de atmosfeer gevormd worden tonen dit beeld niet. Zie ook Uitgelicht 1 hieronder.

De depositie van ammoniak is gemiddeld genomen dicht bij de bron dan de depositie van stikstofoxiden. Dat wil niet zeggen dat alle ammoniakuitstoot volledig op korte afstand deponeert. Ongeveer 25% van een ammoniakemissie slaat binnen 25 kilometer van de bron neer. Voor stikstofoxiden is dit percentage drie keer zo klein, namelijk 8%. Een teveel aan stikstof (ammoniak en stikstofoxiden) heeft een negatieve invloed op natuurgebieden en de biodiversiteit. Te veel stikstofoxiden of ammoniak in de lucht is ook schadelijk voor de gezondheid. Daarom werkt de provincie Zuid-Holland aan het terugdringen van de stikstofuitstoot. Dat is een onderdeel van de zogenaamde gebiedsgerichte aanpak.

Bovengenoemde cijfers en processen zijn gemiddelden voor het nationale beeld. Het is algemeen bekend dat lokale en regionale omstandigheden van grote invloed kunnen zijn op de uiteindelijke concentraties en deposities, maar dat de benodigde informatie om die nauwkeurig vast te stellen nu vaak nog ontbreekt. Zo is de hoeveelheid stikstof die uit de lucht op de natuur terechtkomt en de hoeveelheid die door de natuur wordt opgenomen, sterk afhankelijk van het type natuur. Uit verschillende studies blijkt de onzekerheid door die afhankelijkheid kan oplopen tot een factor 2 in de berekeningen. Verder zijn de emissiegegevens goed voor de nationale totalen maar zijn de precieze ligging van lokale bronnen en de variaties in de tijd zijn niet goed bekend. Ook dat draagt bij aan de onzekerheid van lokale schattingen.

Er is dus meer kennis over deze lokale processen nodig en dat vraagt om lokale en nauwkeurige metingen. De wens van de provincie Zuid-Holland is daarom met een regionaal meetnetwerk te meten in het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen en de Haack. Van alle Natura 2000-gebieden in Zuid-Holland is dit gebied een logische keuze omdat stikstofdepositie een belangrijke drukfactor is in dit gebied. Ook zijn er veel verschillende activiteiten met emissies van ammoniak en stikstofoxiden in de buurt van dit gebied. Daarnaast zijn nog niet eerder metingen gedaan om te bepalen hoeveel stikstof de specifieke natuur die in dit gebied voorkomt (vooral veenmosrietlanden), opneemt. Metingen in dit gebied helpen processen beter te begrijpen en daarmee modellen te verbeteren zodat een nauwkeurig beeld bepaald kan worden van de stikstofdepositie en het effect van reducerende maatregelen.

Tegelijkertijd wil de provincie Zuid-Holland subsidie verlenen aan veehouders die de ammoniakemissie in hun stal willen meten en maatregelen willen nemen om deze emissie te reduceren. Deze regeling is in april 2025 geopend en de provincie verwacht dat een redelijk aantal veehouders uit de omgeving van de Nieuwkoopse Plassen hieraan meedoet. De verwachting is dat met de stalemissiemetingen het effect van de maatregelen op de emissie te monitoren is.

Uitgelicht 1: De belangrijkste reactieve stikstofverbindingen in de atmosfeer

78% van onze atmosfeer bestaat uit het niet reactieve gas stikstof (N_2). Reactief stikstof zijn de stikstofverbindingen die direct en indirect nodig zijn voor de groei van planten. De uitstoot van reactief stikstof gebeurt vooral in de vorm van stikstofmonoxide (NO) en in de vorm van ammoniak (NH_3). Deze stikstofverbindingen gaan chemische reacties aan in de atmosfeer met stikstofhoudende reactieproducten als resultaat. Deze reactieproducten kunnen zowel in de vorm van gas als fijnstof zijn. De reactieproducten noemen we secundaire verbindingen, terwijl stoffen die aan de bron worden uitgestoten primaire verbindingen zijn.

Binnen de groep van de geoxideerde stikstofverbindingen (NO_y) is een groter aantal reactieproducten relevant dan binnen de gereduceerde stikstofverbindingen (NH_x). Voor ammoniak is alleen vorming van fijnstof (naar NH_4^+) van belang, terwijl de chemische omzetting van stikstofoxiden een reeks componenten oplevert (zoals HNO_3 , NO_3^- deeltjes, en PAN (Peroxyacynitraten)). Elk van de genoemde gasen en deeltjes heeft verschillende eigenschappen, waarvan reactiviteit en oplosbaarheid een wezenlijke rol spelen in de depositieprocessen.

- NH_x = groep gereduceerd stikstof = $NH_3 + NH_4^+$
- NO_y = groep stikstofoxiden = $NO + NO_2 + HNO_3 + NO_3^- + HNO_2 + PAN +$ tussenproducten

Wanneer wordt gesproken over de totale, droge of natte depositie van gereduceerd (NH_x) of geoxideerd (NO_y) stikstof, wordt de som van de stikstofdepositie van alle componenten in de betreffende groep bedoeld. Aangezien de gewichten van de verschillende moleculen verschillen, mag deze optelling alleen plaatsvinden in equivalenten ofwel molen van het element stikstof (N). (Mol is de eenheid voor de hoeveelheid van moleculen.)

Let op: De gasen $NO + NO_2$ worden ook aangeduid als NO_x en als stikstofoxiden, gezien al deze gasen tot de groep NO_y behoren.

1.2 Doelen provincie Zuid-Holland

De provincie Zuid-Holland formuleerde de volgende doelen voor het meetnetwerk. Bij elk doel staat een korte omschrijving. In het vervolg zal met regelmaat terugverwezen worden naar deze doelen.

1. Betere depositiebepaling voor de karakteristieke landschapkenmerken in het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen en de Haack (vooral veenmosrietlanden).
In het kort: Meer kennis van depositie
2. Meer inzicht in de herkomst van de stikstofdepositie in het Natura 2000-gebied.
In het kort: Welke bronnen zijn belangrijk?
3. Meer kennis over de relatie tussen (lokale en regionale) maatregelen gericht op emissiereductie en depositie in het Natura 2000-gebied.
In het kort: Wat doen de maatregelen?
4. Bepaling van de impact van het overvliegende luchtverkeer, omdat de vluchten van en naar Schiphol soms laag (op enkele honderden meters) overkomen.
In het kort: Wat is de invloed van vliegverkeer?

1.3 Onderzoeksvragen

De doelen van de provincie zijn vertaald naar de volgende onderzoeksvragen, waarbij doel 4 wordt gezien als een deelvraag van doel 2, omdat doel 4 over een specifieke bron gaat:

- Hoe varieert de stikstofconcentratie, in ruimte en tijd binnen het Natura-2000 gebied? Immers dit bepaalt hoeveel stikstof beschikbaar is voor droge of natte depositie.
 - Hoe ziet de seizoensgebonden en dagelijkse variatie eruit?
 - Zijn er verschillen tussen de noord-, oost-, west- en zuidzijde van het gebied?
 - Wat is het aandeel stikstof dat als een geleidelijk veranderende achtergrond over het gebied waait, en hoeveel stikstof komt binnen in kortdurende episodes met verhoogde concentraties (pluimen)?
- Hoeveel stikstof komt er via natte depositie terecht in het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen en de Haack en hoeveel stikstof neemt het ecosysteem via droge depositie uit de atmosfeer op? (Doel 1)
 - Hoe beïnvloeden vegetatiekenmerken en omgevingsfactoren (zoals plantensoort, bladoppervlak, bodemvochtigheid en temperatuur) de opname van stikstof (droge depositie) in het Natura-2000 gebied,
 - Hoe zijn de meetgegevens te gebruiken om deze opname elders beter te kunnen modelleren?
- Welke bronnen dragen bij aan de hoeveelheid stikstof die via droge depositie op het Natura 2000-gebied terecht komt en hoe verschilt dit van de herkomst van stikstof uit natte depositie? Hoeveel dragen nabij en verafgelegen bronnen bij aan de totale stikstofdepositie in het gebied? Zijn de bijdragen zichtbaar van stallen, bemeste velden, industriële bronnen en (lucht & land) verkeersbronnen. (Doel 2 en Doel 4)
- Zijn er waarneembare verschillen voor en na het invoeren van emissiereducerende maatregelen? En zo ja, hoe groot zijn deze verschillen? (Doel 3)

1.4 Afbakening

Het meetnetwerk sluit aan bij de gebiedsgerichte aanpak van het Zuid-Hollands Programma landelijk gebied (ZH PLG). Er is wel een duidelijk onderscheid te zien: het meetnetwerk is bedoeld voor wetenschappelijk onderzoek, beleidsvorming gebeurt binnen de gebiedsgerichte aanpak.

De resultaten van het meetnetwerk kunnen helpen om de stikstofproblematiek in het gebied beter te begrijpen. Zo kan dit onderzoek de gebiedsgerichte aanpak ondersteunen. Andersom kunnen kennisvragen vanuit de gebiedsgerichte aanpak worden meegenomen in het onderzoek.

Het Bestuurlijk Overleg Nieuwkoopse Plassen en omgeving wordt geïnformeerd over de plannen voor het meetnetwerk en denkt mee over de opzet ervan. De resultaten van het meetnetwerk worden gedeeld met iedereen die bij het gebied betrokken is, zodat ze gebruikt kunnen worden in de gebiedsgerichte processen.

Het meetnetwerk geeft echter geen antwoord op de vraag hoe de gebiedsgerichte aanpak moet worden ingevuld. Dat is de taak van het Zuid-Hollands Programma landelijk gebied zelf. Besluiten hierover worden genomen via het Bestuurlijk Overleg Nieuwkoopse Plassen en omgeving.

1.5 Samenwerking RIVM en TNO

Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) zet zich in voor een gezonde bevolking en een duurzame, veilige en gezonde leefomgeving voor huidige en toekomstige generaties. Als onafhankelijk kennisinstituut heeft het RIVM een belangrijke rol bij het in kaart brengen van de stikstofdepositie in kwetsbare natuurgebieden. Het RIVM beheert onder andere het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML), waarin aan stikstofverbindingen wordt gemeten en het Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden (MAN) waarin de maandgemiddelde ammoniakconcentratie in de lucht worden gemeten.

De missie van TNO is om impactvolle innovaties te creëren voor duurzaam welzijn en welvaart van de samenleving. Op het gebied van klimaatverandering en luchtverontreiniging betekent dit dat TNO methoden ontwikkelt en inzet om fijnstof, stikstofhoudende verbindingen en broeikasgassen te meten. TNO brengt daarnaast de bronnen, het transport in de atmosfeer en de chemische omzetting van stoffen en gevolgen van uitstoot in termen van depositie of blootstelling in kaart.

Beide organisaties beschikken over een uitgebreide verzameling van meetmethoden en modellen, die elkaar goed aanvullen. TNO en het RIVM werken nauw samen en delen de verantwoordelijkheid voor de uitvoering van de werkzaamheden. De taken zijn onderling verdeeld op basis van expertise, de eindresultaten en aanbevelingen worden door beide organisaties gedragen. Ook de (inhoudelijke) communicatie met de opdrachtgever en betrokken partijen is gezamenlijk.

1.6 Organisatie

De provincie Zuid-Holland is opdrachtgever van TNO en het RIVM. Het volgen van de uitvoering delegeert de provincie aan de (door haar ingestelde) klankbordgroep. Deze klankbordgroep bestaat uit een afvaardiging vanuit de provincie en de betrokken gebiedspartijen (op alfabetische volgorde: Boeren met Perspectief, gemeente Nieuwkoop, Natuurmonumenten, Provincie Zuid-Holland en Verenigde Ondernemers Nieuwkoop).

1.7 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 staat het gebied beschreven. Het detailniveau van meten en modelleren is in stappen opgebouwd vanaf hoofdstuk 3. In hoofdstuk 3 staan de hoofdpunten beschreven, hoofdstuk 4 beschrijft de aanpak en de gemaakte keuzes. Hoofdstuk 5 licht4 gebruikte technieken en methoden toe. De referenties verwijzen naar relevante wetenschappelijke publicaties.

Ook al is het meten en modelleren relatief kortgeleden gestart, toch staat er al een aantal resultaten in dit eerste rapport. Deze staan in hoofdstuk 6, zowel voor de metingen als de berekeningen.

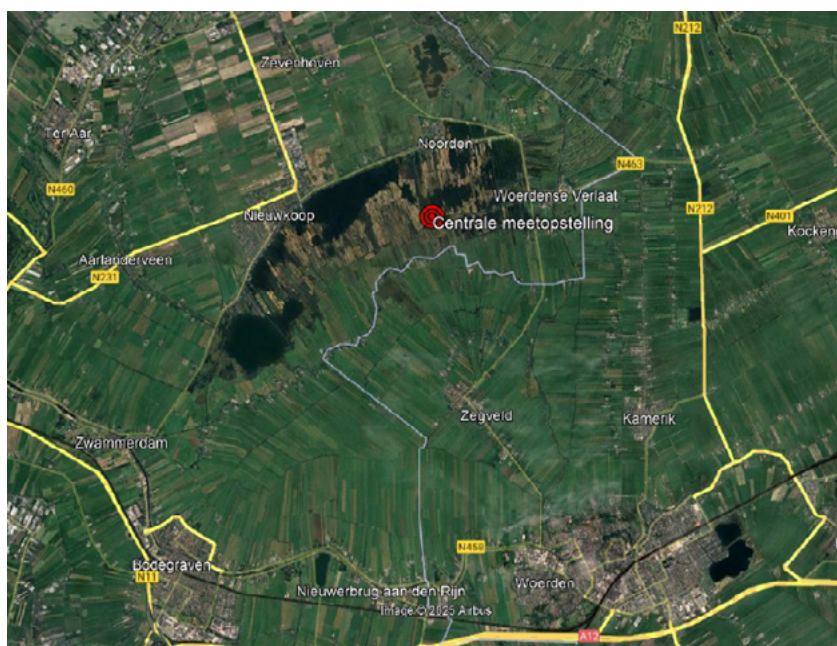
2 Nieuwkoopse Plassen en de Haeck

2.1 Beschrijving omgeving

Het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen en de Haeck (Figuur 3) ligt in/grenst aan vier gemeenten: Alphen aan den Rijn, Nieuwkoop, Woerden en Bodegraven-Reeuwijk. Het gebied is verdeeld over twee provincies: Utrecht en Zuid-Holland. In het zuiden van het gebied stroomt de rivier de Meije. Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden en Hoogheemraadschap van Rijnland zijn verantwoordelijk voor het waterbeheer.

De Nieuwkoopse Plassen worden omringd door diverse bronnen van zowel stikstofoxiden (NO_x) als ammoniak (NH_3). Rondom de plassen loopt een weg met daaraan verschillende boerderijen. Aan de zuidzijde zijn voornamelijk melkveebedrijven met overwegend grasland, terwijl aan de noordzijde meer akkerbouwbedrijven te vinden zijn.

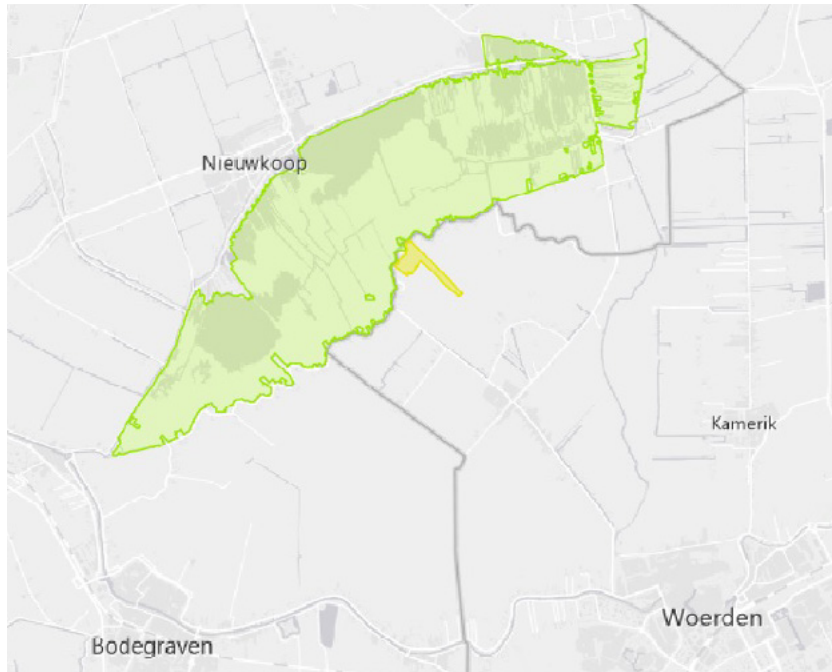
Vooral aan de noordzijde van het gebied is er bewoning, een drukke weg en zijn er watersport-activiteiten. De N11 ligt in het zuidwesten op enige afstand van het gebied, maar is mogelijk dichtbij genoeg om invloed te hebben. Ook de A12 ligt ten zuiden van het gebied. Daarnaast ligt het gebied onder een aantal vliegroutes van Schiphol, waardoor er regelmatig vliegtuigen op relatief lage hoogte overkomen. Dit zijn vertrekkende vluchten vanaf de Kaagbaan in zuidelijke richting en aankomende en vertrekkende vluchten op de Aalsmeerbaan en Zwanenburgbaan uit, respectievelijk in, zuidelijke richting.



Figuur 3: De omgeving van de Nieuwkoopse Plassen en de Haeck, met het centrale meetpunt (zie hoofdstuk 4) in rood.

2.2 Natura 2000-gebied

Het natuurgebied Nieuwkoopse Plassen en de Haeck is in januari 2014 door de Europese Commissie op de lijst van beschermde gebieden geplaatst. Het gebied heeft een totale oppervlakte van 2.008 hectare en is aangewezen als Natura 2000-gebied op basis van de Habitatrichtlijn en de Vogelrichtlijn (Figuur 4).



Figuur 4: De grenzen van het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen en de Haeck. In geel het gebied dat als Vogelrichtlijngebied is aangewezen, in groen het gebied dat zowel als vogel- als habitatrichtlijngebied is aangewezen. Bron: <https://www.natura2000.nl/gebieden/zuid-holland/nieuwkoopse-plassen-de-haeck/nieuwkoopse-plassen-de-haeck-kaart>

De Nieuwkoopse Plassen en de Haeck zijn restanten van het voormalige Hollandse kustvlakteveen. Het is een laagveenverlandingsgebied waarin - naast veenplassen met bijzondere watervegetaties - een grote oppervlakte overgangsvveen en moerasheide is gevormd (Figuur 5). Het is bovendien het meest westelijk gelegen verlandingsgebied waar lokaal nog goed ontwikkelde vegetaties van basenrijk overgangsvveen voorkomen. Karakteristieke plantensoorten voor dit gebied zijn onder andere zonnedaauw (Figuur 6), veenpluis, ronde zegge en verschillende veenmossen.

Het gebied is een belangrijk broedgebied voor moerasvogels van rietmoerassen, zoals de roerdomp, purperreiger, snor en rietzanger. Ook is het van belang voor enkele andere moeras- en watervogels, waaronder de zwartkopmeeuw en zwarte stern. Voor de zwartkopmeeuw is het zelfs de grootste broedkolonie buiten de delta. ([Nieuwkoopse Plassen & De Haeck | natura 2000](#))

Binnen de grenzen van het Natura 2000-gebied liggen ook de Meijegraslanden. Veehouders gebruiken deze deels voor beweiding en maaien. Het beheer van het Natura 2000-gebied is voornamelijk in handen van Natuurmonumenten, Staatsbosbeheer beheert een kleiner deel.



Figuur 5: Verspreiding van habitattypen en leefgebiedtypen in de Nieuwkoopse Plassen en de Haeck.

Bron: https://www.natura2000.nl/sites/default/files/PAS/Gebiedsanalyses_vigerend/103_Nieuwkoopse-plassen-en-de-Haek_gebiedsanalyse_15-12-2017_ZH_def.pdf



Figuur 6: links Zonnedauw op het centrale meetpunt in het gebied. Rechts een purperreiger (bron: Natuurmonumenten).

2.2.1 Stikstofgevoelige natuur

In het Natura 2000-gebied komen verschillende stikstofgevoelige habitattypen voor. In Tabel 1 staat een overzicht van deze habitattypen en de bijbehorende kritische depositiewaarden (KDW). De kritische depositiewaarden zijn recent (november 2023) geactualiseerd met het vrijgeven van AERIUS Monitor 2023, op basis van Europees onderzoek dat is vertaald naar de Nederlandse situatie door Wageningen University & Research (Wamelink et al., 2023). Voor twee natuurtypen in dit Natura-2000 gebied, zijn de KDW's verlaagd van 714 naar 500 mol per hectare per jaar (mol/ha/jr). Hierbij gaat het om Vochtige heiden (laagveengebied) en Overgangs- en trilvenen (veenmosrietlanden). Omdat deze typen het meest gevoelig zijn voor stikstofdepositie, is het logisch het meetnetwerk te concentreren op één van deze habitattypen. Omdat Overgangs- en trilvenen (veenmosrietlanden) het grootste oppervlak beslaan, is voor dit habitatype gekozen.

Tabel 1: Habitattypen en de bijbehorende KDW in het Natura 2000-gebied Nieuwkoopse Plassen en de Haeck.

Code	Habitatype	KDW [mol/ha/jr]	Oppervlakte [Ha]
H3140lv	Kranswierwateren, in laagveengebieden	2400	20,00
H3150baz	Meren met krabbenscheer en fonteinkruiden, buiten afgesloten zeearmen	2143	96,00
H4010B	Vochtige heiden (laagveengebied)	500	17,41
H6410	Blauwgraslanden	786	15,31
H7140A	Overgangs- en trilvenen (trilvenen)	1214	1,15
H7140B	Overgangs- en trilvenen (veenmosrietlanden)	500	167,67
H7210	Galigaanmoerassen	1429	<1,00
H91D0	Hoogveenbossen	1786	28,77
Lg02	Geïsoleerde meander en petgat	2143	2,09
Lg05	Grote-zeggenmoeras	1714	<0,10

Er worden over het algemeen twee eenheden gebruikt voor depositie, mol per hectare per jaar en kilogram per hectare per jaar. Hierbij is voor stikstof 1 kilogram/ha/jr hetzelfde als 71,4 mol/ha/jaar.

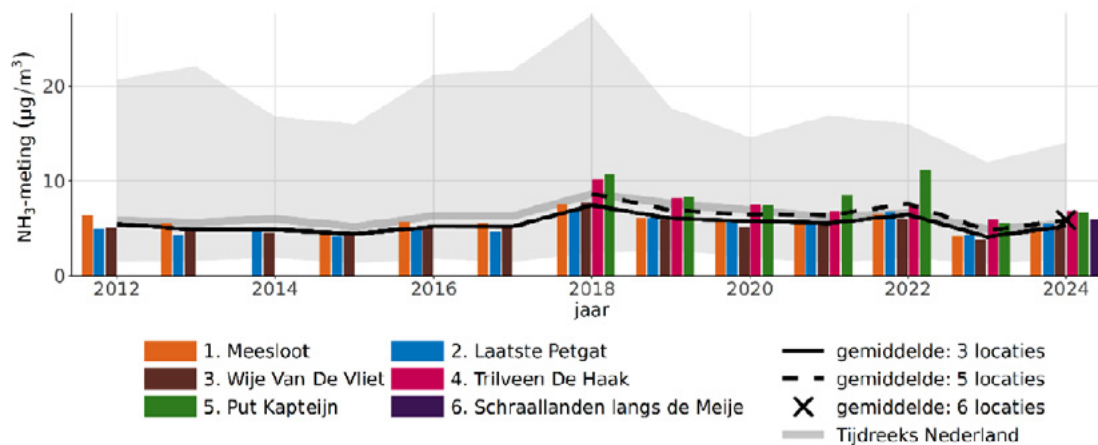
2.2.2 Reguliere metingen

Sinds 2012 worden door het RIVM ammoniakconcentraties in het Natura 2000-gebied gemeten in het Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden (MAN). Eerst op drie locaties, vanaf 2018 op vijf, en in 2024 is een zesde punt toegevoegd (Figuur 7). Figuur 8 toont de resultaten van deze metingen.



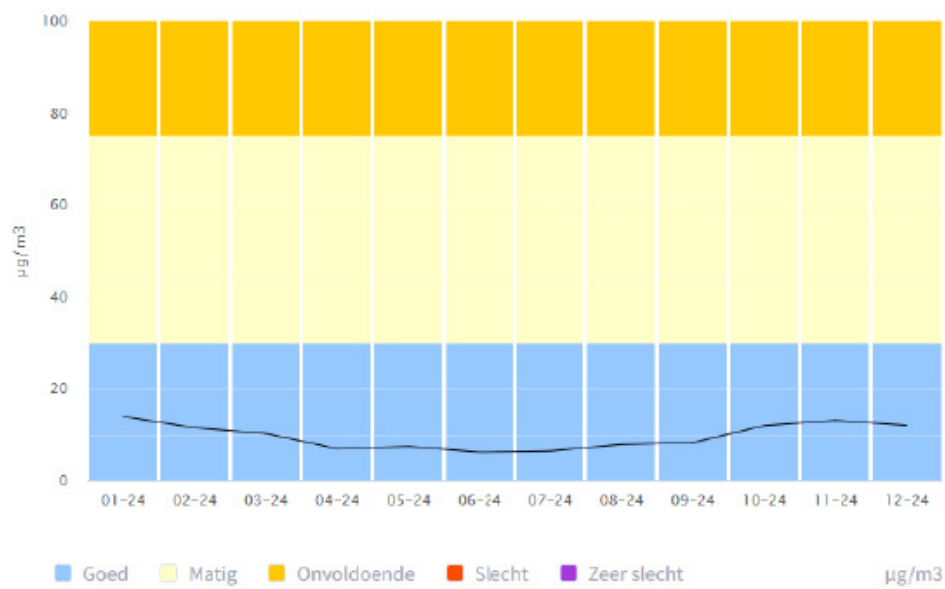
Figuur 7: De locaties van de bestaande meetpunten van het MAN.

Bron: https://man.rivm.nl/gebied/nieuwkoopse_plassen_en_de_haek



Figuur 8: Tijdreeks van jaargemiddelde ammoniakconcentraties gemeten in het kader van het MAN op de individuele meetpunten (gekleurde staven), en gemiddeld over het gebied (zwarte lijnen en kruis). In de doorgetrokken zwarte lijn het gemiddelde van meetlocaties 1,2 en 3, die al vanaf 2012 bemonsterd worden. De gestreepte lijn over meetlocaties 1 t/m 5, en het zwarte kruis het gemiddelde over alle 6 de meetlocaties. Als referentie is de gemiddelde gemeten ammoniakconcentratie in Nederland opgenomen en de spreiding rondom dat gemiddelde (in grijs) (CLO-indicator, bron <https://www.clo.nl/indicatoren/nl046115-ammoniak-in-lucht-2005-2023>).

Er werden geen andere stikstofhoudende verbindingen of stikstofdepositie gemeten in het Natura 2000-gebied. Op korte afstand van het Natura 2000-gebied staat een meetstation van het RIVM, Zegveld-Oude Meije. Sinds 2016 meet het RIVM hier diverse stoffen zoals stikstofdioxide, stikstofmonoxide, ozon, fijnstof, ammoniak en roet (respectievelijk NO_2 , NO , O_3 , PM_{10} , NH_3). Dit meetstation is onderdeel van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML). Deze meetreeksen zijn beschikbaar op www.luchtmeetnet.nl. Als voorbeeld is de jaarreeks 2024 voor NO_2 is weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9: Jaarreeks NO_2 voor het jaar 2024 van Zegveld-Oude Meije

3 Strategie

3.1 Samenhang meten en modelleren

Om inzicht te krijgen in de stikstofconcentratie en -depositie in de Nieuwkoopse Plassen wordt lokaal gemeten en gemodelleerd. Het meten en modelleren bouwt voort op de ervaring van eerdere regionale veldexperimenten zoals het Noordelijk Friese wouden project, en het Maasvlakte programma. Vanwege de volgende belangrijke overwegingen is gekozen voor de combinatie van meten en modelleren:

- Het is niet haalbaar om het hele gebied met high- end meetstations te vullen. Daarom worden modellen gebruikt om de meetresultaten van het ene deel van het terrein te vertalen in een verwachte uitwisseling in een ander deel van het terrein.
- Meetresultaten kunnen worden gebruikt om de modellen betrouwbaarder te maken en beter toegespitst op de lokale omstandigheden.
- Een lokaal meetnetwerk, in combinatie met (verbeterde) modellen, biedt de mogelijkheid scenario's door te rekenen om de effecten van toekomstige maatregelen in te schatten.

Hieronder is voor elk van de vier door de Provincie Zuid-Holland gestelde doelen (zie 1.2) aangegeven hoe meten en modelleren samen bijdragen aan het behalen van deze doelen.

- Lokale metingen geplaatst op bepaalde habitattypen die kenmerkend zijn voor de Nieuwkoopse Plassen geven inzicht in het depositieproces dat hoort bij deze habitattypen. (doel 1)
- Om in detail de bronnen van stikstof te onderzoeken, wordt gestart met overzichtsrekeningen, waarna deze in stappen worden verbeterd. Dit gebeurt door zoveel mogelijk informatie van het gebied te gebruiken, en door het meenemen van de meetgegevens van het lokale meetnetwerk. (doel 2 en 4)
- Metingen gecombineerd met modellen helpen de effectiviteit van genomen maatregelen beter te kwantificeren. Een lokale bepaling van de stikstofdepositie geeft meer zekerheid of een gerealiseerde emissiereductie daadwerkelijk leidt tot de gewenste afname van de stikstofdruk. (doel 3)
- Voor het bepalen van de impact van het overvliegende luchtverkeer worden specifieke metingen gedaan. Daarnaast volgt uit de modellen welke bijdrage te verwachten is van luchtverkeer. (doel 4)

In de rest van dit hoofdstuk worden het meten en modelleren toegelicht.

3.2 Meetstrategie

De meetstrategie is een vertaling van de doelen uit paragraaf 1.2 en de onderzoeksvragen uit paragraaf 1.3. Hieronder wordt de meetstrategie per onderzoeksvraag uitgewerkt. Op basis van deze meetstrategie is een aanpak gekozen, die wordt in hoofdstuk 4 beschreven.

Hoe varieert de stikstofconcentratie, in ruimte en tijd?

Voor deze onderzoeksvraag is het nodig om verspreid over het gebied concentratiemetingen uit te voeren met een meetfrequentie die op zijn minst seizoensgebonden variatie te zien is. Modellen kunnen de meetgegevens gebruiken om de variatie in tijd en ruimte in het gehele gebied te bepalen.

Hoeveel stikstof komt er via droge en natte depositie terecht in het Natura 2000-gebied?

Deze onderzoeksvraag is gekoppeld aan doel 1 (meer kennis van depositie). Dit vereist een zeer complex geheel van metingen, omdat een grote hoeveelheid parameters die allemaal van belang zijn bij depositie, gemeten moet worden. Door de randvoorwaarden die horen bij deze meettechnieken is de keuze gemaakt om hiervoor een “centraal meetpunt” in te richten waar al deze meetmethoden bij elkaar zijn geplaatst (zie 4.1.1). Deze depositiemetingen maken een nauwkeuriger depositieberekening (zie ook 3.3) mogelijk. De concentratiemetingen verspreid over het gebied worden vertaald naar deposities met modellen. Omdat de variaties in ruimte en tijd bekend zijn, zal de depositieberekening nauwkeuriger zijn, al blijven onzekerheden van landschapkenmerken aanwezig.

Welke bronnen dragen bij aan de hoeveelheid stikstof?

Om beter inzicht te krijgen in de emissiebronnen (doelen 2 en 4), kunnen de verspreide metingen worden gebruikt, of kunnen de metingen op het centrale meetpunt worden gecombineerd met windrichting. Deze beide leveren een basisinzicht, ter aanvulling hierop worden daarom ook mobiele metingen ingezet. Hiermee wordt als het ware de meetapparatuur langs de emissiebronnen gereden, om zo een gedetailleerd beeld te krijgen (zie 4.1.3).

Zijn er waarneembare verschillen voor en na het invoeren van maatregelen?

Op het moment dat er veranderingen te verwachten zijn in de stalemissies doordat er maatregelen zijn getroffen (doel 3), dan blijkt dat ten eerste uit de emissiemetingen die in die stal worden gedaan (geen onderdeel van dit onderzoek). In dit onderzoek wordt geprobeerd te meten of deze effecten ook in de natuur zichtbaar zijn, dit kan door de metingen op het centrale meetpunt te combineren met onder andere windrichting. Daarnaast is de verwachting dat modellen die de meetdata gebruiken hiervoor essentieel zijn, om te zorgen dat het effect onderscheiden kan worden van andere fluctuaties.

Voor het in beeld brengen van de stikstofdepositie in het gebied van de Nieuwkoopse Plassen is langs bovenstaande lijnen een regionaal meetnetwerk ingericht. Dit meetnetwerk bevat een set van verschillende meetmethoden die elkaar aanvullen. Het netwerk bestaat uit depositie- en concentratiemetingen, met nadruk op stikstofverbindingen. Ook worden campagnegewijs mobiele metingen uitgevoerd met een meetwagen. Als referentie voor dit regionale meetnet wordt het meetstation Zegveld-Oude Meije van het RIVM gebruikt (zie 4.1.4). Dit meetstation maakt deel uit van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML).

De innovatie in dit programma zit vooral in de toevoeging van mobiele metingen en het uitvoeren van droge depositiemetingen in het hart van het gebied. Dit draagt bij aan het ontwikkelen van de modelparameterisatie voor de droge depositie van ammoniak, specifiek boven veenmosrietlanden. Nooit eerder zijn er metingen gedaan die dit mogelijk maakten.

3.3 Modelstrategie

Computermodellen van de atmosfeer geven inzicht in de bronnen, atmosferische processen en het effect daarvan op lokale variaties in concentratie en depositie. Door de bijdragen van transport (windstroming), turbulentie, chemische reacties, emissies en depositie in de tijd door te rekenen, geven deze modellen een beeld van de verdeling en ontwikkeling van chemische verbindingen in de atmosfeer.

Modellen kunnen ook worden ingezet in gebieden waar meten niet mogelijk of haalbaar is, om toch een indruk te krijgen van de lokale luchtkwaliteit en depositie. Bij onderzoek naar de haalbaarheid en effecten van emissiereducerende maatregelen kunnen modellen verschillende scenario's doorrekenen, zodat de effectiviteit van maatregelen kan worden bepaald en meegenomen in de besluitvorming. Daarnaast bieden sommige modellen de mogelijkheid om de bijdrage van verschillende emissiebronnen aan de totale concentratie van luchtvervuilende stoffen in een bepaald gebied in te schatten. Op basis van deze informatie kan worden bepaald welke bronnen het eerst moeten worden aangepakt om de luchtvervuiling effectief te reduceren.

In deze modelstrategie worden de doelen uit paragraaf 1.2 en de onderzoeksvragen uit paragraaf 1.3 omgezet in de aanpak voor de modellen. De te volgen strategie bij de modellering hangt sterk af van de onderzoeksvragen. Elk model heeft zijn eigenschappen, voor- en nadelen, en toepassingsgebied. In dit onderzoek is gekozen voor vier modeltypen (uitleg in 5.2.1):

- Gaussisch pluimmodel, berekent concentraties en depositie op hoge ruimtelijke resolutie
- Chemisch Transport Model, doet berekeningen over grote gebieden over lange perioden.
- Large Eddy Simulation model, doet berekeningen met hoge tijds- en ruimtelijke resolutie
- 1-Dimensionaal depositiemodel, berekent hoeveel van de stoffen in de atmosfeer er op het land neerdalen

De modelstrategie kent drie stappen en sluit aan bij doelen 2, 3 en 4, terwijl de uitwerking van doel 1 juist waardevolle informatie kan opleveren voor de modellen.

In de eerste stap worden overzichtsberendingen gedaan, dit geeft een eerste inzicht in de herkomst van de stikstofdepositie in het Natura 2000-gebied. Dit geeft de eerste kaders van het onderzoek, omdat hieruit inzicht ontstaat in de bijdrage van verschillende soorten bronnen. In de tweede stap sluiten de modellen meer aan op de werkelijke situatie. Dit betekent dat locatiespecifieke kenmerken van het Natura 2000-gebied verder worden gespecificeerd en gedetailleerd, zowel wat betreft emissies, emissietiming als depositie. Dit leidt tot een realistischere weergave van de situatie in de modellen. De modelberekeningen die daarmee worden gedaan passen bij doelen 2 en 4. Resultaten van de metingen worden hierbij ook ingezet, net als de parametrisatie die de uitwerking van doel 1 oplevert. De derde stap is gericht op het bepalen van de effecten van emissiereductiemaatregelen, zoals de stal- en voermaatregelen (doel 3), waarbij de modelversies uit stap twee worden gebruikt.

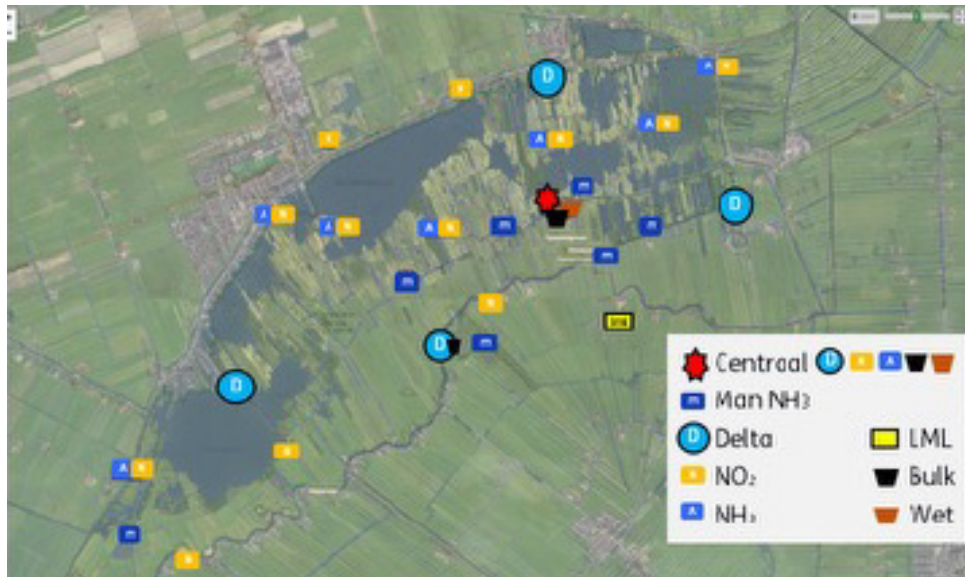
De hierboven beschreven modelstrategie bestaat uit drie stappen:

1. overzichtsberendingen,
2. verfijning van de emissiegegevens,
3. bepaling van de impact van emissiereductiemaatregelen.

4 Aanpak

4.1 Meetaanpak

Deze paragraaf beschrijft de meetaanpak: hier staat per onderdeel, zoals ‘het centrale meetpunt’ kort uitgelegd wat de gekozen locaties, de gemeten stoffen en de relatie met onderzoeksvragen en doelen zijn. Op de kaart in Figuur 10 staan de locaties van de verschillende metingen, hierin is te zien dat er een spreiding over het gebied is aangebracht.



Figuur 10: De meetlocaties in en om het Natura-2000 gebied Nieuwkoopse Plassen en de Haeck. De uitgebreide beschrijving van de verschillende onderdelen volgt in 5.1. Op het centrale meetpunt staan meerdere instrumenten, het gele vierkant is het LML-station dat als referentie dient voor NH_3 concentratiemetingen. MAN, NO_2 en NH_3 blokjes duiden op passieve samplers, Delta is de Delta denuder, Bulk en Wet zijn twee manieren die worden gebruikt om regen te verzamelen voor de bepaling van de natte depositie.

4.1.1 Het centrale meetpunt

4.1.1.1 Locatie

Het centrale meetpunt is ingericht op een locatie met een relatief groot open terrein met een voor stikstofdepositie gevoelig habitatype, waar het ook mogelijk was om een stroomvoorziening voor de meetapparatuur aan te leggen. De locatie is gekozen in overleg met de eigenaar van het terrein (Natuurmonumenten). De meetopstelling staat op habitatype H7140B Overgangs- en trilvenen (veenmosrietlanden), tenminste de eerste 40 meter rondom het meetpunt is van dit habitatype, met iets verderop in de directe omgeving ook een deel H4010B Vochtige heiden (laagveengebied; Figuur 11 onder links). Natuurmonumenten beheert het gebied rond het centrale meetpunt op twee manieren. Het oostelijke deel wordt in de zomer gemaaid (eind augustus) en het westelijke deel in de winter (dec/ jan) (Figuur 11 onder rechts). Dat betekent dat vanaf augustus tot januari er hoge en lage vegetatie is in het gebied. Andere delen in het gebied worden op dezelfde manier beheerd en dat maakt dat de bevindingen op dit terrein ook bruikbaar zijn voor de opschaling naar een groter oppervlak, omdat de gekozen locatie daarvoor ook representatief is. Het is voor de metingen voor de depositiebepaling van belang dat de langsstromende lucht over een homogeen oppervlak stroomt, en met deze locatiekeuzen en dit beheer is dat geborgd.



Figuur 11: Boven overzicht van het eiland Cyprus met daarin de afmetingen en een ingetekende cirkel met straal 20 meter rondom het centrale meetpunt. Onder links verschillende habitattypen (zie Tabel 1) rond het centrale meetpunt (rode stip). De meetmast is rondom omgeven door H7140B Overgangs- en trilvenen (veenmosrietlanden; in groen), met iets verderop H4010B Vochtige heiden (laagveengebied); in blauw. H0000 (in paars) betekent geen habitatype. Onder rechts het bovenaanzicht van het beheer rond het centrale meetpunt. In geel het riet dat in augustus 2025 gemaaid is. Blauw is riet dat in winter 2025/2026 gemaaid gaat worden. Rood is riet dat blijft staan tot zomer 2026. Donkergeel is het vlak met enige heide begroeiing.

Voor deze locatie is AERIUS Monitor (monitor.aerius.nl/monitor/introductie) geraadpleegd, om te zien welke depositie te verwachten zou zijn. De drie dichtstbijzijnde hexagonen laten zien dat volgens AERIUS Monitor de jaarlijkse depositie tussen 13,9 en 15,1 kg stikstof per hectare ligt in 2025.

4.1.1.2 Gemeten stoffen

Op basis van eerder onderzoek (Hoogerbrugge et al. RIVM, 2024) is bekend dat de droge depositie van NO_x en NH_3 de grootste bijdragen leveren aan de totale stikstofdepositie in Nederland (60-75%). Op het centrale meetpunt wordt de depositie van NH_3 gemeten, hier is voor gekozen omdat de randvoorwaarden voor het meten van NO_x niet direct konden worden ingevuld. Daarnaast is de natte depositie van NO_3^- en NH_4^+ een belangrijke bijdrage. Deze worden gemeten met een wet-only vanger en benaderd met de bulkmetingen (zie ook 5.1.5).

Op het centraal meetpunt wordt de droge depositie van ammoniak elk half uur bepaald met een eddy-correlatie systeem (voor uitleg van dit systeem zie 5.1.1). Deze opstelling meet direct de uitwisseling (ook wel 'flux') tussen de atmosfeer en het oppervlak (vegetatie/bodem). Een neerwaartse flux is het gevolg van depositie: de vegetatie neemt ammoniak op uit de atmosfeer. Een opwaartse flux is het gevolg van emissie: gas dat vrijkomt van het oppervlak.

Om meer inzicht te krijgen in de processen die spelen bij de uitwisseling van gassen met de vegetatie en bodem worden deze halfuurs ammoniak fluxmetingen gecombineerd met micro-meteorologische, plant- en bodemmetingen (zie 5.1.2). Denk aan windrichting en windsnelheid, verdamping, CO_2 flux maar ook hoeveel bladoppervlak er beschikbaar is om CO_2 en ammoniak op te nemen uit of af te geven aan de langsstromende lucht. De maat hiervoor is de *leaf area index* ofwel LAI.

Ook worden methaanconcentraties (CH_4) en fluxen gemeten in nauwe samenwerking met de Vrije Universiteit van Amsterdam voor het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV). De complete meetopstelling is te zien in Figuur 12.



Figuur 12: De meetopstelling bij het centrale meetpunt na installatie in maart 2025. Op de voorgrond, in het wit, de wet-only vanger waarmee natte depositie wordt gemeten. Rechts daarnaast de bulkvanger voor bulk depositie. Daarachter de meetmast met de eddy correlatie opstelling (zie 5.1.1), inclusief de biometeorologische instrumenten (zie 5.1.2). In deze tijd van het jaar is de vegetatie overal kort want recent gemaaid.

4.1.1.3 Waarde voor het onderzoek

De combinatie van een groot deel van deze metingen draagt direct bij aan doel 1: het beter beschrijven van het droge depositieproces voor veenmosrietlanden. Deze flux-, met micro-meteorologische, plant- en bodemmetingen kunnen namelijk gebruikt worden als input voor modellen zoals DEPAC-1D (zie voor een beschrijving van dit model 5.2.2.6). Dit draagt bij aan het verbeteren en nauwkeuriger maken van de berekeningen van de modelparameterisatie voor de droge depositie, van ammoniak specifiek boven

veenmosrietlanden. Nooit eerder zijn er metingen gedaan die dit mogelijk maakten. Tegelijkertijd is het grootste deel van deze informatie ook nodig om te helpen bij het inschatten van het relatieve belang van verschillende bronnen (doel 2). Door de metingen over langere tijd te laten lopen (verscheidene jaren) en te kijken naar de veranderingen van jaar tot jaar is hopelijk het effect van maatregelen te zien (doel 3).

De metingen van de natte depositie zijn nodig voor het bepalen van de totale stikstofdepositie (doel 1).

Methaan is om verschillende redenen belangrijk. Zo kan het helpen om voor ammoniakpluimen die de meetmast passeren te kunnen vertellen of deze afkomstig zijn van stallen of van andere bronnen (doel 2), dit wordt toegelicht in 5.1.1.

4.1.2 Metingen verspreid over het gebied

Verspreid over het gebied worden metingen met verschillende technieken uitgevoerd. Het gaat om passieve samplers (Palme buisjes, Delta denuders, bulkvangers en wet-only vangers) gebruikt. De uitleg van deze meetmethoden staat in paragraaf 5.1.3 tot en met 5.1.5,

4.1.2.1 Locaties

De meetlocaties van de passieve samplers en bulkvangers zijn zo gekozen dat ze goed verdeeld over het gebied liggen. Hierbij is rekening gehouden met praktische overwegingen als toegankelijkheid voor de maandelijkse wisseling van buisjes en flessen. Ook de Delta denuders zijn over het gebied verdeeld. Ze zijn te vinden op de centrale meetlocatie, ten noordwesten, noordoosten, zuidwesten en zuidoosten van het gebied. Hiermee zijn deze punten deels dicht bij de landbouwbedrijven dan het centraal gelegen meetstation en deels wat verder daarvandaan. De Delta denuders hebben stroom nodig, dat kan met een accu maar in dit onderzoek zijn locaties gekozen waar stroom beschikbaar (gemaakt) is.

4.1.2.2 Gemeten stoffen

Verspreid over het gebied meten passieve samplers de luchtconcentratie van NH_3 en NO_2 (voor NH_3 op 17 nieuwe locaties, voor NO_2 op 11 nieuwe locaties). Ook staan er vijf Delta denuders verdeeld over het gebied.

De Delta denuders meten, naast NH_3 en NO_2 concentratie ook de concentraties van andere stikstofhoudende gassen en deeltjes (met name HNO_3 en $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ -aerosol), zodat een volledig beeld van de reactieve stikstof in het gebied ontstaat.

Verder wordt in het gebied de natte depositie gemeten met een wet-only vanger (centraal meetpunt) en bulkvanger (centraal meetpunt en een andere locatie)

4.1.2.3 Waarde voor het onderzoek

De passieve samplers zijn een uitbreiding op de bestaande locaties van het MAN. De extra meetpunten geven een veel uitgebreider beeld van de ruimtelijke variatie van de maandgemiddelde NH_3 en NO_2 concentratie over het gebied. Deze extra meetpunten leveren lokale inputgegevens voor modellen. De meetresultaten helpen om de opschaling naar andere locaties vanuit de dataset van het centrale meetpunt te verbeteren.

De stoffen die met de delta denuders worden gemeten geven informatie over het type bronnen dat die maand een bijdrage leverde aan de bemonsterde lucht. Zo geeft Na^+ en Cl^- aan dat er zeezout in de lucht zat, en kan de combinatie van Ca^{2+} en SO_4^{2-} (Gips) in de lucht afkomstig zijn van processen waarbij gebruik gemaakt wordt van een ontzwavelingsinstallatie (doel 2).

De vergelijking van de Delta denuder NH_3 data en passieve samplers met de NH_3 metingen op het centrale station is belangrijk om te zien of de meetresultaten van de verschillende instrumenten onderling overeenkomen en om, indien nodig, de tijdreeksen op verschillende plekken met verschillende technieken vergelijkbaar te maken.

4.1.3 Mobiele metingen

4.1.3.1 Locatie

Vanzelfsprekend is de locatie van een meetwagen niet vaststaand. De route van de meetwagen wordt afgestemd op de verwachte windrichting. De mobiele metingen met de meetwagen geven al rijdend over de weg een momentopname van alle type bronnen die op dat moment bovenwinds van de meetwagen actief zijn. Zoals een gaslek, een auto, een mestopslag, een stal, houtbewerking, stedelijk gebied bronnen, groepen dieren in het veld.

4.1.3.2 Gemeten stoffen

De meetwagen beschikt over een uitgebreid arsenaal aan meettechnieken, waardoor de concentraties van een groot aantal stoffen tegelijkertijd te meten zijn. In dit geval worden concentratie van Ammoniak (NH_3), koolstofdioxide (CO_2), Methaan (CH_4), lachgas (N_2O), koolstofmonoxide (CO), Stikstofmonoxide (NO) en Stikstofdioxide (NO_2) gemeten.

4.1.3.3 Waarde voor het onderzoek

Omdat de concentratiemetingen van de passieve samplers en Delta denuders maandwaarden zijn, is het moeilijk de bijdrage van individuele bronnen te identificeren. Deze mobiele metingen duren ongeveer een dag en worden met enige regelmaat uitgevoerd en dragen zo bij aan doel 2. Bij herhaling van mobiele metingen is mogelijk ook het effect van emissiereductiemaatregelen te zien (doel 3). Het is nog onderdeel van het onderzoek hoeveel mobiele metingen hiervoor nodig zijn, dit gebeurt in een project van het ministerie van LNVN (OROS). De mobiele metingen worden ook ingezet om de impact van luchtverkeer waar te nemen. Op basis van de eerste resultaten wordt gekeken of continue metingen daarvoor bruikbaar zijn (doel 4).

4.1.4 Referentiemeetpunt Zegveld

4.1.4.1 Locatie

Op een nabijgelegen meetlocatie in Zegveld staat meetapparatuur van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit van het RIVM (LML; <https://www.luchtmeetnet.nl/>).

De locatie heet voluit Meetstation Zegveld-Oude Meije. Deze locatie is al enige jaren in gebruik en de locatiekeuze was dus al gemaakt voordat er sprake was van dit onderzoek.

4.1.4.2 Gemeten stoffen

Een miniDOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) meet op dit meetpunt de uurgemiddelde ammoniakconcentratie. Daarnaast worden ook stikstofmonoxide, stikstofdioxide, fijnstof, ozon en roet gemeten.

Net als de locatie was de keuze voor de stoffen al gemaakt voor de start van dit onderzoek.

4.1.4.3 Waarde voor het onderzoek

Deze meetresultaten worden binnen het regionale meetnet gebruikt als referentie om de metingen van de passieve samplers en Delta denuder metingen mee te vergelijken. Ook voor de kwaliteitsborging en eventuele ijking van de meetapparatuur voor ammoniakconcentratie op het centrale meetpunt worden de miniDOAS concentraties gebruikt. Dit wordt gedaan door met de meetwagen naast het referentiemeetpunt te meten en vervolgens zo dicht mogelijk bij het centrale meetpunt.

4.2 Modelaanpak

De modelstrategie bestaat uit drie stappen: (1) overzichtsberoeeningen, (2) verfijning van de emissiegegevens en (3) bepaling van de impact van emissiereductiemaatregelen. Hieronder worden deze drie stappen nader toegelicht.

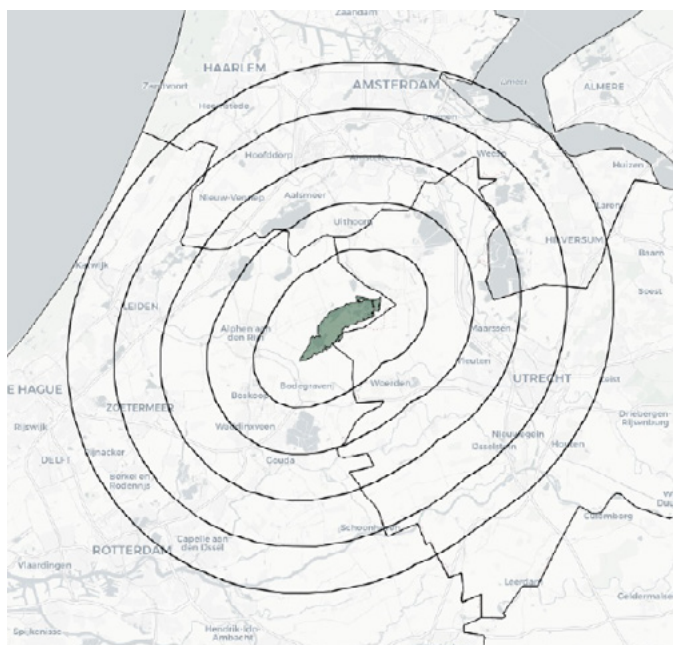
Stap 1: Overzichtsberoeeningen

Om een eerste indruk te krijgen van de reikwijdte van de invloed van bepaalde emissies binnen en buiten het domein (passend bij doelen 2 en 4) op basis van generieke en standaardgegevens, worden zogenaamde overzichtsberoeeningen uitgevoerd met OPS-LT (uitleg in 5.2.2.3) en LOTOS-EUROS (uitleg in 5.2.2.1) voor het jaar 2022. Daarbij wordt gekeken op welke delen van het gebied emissies binnen het domein en binnen de provincie invloed uitoefenen, en op welke delen dit niet het geval is. De instellingen van deze berekeningen dienen ook als benchmarksimulatie voor de verbeteringen in stap 2 Modelverbeteringen.

De emissies uit verschillende sectoren en regio's krijgen een label, zodat kan worden nagegaan van welke sector of regio de stikstofdepositie op elke locatie in het domein afkomstig is. De volgende regio-indeling wordt hierbij gebruikt:

1. Buitenland
2. Nederland
3. Zuid-Holland
4. Omgeving Nieuwkoopse Plassen en de Haeck

Voor het bepalen van de afbakening van het locatielabel *Omgeving Nieuwkoopse Plassen en de Haeck*, wordt gebruikgemaakt van het model OPS-LT. Een belangrijk voordeel van OPS-LT is dat locatielabels achteraf kunnen worden toegekend, terwijl deze in LOTOS-EUROS vooraf vastliggen. In de analyse worden afstanden van 5 tot en met 25 kilometer toegepast, in stappen van 5 kilometer, zoals te zien is in Figuur 13. De resultaten hiervan worden besproken in sectie 6.2.1.



Figuur 13: De afstanden 5 tot en met 25 km, in stappen van 5 km, ten opzichte van het Natura 2000-gebied. Deze gebieden worden onder andere gebruikt om de locatielabel *Omgeving Nieuwkoopse Plassen en de Haeck* te bepalen.

Daarnaast is er een sectorindeling voor de NO_x- en NH₃-emissies uit Nederland. De sectorindeling is:

1. Agrarische Sector
 - a. Stallen
 - b. Veldemissies
 - c. Landbouw Overig
2. Scheepvaart
3. Wegverkeer
4. Energie en Industrie
5. Luchtvaart
6. Overig

Overzichtsberoeeningen die informatie geven over de herkomst van stikstofdepositie in natuurgebieden zijn ook te vinden in DASHview (Dashboard herkomst stikstofdepositie, bereikbaar via dashview.rivm.nl). De informatie in dit dashboard is echter niet volledig toereikend voor dit onderzoek, omdat de ruimtelijke resolutie van de emissies minder gedetailleerd is en de indeling van de emissiecategorieën kan afwijken. Hierdoor is het niet mogelijk om de gegevens direct te vergelijken of gelijk te trekken met LOTOS-EUROS. Voor beleidsmakers is DASHview echter wel een bruikbaar hulpmiddel om snel inzicht te krijgen in de herkomst van stikstofdepositie in natuurgebieden. De uitkomsten van de berekeningen met OPS zullen bovendien worden vergeleken met de DASH-dataset om te verifiëren of de berekeningen correct zijn uitgevoerd.

Stap 2: Verfijning van de emissiegegevens

Het doel van deze stap is het verbeteren van de emissiegegevens voor het omliggende gebied en van de procesbeschrijving in de droge depositiemodule voor het Natura 2000-gebied, om zo doelen 2 en 4 te behalen. Hiermee worden de modellen geprepareerd om zo goed mogelijk te presteren in de derde stap, het bepalen van de impact van emissiereductiemaatregelen (doel 3).

Toesnijden van de emissie-informatie op het studiegebied

Hierbij horen de volgende vier taken: het downscalen (terugbrengen in schaalniveau) van de emissies van Emissieregistratie, de detaillering van de temporele en ruimtelijke variatie van emissies, de analyse van puntbronsterkte en pluimdynamiek met DALES (uitleg in 5.2.2.5), en het evalueren van de impact van deze detailleringen in de emissieset in LOTOS-EUROS en OPS-LT.

1. Downscalen van de ER-emissies

De Emissieregistratie (ER) maakt gebruik van proxykaarten om nationale emissietotalen om te zetten naar een kaart met rasters. Deze proxykaarten kunnen emissiewaarden geven die niet overeenkomen met de werkelijkheid binnen het studiegebied. Zo wordt bijvoorbeeld een deel van de emissies uit de scheepvaart homogeen toebedeeld aan alle vaargebieden in Nederland, waardoor de emissies voor de vaargebieden in de Nieuwkoopse Plassen evenredig zijn aan die in andere delen van het land. Vanwege de beschermde status van het Natura 2000-gebied is deze toedeling niet representatief voor de werkelijkheid. Daarom wordt onderzocht in hoeverre de kaart overeenkomt met lokale bronnen en activiteiten (zoals wegen, boeren, jachthavens en dorpen), zodat ontbrekende of onjuist geplaatste emissies kunnen worden geïdentificeerd en gecorrigeerd.

2. Detaillering van de temporele en ruimtelijke variatie van emissies

Door het verfijnen van de temporele en ruimtelijke variatie van emissies, met specifieke aandacht voor agrarische bronnen zoals stallen en bemesting, kunnen piekmomenten van emissies beter worden weergegeven. Bijvoorbeeld door emissiemodellen te koppelen aan beschikbare stalemissies en informatie over bemestingsactiviteiten, kunnen deze emissiemomenten realistischer in het systeem worden opgenomen. Indien voldoende registraties en metingen beschikbaar zijn in het Natura 2000-gebied, kunnen emissiekaarten en tijdsprofielen voor 2025–2026 verder worden gedetailleerd. Observaties van concentratiepieken via stationaire en mobiele metingen bieden mogelijk ook aanvullende informatie over bronsterkte en timing, wat kan leiden tot een nauwkeuriger beeld dan de huidige ER-kaarten en Copernicus Atmosphere Monitoring Service TEMPoral profiles (CAMS-TEMPO) profielen.

3. *Puntbronsterkte en pluimdynamiek-analyse met DALES*

De vernieuwde emissiekaarten kunnen worden gebruikt voor hogeresolutieberekeningen met DALES, zodat de dynamiek van emissiepluimen in detail kan worden gevolgd. De DALES-berekeningen worden gedaan op een aantal dagen met kwalitatief goede stationaire en mobiele metingen. De combinatie van modellen en metingen kan zorgen voor een verbetering van de interpretatie van de dynamiek.

4. *Validatie: impact van detaillering van de emissieset*

Op basis van de vernieuwde emissiekaart worden LOTOS-EUROS-simulaties uitgevoerd op een resolutie van 500 x 500 meter over de Nieuwkoopse plassen, met de labels zoals die van toepassing waren in 2023. Deze resultaten worden vergeleken met de uitkomsten van stap 1 om een verbeterd inzicht te krijgen in de brontoekenning.

Depositiemodellering

Het doel is om de beschrijving van het depositieproces in de depositiemodule te verbeteren voor de specifieke landgebruiks- en vegetatieklassen, namelijk de veenmosrietlanden en de laagveengebieden, in het Natura 2000-gebied (aansluitend bij doel 1). Hiertoe wordt gebruik gemaakt van een combinatie van de experimentele fluxmetingen en het DEPAC1D-model (zie ook 5.2.2.6). Deze modelverbetering bestaat uit de volgende drie taken:

1. *Documenteren van de beschrijving van de droge depositieberekeningen in de verschillende modellen.*

Om inzicht te krijgen in de verschillen tussen implementaties van DEPAC1D, wordt eerst de beschrijving van droge depositieprocessen in verschillende modellen gedocumenteerd. Hierbij wordt gekeken naar de omgang met landgebruik, stabiliteitsberekeningen, vegetatiekenmerken en de onderliggende procesbeschrijvingen. Vervolgens kunnen depositieparameters voor het jaar 2025 worden berekend, met een eerste validatie op basis van experimentele fluxmetingen.

2. *Afleiden van een nieuwe parametrisatie op basis van experimentele fluxmetingen*

Op basis van experimentele fluxmetingen in het Natura 2000-gebied wordt een nieuwe parametrisatie afgeleid met het DEPAC1D-model, specifiek afgestemd op de lokale vegetatie onder verschillende weersomstandigheden. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen depositie naar bodem/water en naar vegetatie via de huidmondjes (stomata). De rol van het compensatiepunt kan dan worden meegenomen om de depositieprocessen mogelijk nauwkeuriger te beschrijven.

3. *Implementatie en validatie van de nieuwe depositie parametrisatie*

De nieuwe depositieparametrisatie wordt geïmplementeerd in de onderzoeksversie van OPS, DALES en LOTOS-EUROS. Vervolgens worden de concentratie- en depositiewaarden vergeleken met de benchmarksimulaties uit stap 1. Daarnaast worden de modelresultaten gevalideerd aan lokale concentratie- en depositiewaarden uit het meetnetwerk in het Natura 2000-gebied.

Validatie van het verbeterde emissie- en depositiemodel

Tot slot worden de verbeterde emissie- en depositiebeschrijvingen geëvalueerd in simulaties voor het jaar 2025. Ze worden vergeleken met de benchmarksimulaties uit stap 1. Deze simulaties maken het mogelijk om het gecombineerde effect van beide verbeteringen te identificeren. Ook kunnen deze modelresultaten worden vergeleken met lokale concentratie- en depositiewaarden uit het meetnetwerk in het Natura 2000-gebied. De uitkomsten van deze simulaties dienen tevens als referentie voor scenarioanalyses in stap 3, waarin geen aanvullende maatregelen zijn opgenomen.

Stap 3: Impact van emissiereductiemaatregelen

Met OPS-LT- en LOTOS-EUROS-simulaties, inclusief labels, is het mogelijk om de brontoekenning van de depositie per gebied rondom de Nieuwkoopse plassen te identificeren en de effectiviteit van verschillende maatregelen te beoordelen.

Een mogelijke scenario-indeling, met bijbehorende inschatting van de emissies, omvat:

1. Het doorvoeren van stal- en voermaatregelen;
 2. Het doorvoeren van mestuitrijmaatregelen;
 3. Het doorvoeren van beide bovengenoemde maatregelen;
 4. Het doorvoeren van alle maatregelen, aangevuld met de NEC-reductiescenario's voor 2030 (Europese richtlijn voor reducties van NO_x, NMVOCs (Non-methane volatile organic compounds), SO₂ en NH₃).
- Deze maatregel zal met name effect hebben op de achtergrondconcentraties in het gebied.

Alle scenarioresultaten worden vergeleken met de validatiesimulaties uit stap 2, met specifieke aandacht voor de brontoekenning van depositie rondom de Nieuwkoopse Plassen en de Haeck.

4.2.1 Modelarsenaal

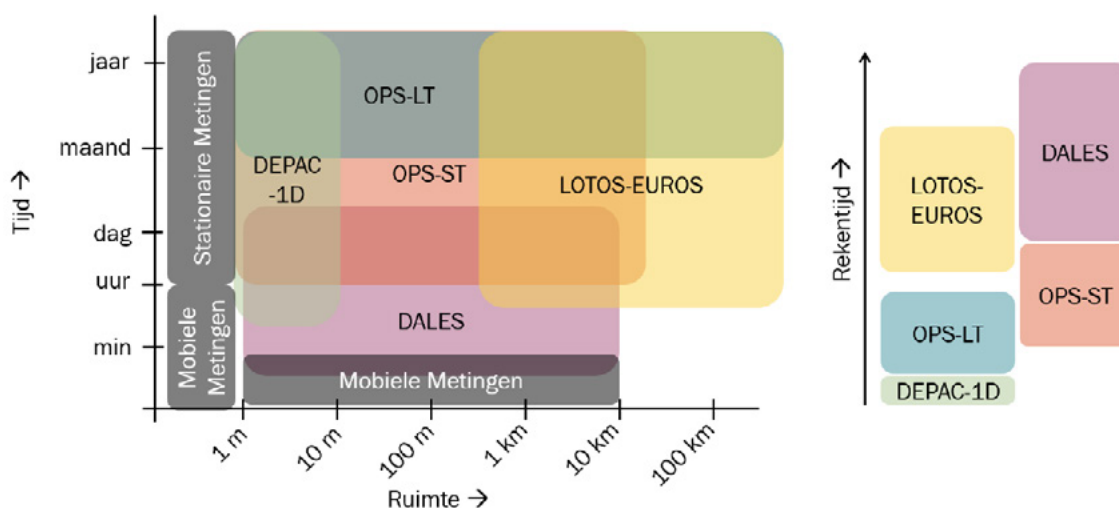
In dit onderzoek worden verscheidene modellen gebruikt. Tabel 2 geeft een overzicht van deze modellen.

Tabel 2 Beknopt overzicht van de gebruikte modellen.

	LOTOS-EUROS	OPS-LT	OPS-ST	DALES	DEPAC
Ruimtelijke resolutie	500 x 500m en groter	Continu	Continu	1 x 1 m en groter	1-dimensionaal
Tijdsresolutie	Uurlijks	Jaarlijks/maandelijks	Uurlijks	Seconden	Seconden
Type	Euleriaans	Lagrangiaans	Lagrangiaans	Euleriaans	Parameterisering
Principe	Chemisch transport-model	Gaussisch pluimmodel	Gaussisch pluimmodel	Large Eddy Simulation model	Depositiemodel
Rekentijd	Dagen	Minuten	Uren	Dagen	Seconden

Figuur 14 geeft schematisch de samenhang tussen de gebruikte modellen en de metingen weer. In het schema is aangegeven op welke tijd- en ruimteschalen de modellen rekenen en op welke resolutie metingen verricht worden. Sommige metingen hebben een ruimteschaal van één meter of minder (links in Figuur 14); deze metingen worden immers op één locatie of langs één traject gedaan. Andere hebben een veel groter werkgebied, zie hiervoor ook 5.1, om het figuur overzichtelijk te houden, is dat niet ingetekend. De mobiele metingen hebben een korte tijdschaal, van een uur of korter. De statische metingen geven jaarrond output per seconde, per uur, dag of maand, afhankelijk van de techniek.

De modellen rekenen op ruimteschalen vanaf enkele meters tot 100 kilometer.



Figuur 14: Schematische weergave van de samenhang van modellen en metingen. Links, schematische weergave van de tijd- en ruimteschaal van modellen en metingen. Rechts, schematische weergave van de duur van de rekentijd.

De modellen LOTOS-EUROS en OPS-LT geven inzicht in de langere termijn (orde maanden-jaren). Ze kunnen bijvoorbeeld worden gebruikt voor trendanalyse en om het verband te kunnen begrijpen tussen meetresultaten op verschillende locaties. LOTOS-EUROS en OPS-LT vullen elkaar aan als het gaat om lokale en regionale trends. Hierbij heeft LOTOS-EUROS het voordeel dat chemische processen in de atmosfeer expliciet berekend worden, wat een hogere nauwkeurigheid geeft in de schatting van concentraties en depositie. OPS-LT kan daarentegen weer verder inzoomen op locaties dan LOTOS-EUROS, waardoor een hogere ruimtelijke resolutie haalbaar is. Met beide modellen kunnen de bijdragen van specifieke bronnen aan concentraties en depositie bepaald worden. Met OPS-LT is het mogelijk om snel verschillende scenario's door te rekenen, terwijl LOTOS-EUROS een hoger oplossend vermogen geeft in tijd, bijvoorbeeld als het gaat om de dagelijkse gang. LOTOS-EUROS vergt echter meer rekentijd dan OPS-LT.

De modellen DALES en OPS-ST richten zich vooral op de hoge tijds- en ruimtelijke resolutie. Deze modellen zijn geschikt voor het inschatten van korte-termijntrends en de effecten van incidentele verschijnselen, zoals bemesting. Met OPS-ST kunnen daarnaast ook bijdragen van specifieke bronnen worden ingeschat. DALES geeft een beter beeld van het effect van turbulentie door wind, doordat de turbulentie expliciet wordt berekend in dit model. In combinatie met mobiele metingen kunnen beide modellen worden gebruikt in de analyse van pluimen afkomstig van specifieke bronnen, bijvoorbeeld voor het lokaliseren van deze bronnen en de bepaling van hun sterkte.

4.3 Informatie over activiteiten in het gebied

Om meetresultaten te verklaren en input voor de modellen te verzamelen is informatie over het gebied en de activiteiten in het gebied essentieel. Te denken valt aan natuurbeheerders die doorgeven welk beheer wordt uitgevoerd (en waar en wanneer), of boeren die laten weten wanneer het bemesten van percelen met dierlijke mest of kunstmest en het oogsten van gewassen plaatsvindt. Of informatie van bewoners die de onderzoekers helpen met het identificeren van vliegroutes en meetlocaties. Ook de metingen die in stallen worden gedaan als onderdeel van het subsidieprogramma van de provincie en de maatregelen die in deze stallen worden genomen bieden zeer waardevolle informatie voor het onderzoek.

Een deel van deze informatie is eenmalig op te halen (onder andere vliegroutes). Een deel kan via een automatische koppeling opgehaald worden (de stalmetingen). Bemesten, maaien en oogsten worden regelmatig gedaan door een relatief grote groep. Deze grote hoeveelheid informatie kan via een app doorgegeven worden.

Tot op heden is het nog niet gelukt om deze informatie structureel binnen te krijgen. De hoop is dat de eerste resultaten die nu beschikbaar zijn beter en concreter laten zien waarvoor de activiteitgegevens nodig zijn, en dat het daardoor wel lukt die informatie op te halen.

5 In detail

5.1 Metingen in detail

Hieronder volgt per type meting een beschrijving van de gebruikte apparatuur en het meetprincipe en eventueel belangrijke randvoorwaarden. Details over de apparatuur, zoals merk en type, zijn te vinden in Tabel 3. In Figuur 15 staat een groot aantal meetopstellingen weergegeven.



Figuur 15: Diverse meetopstellingen in één figuur: links boven passieve sampler, links midden de meetwagen naast het referentie meetpunt Zegveld, links onder een delta denuder, in het midden de diverse opstellingen op het centrale meetpunt, met rechtsboven een detail,

Tabel 3 Overzicht van de verschillende meetmethoden

Meting	Meet frequentie	Locaties*	Toepassing	Uitvoerder
Alleen op centrale meetlocatie				
Healthy Photon, HT8700	0,1 sec	CM	NH ₃ concentratie & flux	TNO
LiCOR LI-7500DS open pad sensor	0,1 sec	CM	CO ₂ / H ₂ O concentratie & flux	TNO
LiCOR Li-7700 Open pad sensor	0,1 sec	CM	CH ₄ concentratie & flux (link met NOBV programma)	VU TNO
Gill Windmaster 3D Ultrasonic Anemometer	0,1 sec	CM	Windsnelheid, windrichting, temperatuur	TNO
Vaisala Weather Transmitter W1T520	10 sec	CM	Regen hoeveelheid, regen intensiteit, regen tijdsduur, relatieve vochtigheid, temperatuur, luchtdruk, windsnelheid, windrichting	TNO
LiCOR 7900-180	10 sec	CM	Bodemtemperatuur sensor	TNO
IMKO Trime PICO-32	10 sec	CM	Bodemvocht sensor	TNO
Apogee SI-411 Infrarood Radiometer sensor	10 sec	CM	IR- oppervlak temperatuur sensor	TNO
Decagon LWS	1 min	CM	Bladnat sensor	TNO
Handmatig met LICOR LI-2200	bij veldbezoek	Random CM	Leaf Area Index	TNO
Handmatig met grashoogtemeter	bij veldbezoek	Random CM	Gewashoogte	TNO
Maandmetingen				
Delta denuder	Maand	CM + 4 door gebied	Concentratie van gassen NH ₃ , NO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂ , en aerosolen NH ₄ ⁺ NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻	TNO
Gradko passieve sampler	Maand	6 MAN + CM + 16 nieuw	NH ₃ concentratie	RIVM
Buro Blauw passieve sampler	Maand	CM + 10 door gebied	NO ₂ concentratie	RIVM
Eigenbrodt Wet-only vanger	Maand	CM	Natte depositie NO ₃ ⁻ , NO ₂ , NH ₄ ⁺	TNO en RIVM
Bulkvanger	Maand	CM + 1 elders in gebied	Natte- en (deels) droge depositie NO ₃ ⁻ , NO ₂ , NH ₄ ⁺	TNO en RIVM
Referentiemetingen NH ₃ concentratie				
miniDOAS	Uur	Zegveld	NH ₃ concentratie	RIVM
Mobiele metingen				
Aerodyne laser	1 sec	Mobiel	CO ₂ , H ₂ O, CH ₄ , C ₂ H ₆ , CO, N ₂ O	TNO
MIRO laser	1 sec	Mobiel	NO, NO ₂ , SO ₂ , CH ₄ , CO ₂ , O ₃ , N ₂ O	TNO
Healthy Photon HT8700	1 sec	Mobiel	NH ₃	TNO
GPS/Wind	1 sec	Mobiel	positie windsnelheid / richting	TNO

*CM = centraal meetpunt

5.1.1 Eddy correlatie – droge depositie

De eddy correlatie meetopstelling (Figuur 16) op het centrale meetpunt wordt gebruikt om continu in de tijd te meten aan

1. concentraties: dus hoeveel gas er in de lucht hangt, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of in ppb dan wel ppm. Dit gebeurt met 10 metingen per seconde voor NH_3 , CH_4 , CO_2 en H_2O .
2. fluxen: de uitwisseling van het gas tussen het landoppervlak en de atmosfeer in $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ en opgeteld bijvoorbeeld $\text{kg}/\text{ha}/\text{jaar}$.

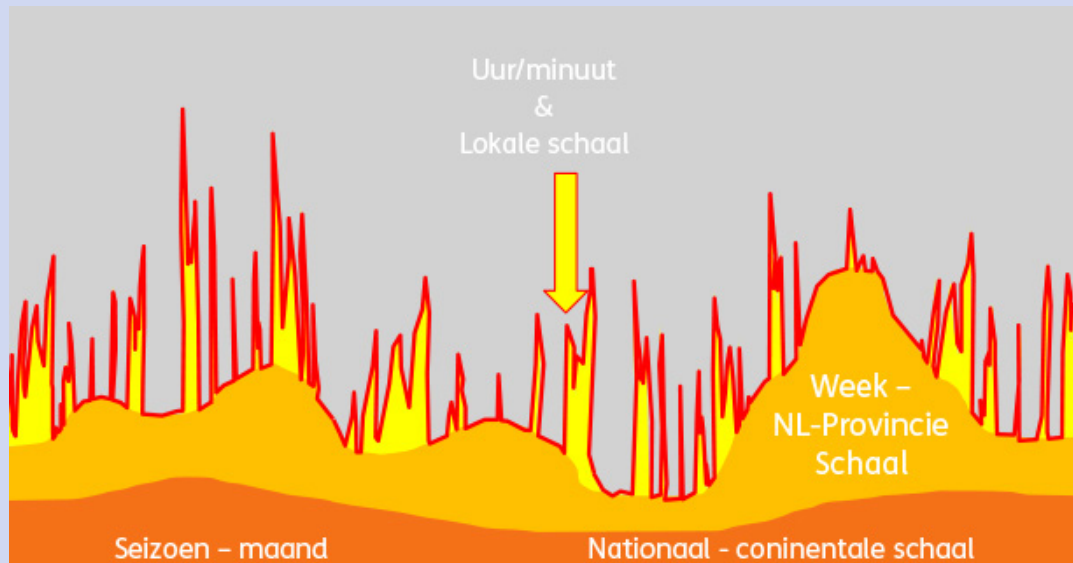


Figuur 16: Foto's van de methaan sensor (LiCOR, links), de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ sensor (LiCOR, midden voor), de Sonische anemometer (midden achter) en de ammoniak sensor (Healthy Photon, rechts)

Door deze concentratiemetingen te middelen naar minuut en uur tijdschaal, zijn deze data te gebruiken om de bijdrage van bronnen van verschillende ruimtelijke schalen uit elkaar te halen (zie uitgelicht 2 hieronder)

De 10Hz metingen van de eddy correlatie opstelling helpen om uit de concentratie, samen met even snelle metingen van de verticale windsnelheid, de flux (het verticale transport) te bepalen. Zo wordt bijgehouden hoeveel gas er rondom de meetmast naar boven (emissie) of naar beneden (depositie) gaat.

Uitgelicht 2: Concentratie



De hoeveelheid gas in de buitenlucht voor elke soort wordt bepaald door:

- Achtergrond in de lucht op wereldschaal, afhankelijk van waar je meet tussen evenaar en pool. Bij Nederland (+/- 54 graden noorderbreedte) is dat voor CO₂ = 380 ppm, voor CH₄ 1900 ppb en voor NH₃ is die achtergrond 0. In tijd zien we dit als seizoensvariatie of langzame veranderingen van maand tot maand (onderste laag in de figuur)
- Afhankelijk van hoe de lucht over het Europees continent komt wordt die hoeveelheid gas groter, dat is een bijdrage die van week naar week verandert en afhangt van hoeveel brongebieden een luchtpakket is tegengekomen op weg van de oceaan naar ons meetpunt.
- De bijdrage op schaal Nederland, komt de wind over de industrie bij Rotterdam of via Waddenzee en Flevoland aanstromen, dan zien we een ander concentratieniveau dat van uur tot uur geleidelijk verandert. (Net hoe snel de windrichting de route van een luchtpakket verandert). Samen met EU schaal het middelste deel van het plaatje.
- De bijdrage van lokale bronnen, komt de lucht over een stal, een bemest weiland, het dorp dan zien we de bijdrage daarvan, afhankelijk van hoelang de wind van de bron naar het meetpunt waait, geeft dit pieken en dalen die veelal minuten tot max een paar uur duren (geel in het figuur).
- De bijdrage van het veld rondom het meetpunt. Uit het moerasgebied van de Nieuwkoopse Plassen komt methaangas en kooldioxide door afbraak- en rottingsprocessen in de bodem. Dit patroon is beter te zien in de verticale flux (zie hieronder) dan in de concentratie zelf. (nog fijnere structuur dan in plaatje hierboven te zien)

Voor de laatste drie hierboven beschreven ruimtelijke & tijd schalen (3-5) maakt het uit hoe de verticale gelaagdheid van de atmosfeer is. In de nacht, als alles wat vanaf grondniveau in de lucht komt relatief laag blijft, zijn bijna altijd alle concentraties hoger dan overdag, wanneer de zon zorgt voor meer menging in de verticaal. Maar, als een bron in de omgeving voor extra gas zorgt dan kan dat een groter signaal geven dan de dag-nacht variatie.

De variatie in de tijd is een belangrijk middel om bijdrage van bronnen “ver weg” te scheiden van bijdragen van bronnen “dichtbij”.

De fluxmetingen worden op een gestandaardiseerde manier verwerkt met Eddypro, een softwarepakket (zie uitgelicht 3 hieronder) dat internationaal wordt gebruikt voor flux berekeningen. De netto fluxen worden zo op half-uursbasis berekend.

Uitgelicht 3: Processing van de flux data

De fluxmetingen worden op een gestandaardiseerde manier verwerkt met Eddypro, een softwarepakket dat internationaal wordt gebruikt voor flux berekeningen. Het is voortgekomen uit de CO₂ flux meetgemeenschap. Het voert een aantal stappen uit waarin bijvoorbeeld, afhankelijk van de windrichting wordt gekeken hoeveel milliseconden het signaal van de wind en de concentratie uit de pas lopen omdat de wind en de concentratie op 40-60 cm afstand van elkaar wordt

gemeten. De wind komt dan bijvoorbeeld eerst langs de concentratie meting en 0.5 seconde later “pas” bij de windmeter. Ook plotselinge korte pieken of dalen in de concentratiemeting (bijvoorbeeld: er vliegt een vlieg door de lichtbundel) wordt op internationaal afgesproken manier geselecteerd, weggegooid en het gat dat dan in de meetreeks ontstaat wordt weer opgevuld.

De depositie /emissie van een gas wordt dus bepaald door naar de verticale beweging van de lucht te kijken. Die beweging komt door grote en kleine wervels (eddies in het Engels) in de atmosfeer die samen voor het transport zorgen. Als je met deze eddy correlatie techniek, de flux wilt bepalen dan moet je voor het transport zowel de snelle (kleine) wervels als de grote (langzame) wervels meenemen. De snelle wervels bepalen de 10 Hz meetfrequentie, de langzame wervels dicteren dat de flux minstens over 15 minuten wordt berekend. Dertig minuten is eigenlijk de standaard die iedereen internationaal gebruikt.

Bij deze berekeningen kijken we verder naar de verdeling van grote en kleine wervels, of we alle wervels wel terugzien in elk instrument (dat hangt samen met de grootte van het instrument en de meethoogte). Tenslotte kunnen we per meting aangeven wat het gebied op de kaart rondom de mast is waarvoor die meting relevant is.

Bij het selecteren van de locatie voor een fluxmeetoren kan worden berekend welk gebied rondom de meetmast bijdraagt aan de gemeten flux. Dat is op elk moment van de tijd een “taartpunt” in de richting waar de wind vandaan komt. Wat er recht onder de mast gebeurt ziet het meetinstrument niet, want de verandering van de concentratie door opname of emissie waait daar onder de sensor door. Wat er op 1-4 keer de meethoogte afstand (5-20 meter) gebeurt, is heel goed zichtbaar, want dat is dichtbij, maar wat er op 100 keer die afstand (400 meter) gebeurt draagt veel minder bij aan het meetsignaal. Het terrein dat de belangrijkste bijdrage geeft noemen we de *footprint* van de mast. Voor dat gebied is het ook van belang bij te houden wat er precies gebeurt.

Naast de snelle metingen van NH₃ concentratie, wordt ook water (H₂O) concentratie op hoge tijdsresolutie gemeten. Deze metingen laten de verdamping vanuit het gewas zien. Die metingen zijn nodig omdat bij de fluxmetingen voor methaan en ammoniak een correctie wordt uitgevoerd die rekening houdt met het verschil in dichtheid in de lucht die naar beneden en naar boven gaat. Die laatste bevat veelal meer water door de verdamping bij het oppervlak. Zoals al eerder aangegeven is de opname van stikstof in het gewas afhankelijk van wat planten doen. Planten hebben huidmondjes (stomata) die open en dicht kunnen. Planten reguleren zo de verdamping en gaan bijvoorbeeld dicht onder droge omstandigheden om verdroging te voorkomen. Stomata zijn de openingen waardoor H₂O, en CO₂ (en NH₃ of NO_x) de plant in- of uitgaan. CO₂ opname brengt dat openen en sluiten van de stomata in beeld en is veel makkelijker meetbaar dan de NH₃ flux. Als ‘s nachts de stomata sluiten, gaat de depositie van NH₃ door, maar dan via andere delen van de vegetatie of via de bodem. CO₂ opname stopt en er treedt emissie van dat gas op.

De eddy correlatie opstelling heeft ook een snelle sensor voor methaan, waarmee concentraties worden gemeten met 10 Hertz, en fluxen kunnen worden bepaald. Methaan kan helpen bij de bronherkenning van gemeten lucht als pieken in concentratie van verschillende gassen tegelijk voorkomen. Methaan komt niet alleen uit stallen waar koeien het uitademen; een hoge CO₂ en CH₄ piek kan ook komen van een bron met verbranding. Vaak is er dan ook CO en NO_x te zien. Als er CH₄ en NH₃ samen over komt is de kans groot dat dat van een stal afkomstig is, terwijl een NH₃ piek zonder CH₄ van een bemest weiland af kan komen. NH₃ en NO_x of NH₃ en CO duidt op een bijdrage van wegverkeer of uitstoot uit stedelijk gebied.

Zoals eerder genoemd, worden de metingen van methaan uitgevoerd in samenwerking met de Vrije Universiteit van Amsterdam. De interesse voor methaan van de VU komt uit een ander project. Deze metingen verzamelen tegelijkertijd informatie over de hoeveelheid broeikasgas (CH₄ en CO₂ samen = moerasgas) die uit een stuk Nieuwkoopse Plassen gebied komt. Deze gegevens worden aan het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV programma; <https://www.nobveenweiden.nl/>) beschikbaar gesteld.

5.1.2 Metingen aan meteorologie, plant en bodem

De flux (opname of afgifte van een gas aan de lucht boven de vegetatie) is niet alleen afhankelijk van de concentratie van het gas in die lucht, maar ook van de meteorologische omstandigheden en de status van de planten. Hierbij zijn verschillende processen van belang en de verschillende metingen moeten helpen die uit elkaar te halen.

Zo worden windsnelheid, windrichting, regenval, relatieve vochtigheid van de lucht, luchtdruk, luchttemperatuur, hoeveelheid beschikbaar zonlicht (straling), temperatuur van de bodem, vocht in de bodem, vocht op het bladoppervlak, vegetatiehoogte en de hoeveelheid bladoppervlak allemaal gemeten.

De windsnelheid en windrichting en de snelle variatie daarin vertelt welk deel van het terrein rondom de mast voor de flux zorgt. De verhouding tussen de windsnelheid en de hoeveelheid turbulentie geeft aan hoeveel obstakels er in de windrichting zijn. Een terrein met meer obstakels genereert meer wervels en dat maakt dat lucht makkelijker in contact komt met de onderliggende vegetatie. Daarom wordt ook de hoogte van het gewas elke maand in de verschillende windrichtingen gemeten.

Met die gewashoogte verandert ook de hoeveelheid oppervlakte waarmee de vegetatie gas kan uitwisselen met de lucht. Dat heet de “Leaf area index” of LAI. Het effect van veranderende LAI is het meest duidelijk waarneembaar voor CO₂. Als het gewas groeit wordt er overdag steeds meer CO₂ per uur opgenomen. Dat hangt uiteraard ook af van de hoeveelheid beschikbaar zonlicht voor fotosynthese. Dus ook die inkomende straling wordt gemeten. Of de huidmondjes van het blad open of dicht zijn hangt af van temperatuur van het gewas en de droogte (dus hoeveel water in de atmosfeer, op het bladoppervlak en in de bodem zijn). Daarom zijn er metingen van oppervlaktetemperatuur, bodemtemperatuur, bodemvochtigheid, diepte van het grondwater en kijken “blad nat” sensoren of de vegetatie nat is door regen of dauw (Figuur 17).



Figuur 17: Sensoren in en op de bodem linksboven: blad nat sensor, rechts LAI meetinstrument, linksonder 3 bladnat sensoren op 3 hoogtes, onder midden bodemvocht en -temperatuur meter.

Deze laatste parameter is ook erg belangrijk voor de NH_3 uitwisseling omdat NH_3 zich (veel meer dan CO_2 of CH_4) kan ophopen in een waterlaagje op de plant. De plant neemt dan een deel van de stikstof in die waterlaag wel op, maar een deel komt ook weer als een flux omhoog (emissie dus) uit het gewas als het waterlaagje verdampt en die “tijdelijke opslag-plek” voor ammoniak dus verdwijnt.

5.1.3 Palmes buisjes– concentratie NH_3 en NO_2

Voor de metingen van maandgemiddelde concentraties van NH_3 en NO_2 wordt de meetaanpak gebruikt die al binnen het Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden (MAN) gebruikt wordt (Lolkema et al, 2012; Beirnaert et al. 2023). Op elke meetlocatie worden meetbuisjes (passieve samplers) opgehangen op ongeveer 1,8 meter van de grond aan een boomstam of paal (zie Figuur 18). Voor NH_3 is dit 1 buisje per locatie, of drie. In dat laatste geval worden de meetresultaten van de drie buisjes gemiddeld, wat de triplo meting betrouwbaarder maakt. Van de NO_2 buisjes hangen er altijd twee buisjes per meetlocatie.

De buisjes nemen een maand NH_3 of NO_2 op uit de lucht in een gaasje dat is geïmpregneerd met een chemische stof die reageert met NH_3 of NO_2 . Dit is een passief proces via diffusie, er wordt dus geen lucht aangezogen. De meetbuisjes worden daarna in het laboratorium van Gradko (voor NH_3) en Buro Blauw (voor NO_2) geanalyseerd om de gemiddelde concentratie over de meetperiode te bepalen. De meetresultaten met buisjes zijn minder nauwkeurig dan de referentiemetingen van het Luchtmeetnet. Daarom worden elke maand de buisjesmetingen aan de metingen van het LML gekalibreerd.



Figuur 18: Voorbeeld van een meetopstelling met passieve samplers bij meetpunt 16 Gat van Achterberg. De NO_2 buisjes hangen in een koker die de buisjes beschermt o.a. tegen direct zonlicht en om voor een laminaire luchtstroom te zorgen. De NH_3 buisjes hangen daar net onder.

5.1.4 Delta denuders – concentratie gassen en deeltjes

De Delta denuders (Figuur 19) worden gebruikt om gassen en aerosolen in de lucht apart te meten. Hierbij wordt lucht aangezogen, zodat de lucht stroomt langs gecoate buizen (denuders) die specifieke gassen NH_3 , SO_2 , HNO_2 , HNO_3 , aan hun binnenwand binden. Na de denuder worden filters geplaatst die de overgebleven deeltjes (aerosolen) NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_2^- opvangen. Na een maand bemonstering worden de denuders en filters in het laboratorium geanalyseerd om de concentraties van de afzonderlijke componenten te bepalen. Zo kunnen gasvormige stoffen en deeltjesvormige stoffen nauwkeurig van elkaar worden onderscheiden.

De kaart van het gebied laat al zien dat er in de verschillende windrichtingen rondom de Nieuwkoopse Plassen diverse andere activiteiten zijn. Daardoor is het ook te verwachten dat de mix van verschillende gassen en deeltjes in de lucht anders is in de verschillende delen van het gebied. De Delta denuders kunnen helpen de ruimtelijke verschillen (indien aanwezig) te bepalen en te helpen duiden. Zo kunnen mogelijk stallen (NH_3), bemeste velden (NH_3), industriële bronnen (NO_x , HNO_2 , HNO_3 en deeltjes: NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-}) en (lucht & land) verkeersbronnen (NO_x / NH_3) onderscheiden worden. Het meetnet zijn vijf Delta denuders: een bij het centrale meetpunt en vier verspreid over het gebied.



Figuur 19: Delta denuder (links) en bulkvanger plus Delta denuder (rechts)

5.1.5 Natte depositie en bulk depositie

Een wet-only vanger meet natte depositie op het centrale meetpunt. Een wet-only vanger neemt een monster van regenwater, dat vervolgens in het lab wordt geanalyseerd om de chemische samenstelling vast te stellen. De wet-only vanger detecteert met een regensensor wanneer het regent, en gaat dan open. Tijdens regen vangt de vanger de neerslag op en zodra het droog wordt sluit de vanger zich weer. In de gebruikte wet-only vanger wordt het regenwater gedurende een maand opgevangen in een gekoelde fles. Koeling is belangrijk om de groei van micro-organismen en de chemische veranderingen in het water zoveel mogelijk te beperken. De hoeveelheid neerslag wordt vastgesteld door in het veld de massa van het opgevangen water te meten. Vervolgens worden in het laboratorium de concentraties van NH_4^+ en NO_3^- geanalyseerd. De natte depositie flux wordt berekend door de gemeten concentraties te vermenigvuldigen met het gewicht van het betreffende watermonster (hoeveelheid water) en dit resultaat te delen door het oppervlak van de vanger.

De bulkvanger is de goedkope uitvoering van een wet-only vanger: een “gewone” trechter die opvangt wat er uit de lucht valt. Hier is geen stroom voor nodig. Het monster wordt niet gekoeld en de vanger staat altijd open en kan dus vervuild raken door inwaaiend blad materiaal, pollen en vogelpoep. Om verstoring door vogels te verminderen, is de vanger uitgerust met een *bird ring*: een dun metalen draad boven de rand van de trechter. Met een bulkvanger wordt niet alle depositie opgevangen: het is de som van de natte, en de deel van de droge depositie, wellicht vervuild door andere termen, en deels vervluchtigd door verdamping, of afgebroken door biologische activiteit in het ongekoelde monster gedurende de maand.

De opstellingen voor natte en bulkdepositie zijn naast elkaar opgesteld op het centrale meetpunt (zie Figuur 20). Ze staan er samen zodat het verschil tussen de twee te kwantificeren valt voor deze datareeks. De metingen op het centrale meetpunt zullen een verhouding opleveren tussen de twee meetinstrumenten en die verhouding helpt om ook voor de andere locatie waar een bulkvanger staat een natte depositie uit te rekenen.



Figuur 20: Links een Eigenbrodt wet-only vanger. Rechts de bulkvanger met de metalen *bird-ring* erboven. Ook de wet-only heeft opstaande pinnen (grijze streepjes op de foto) om te zorgen dat vogels er niet op gaan zitten.

5.1.6 Mobiele metingen

Campagnegewijs worden mobiele metingen uitgevoerd met de meetwagen, zie Figuur 21. Aan boord is apparatuur aanwezig die elke seconde concentraties meet van verschillende gassen en eventueel deeltjes. Tegelijkertijd wordt met GPS de positie van de wagen bijgehouden. Als voor een specifieke bron metingen worden uitgevoerd dan wordt een meetset met windsnelheid en windrichting neergezet die de data draadloos naar de meetwagen stuurt.

In dit geval worden de metingen van NH_3 , de broeikasgassen CO_2 , CH_4 , N_2O en luchtverontreinigende componenten zoals CO , NO en NO_2 gebruikt. Deze metingen geven een beeld van bronnen van deze gassen in en om het gebied van de Nieuwkoopse Plassen. De meetwagen “ziet” de voor het oog onzichtbare pluimen van gas die vanaf elke bron met de wind mee verspreiden. Ook de metingen onderweg van thuisbasis Petten naar de Nieuwkoopse Plassen en retour geven een beeld van andere delen van het land en plaatsen daarmee de metingen rondom de Nieuwkoopse Plassen in een breder verband. In de afgelopen jaren is de meetwagen al een aantal keren bij de Nieuwkoopse Plassen in de buurt geweest en zijn er metingen uitgevoerd aan verschillende bronnen in het gebied.



Figuur 21: Mobiele meetwagen met apparatuur waarmee al rijdend gemeten wordt

Met de meetwagen zijn niet alle bronnen tegelijk zichtbaar. Op elke meetdag wordt informatie verzameld over de bronnen die aan de bovenwindse kant van het meettraject liggen. Met andere woorden, een bedrijf aan de ene kant van de weg is wel te zien wel maar op dat moment is een bedrijf aan de andere kant niet meetbaar. Al rijdend wordt zo gemeten aan afvalstortplaatsen, waterzuiveringen, gasinstallaties, wegverkeer, verbrandingsinstallaties, stallen, bemeste weilanden. Door te kijken naar de combinatie van verschillende gassen kunnen bijdragen van verschillende soorten bronnen uit elkaar worden gehouden.

5.2 Modellen in detail

Hieronder volgt een beschrijving van de beschikbare modelleertechnieken, zodat begrip ontstaat over de werking van de modellen. Vervolgens worden de gebruikte modellen en de input daarvan toegelicht.

5.2.1 Modelleertechnieken

De te volgen strategie bij de modellering hangt sterk af van de onderzoeksvraag. Elk model heeft zijn eigenschappen, voor- en nadelen, en toepassingsgebied. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van vier modeltypen:

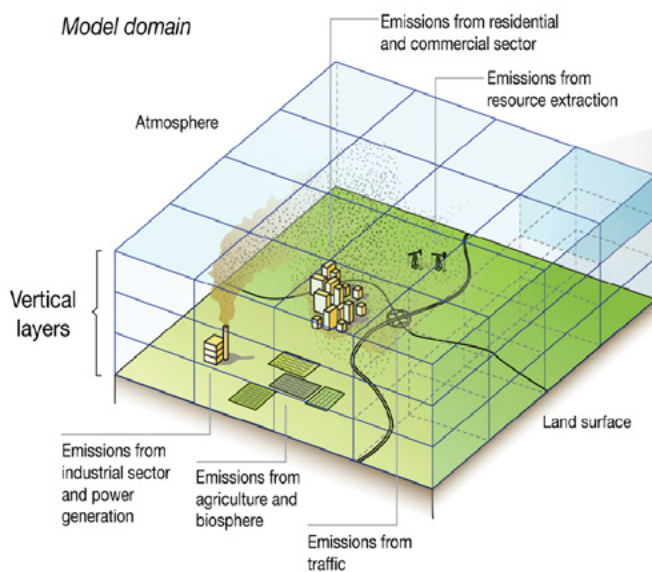
- Gaussisch pluimmodel
- Chemisch Transport Model
- Large Eddy Simulation model
- 1-Dimensionaal depositiemodel

Hieronder een introductie van de sterke punten en toepassingsmogelijkheden van deze vier modellen. In sectie 5.2.2 worden de modellen in detail besproken.

5.2.1.1 Gaussisch pluimmodel

Een Gaussisch pluimmodel berekent concentraties en depositie op hoge ruimtelijke resolutie. Dit gebeurt door op een reeks van vooraf bepaalde punten op de kaart (receptorpunten) de invloed van een reeks emissiebronnen te berekenen. Hierbij wordt gekeken naar het pad dat elke pluim aflegt van bron tot aan receptorpunt. Er wordt rekening gehouden met de verbreding van de pluim door menging in de atmosfeer en richtingsveranderingen die veroorzaakt worden door meteorologische omstandigheden. Afhankelijk van de stof wordt er ook rekening gehouden met chemische reacties en depositie die de concentratie veranderen. Verspreiding, chemie en depositie worden statistisch berekend op basis van gemiddelden over een vooraf bepaalde periode en niet expliciet in de tijd opgelost, zoals bij chemische transportmodellen wel het geval is. Hierdoor is de uitvoer altijd gemiddeld over de rekenperiode.

Gaussische pluimmodellen zijn uitermate geschikt voor scenarioberekeningen (bijvoorbeeld voor verschillende gradaties van emissiereductie) en het berekenen van bijdrages van verschillende type bronnen voor primaire stoffen als NH_3 en NO_x omdat de relatie tussen bron en receptor expliciet berekend wordt. De rekentijd van Gaussische pluimmodellen hangt af van het aantal bronnen en receptorlocaties dat voorgeschreven wordt en van het aantal rekenperiodes. Hierdoor kan de invloed van zeer grote hoeveelheden bronnen op de concentratie en depositie op een specifieke locatie in korte tijd doorgerekend worden. Het Gaussische pluimmodel dat gebruikt wordt in dit onderzoek is het Operationele Prioritaire Stoffen model (OPS). Voor de korte afstand is het een Gaussisch pluimmodel. Op grotere afstand is het een trajectoriemodel (een model dat wordt gebruikt om de beweging van een systeem over tijd en ruimte te beschrijven) en meer regionaal een combinatie van beide vormen. Van OPS bestaat zowel een korte- als langetermijnversie. Deze worden beide ingezet.



Figuur 22: Schematische weergave van het opdelen van het rekendomein in blokken in een Chemisch Transport Model (CTM).

5.2.1.2 Chemisch Transport Model

Een Chemisch Transportmodel (CTM) biedt de mogelijkheid om over grote gebieden (zoals een provincie, land of een continent) berekeningen uit te voeren over lange perioden (meestal jaren). Een CTM verdeelt de atmosfeer in cellen (Figuur 22), waarbij in elke cel de verandering van concentraties van gassen en fijnstof wordt berekend. Hierbij worden de bijdragen van emissiebronnen, meteorologie, randvoorwaarden (stoffen die het gebied van buitenaf binnenkomen), chemische processen en depositie meegenomen. De tijdsresolutie is op sub-uurlijkse schaal en de ruimtelijke resolutie is -- afhankelijk van de grootte van het rekendomein -- meestal een tot enkele kilometers horizontaal en enkele tientallen tot honderden meters verticaal. Net als in Gaussische pluimmodellen wordt in CTMs de turbulentie in de atmosfeer niet expliciet berekend, maar wordt het *gemiddelde effect* van de turbulentie op concentraties geschat, via stabiliteitsklassen van de atmosfeer. In dit onderzoek wordt LOTOS-EUROS ingezet als CTM.

5.2.1.3 Large Eddy Simulation model

Bij een **Large Eddy Simulation model** (LES) wordt de atmosferische stroming, inclusief turbulentie, wel expliciet berekend. Net als bij CTM's wordt het domein in cellen verdeeld en wordt de verandering van concentraties in elke cel in de tijd berekend. Ook hier wordt de invloed van chemische processen, emissies, randvoorwaarden en depositie meegenomen. De meteorologie (windsnelheid, temperatuur, druk) wordt alleen gebruikt als beginschatting voor de berekening van de stroming en turbulentie. Dit heeft als voordeel dat berekeningen veel fijnmaziger kunnen zijn. Typische celgroottes variëren van tientallen meters tot kleiner dan 1 meter, typische tijdschalen zijn minuten of zelfs seconden. De effecten van emissie-incidenten op korte termijn kunnen hierdoor berekend worden. De keerzijde van deze hoge tijds- en ruimtelijke resolutie is de benodigde grote rekenkracht en lange rekentijd. Daarom zijn berekeningen vaak beperkt tot kleinere domeinen en kortere periodes (tientallen kilometers, dagen tot weken). In dit onderzoek is gekozen voor het LES-model DALES.

5.2.1.4 1-Dimensionaal depositiemodel

Bovenstaande drie modeltypen berekenen concentraties in een gebied gedurende een bepaalde tijd. Alle modellen maken daarbij gebruik van een **depositiemodel**, dat berekent hoeveel van de stoffen in de atmosfeer er daadwerkelijk op het land neerdalen. Dit gebeurt als functie van factoren zoals temperatuur, stofconcentraties, vochtigheid, bewolking, neerslag, zonnestraling en het type oppervlak waarop de depositie plaatsvindt. Depositie wordt ingedeeld in natte en droge depositie. Natte depositie is depositie door neerslag (regen), droge depositie is depositie onder droge condities, bijvoorbeeld doordat stoffen uit de atmosfeer worden opgenomen door huidmondjes in planten of oplossen in druppels op een oppervlak. Droge depositie wordt sterk bepaald door het type landgebruik en vegetatie (zoals laagveen, moeras, grasland) terwijl natte depositie vooral gestuurd wordt door meteorologie. Daarnaast is het aandeel droog hoger dan het aandeel nat in depositie¹. Een depositiemodel kan los gebruikt worden om voor bepaalde oppervlakte- en weercondities de depositieflux te berekenen, maar het kan ook worden opgenomen in een atmosferisch model. In dit onderzoek wordt DEPAC (DEPosition of Acidifying Compounds) gebruikt als droge depositiemodel. Het is opgenomen in zowel OPS, LOTOS-EUROS, als DALES.

¹ TNO rapporteert, gemodelleerd over het jaar 2019, dat het aandeel natte depositie van reactieve stikstofverbindingen versus het aandeel droge depositie ongeveer 35% tegen 65% is ("Het gedrag van stikstofverbindingen in de atmosfeer", TNO rapport R10757, april 2024).

5.2.2 Gebruikte modellen

5.2.2.1 LOTOS-EUROS

LOTOS-EUROS is een Euleriaans chemisch transportmodel (CTM) dat is gericht op het simuleren van de luchtvervuiling in de lagere troposfeer (de onderste laag van de atmosfeer met een hoogte van 6 tot 10 kilometer). Het maakt gebruik van vereenvoudigde beschrijvingen van processen die op kleine schaal plaatsvinden, in de vorm van een set fenomenologische of empirische vergelijkingen. Het 1D-depositiemodel DEPAC is een voorbeeld van zo'n empirisch model. Deze versimpelde beschrijvingen hebben tot voordeel dat berekeningen van een groot domein over een tijdspanne van één of enkele jaren veel efficiënter kunnen worden gedaan in korte tijd. Deze berekeningen verschaffen inzicht in de verbanden tussen de (stationaire) metingen op verschillende locaties die sterk afhangen van tijds- en locatie afhankelijke weerscondities. LOTOS-EUROS verschaft concentraties en depositiefluxen op de schaal van Nederland in het gesimuleerde jaar. Het is ontwikkeld door TNO in samenwerking met nationale en internationale partners voor wetenschappelijke toepassing en voor beleidsondersteuning (Manders et al., 2017).

TNO ontwikkelde een systeem om de impact van emissiecategorieën binnen een LOTOS-EUROS-simulatie te volgen, gebaseerd op een labeltechniek (Kranenburg et al., 2013,). Naast concentraties van stoffen en depositiefluxen worden de bijdragen van vooraf gedefinieerde broncategorieën berekend en gevolgd in het model. De labelroutine is ontworpen voor chemisch actieve tracers met een C-, N- (gereduceerd en geoxideerd), S- of O-atoom. De brontoewijzingsmodule voor LOTOS-EUROS levert brontoekenning die geldig is voor de huidige atmosferische omstandigheden, aangezien alle chemische transformaties plaatsvinden bij dezelfde concentraties van oxidanten. Details en validatie van deze bronattribuimodule is te vinden in (Kranenburg et al., 2013). De brontoekenningstechniek is eerder gebruikt om de herkomst van fijnstof (Timmermans et al., 2022), stikstofdioxide (Thürkow et al., 2023) en stikstofdepositie (Kranenburg et al., 2024) te onderzoeken.

LOTOS-EUROS is daarom geschikt om inzicht te geven in de volgende doelen van het meetnetwerk:

- *Inzicht bieden in de herkomst van de stikstofdepositie in het Natura 2000-gebied (Doel 2).*
De tijds- en ruimteresolutie van LOTOS-EUROS in combinatie met de labeltechniek maakt brontoekenning van stikstofdepositie mogelijk.
- *Meer kennis over de relatie tussen maatregelen gericht op emissiereductie en depositie in het Natura 2000-gebied (Doel 3).*
Met behulp van een LOTOS-EUROS simulatie met aangepaste emissietotalen die emissiereductie maatregelen nabootsen, kan het effect op de depositie in het Natura 2000-gebied worden gemeten.
- *Impact van het overvliegende luchtverkeer te bepalen, gezien de vluchten van en naar Schiphol laag (op enkele honderden meters) overkomen (Doel 4).*
Omdat LOTOS-EUROS expliciet in tijd en ruimte rekent en de grootte van de gridcellen in de verticale en horizontale richting voldoende klein is, kan de impact van laag overvliegende vliegtuigen worden bepaald.

Inputdata voor LOTOS-EUROS

Voor LOTOS-EUROS zijn verschillende databronnen nodig als input. Hieronder worden de meteorologische gegevens, emissiejaartotalen en tijdsprofielen, landgebruik- en vegetatiekaarten, en de inkomende concentraties van buiten het gesimuleerde domein besproken.

Lokale meteorologische gegevens zoals windsnelheid en -richting, temperatuur, vochthuishouding, luchtdruk en straling worden ingeladen van andere bronnen. Het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) is de huidige standaardbron voor meteorologische gegevens, geleverd op een resolutie van circa 6 x 6 kilometer.

Voor de buitenlandse emissies wordt de [CAMS-REG v8.1](#) emissie-inventaris voor het jaar 2022 gebruikt. Deze jaarlijkse emissietotalen zijn per locatie en broncategorie (zoals landbouw, wegtransport) verdeeld. Totalen alleen zijn echter niet voldoende, er is ook een verdeling in de tijd nodig. Daarvoor wordt de CAMS-REG emissie-set gecombineerd met CAMS-TEMPO v5.1 tijdsprofielen, die gedetailleerde temperatuurafhankelijke profielen levert, per sector en land (Guevara et al., 2025). De uitstoot is vaak afhankelijk van de lokale temperatuur; denk bijvoorbeeld aan de emissies die vrijkomen bij het verwarmen van huizen of aan de uitstoot van auto's bij een koude start. Omdat de Nederlandse Emissieregistratie geen tijdsprofielen levert, worden ook hier de CAMS-TEMPO v5.1-tijdsprofielen gebruikt. Zie verder 5.2.3 voor de manier waarop emissiedata voor alle modellen wordt ingewonnen.

De gegevens van landgebruik en vegetatie zijn van belang voor de bepaling van de depositie op de vegetatie en voor het bepalen van biogene emissies van bomen (vooral organische verbindingen zoals isoprenen en terpenen), zeezoutemissies, zandemissies, wegemissie, resuspensie en agrarische fijnstofemissies. Er worden meerdere bronnen gebruikt voor gegevens over landgebruik en vegetatie. Er zijn wereldwijde kaarten (zoals de Global Land Cover Map van het European Space Agency, [ESA - 2015 global land cover map](#)) en Europese kaarten (zoals de [CORINE Land Cover map van Copernicus](#), [CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service](#)). Details over de vegetatie worden vaak gegeven door landelijke kaarten (zoals de Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland en [Basisregistratie Gewaspercelen](#) voor Nederland, en de kaarten gebaseerd op satellietfoto's van Sentinel-2 en Landsat 8 door [Blickensdörfer et al, 2022](#) voor Duitsland).

De inkomende concentraties van chemische stoffen die van buiten het gesimuleerde domein komen, de zogenoemde randvoorwaarden, zijn ook een onderdeel van de input voor LOTOS-EUROS. Deze randvoorwaarden zijn het resultaat van een simulatie op een groter domein. Typisch voor een LOTOS-EUROS gesimuleerd op het Europese domein, zijn randvoorwaarden uit IFS, een CTM dat simuleert op globaal niveau (Inness et al., 2019). Bij het simuleren van kleinere domeinen dan de EU, dan zijn de simulatieresultaten van LOTOS-EUROS te gebruiken.

De gesimuleerde domeinen in LOTOS-EUROS

Vanwege de hoge rekenkosten is het niet haalbaar om heel Nederland te simuleren op de hoogste resolutie van 500 x 500 meter. Daarom wordt alleen het gebied van 40 x 40 kilometer rondom de Nieuwkoopse Plassen en de Haeck op deze resolutie gesimuleerd.

Een belangrijk onderdeel van de modelinput zijn de randvoorwaarden, die zowel de concentraties als de gekoppelde labels omvatten. Voor een betrouwbare simulatie in het gebied van interesse is het essentieel dat deze randvoorwaarden afkomstig zijn uit simulaties met een vergelijkbare resolutie. Om dit te bereiken, wordt een reeks van vier geneste simulaties uitgevoerd, waarbij elk domein de randvoorwaardes doorgeeft aan het volgende, kleinere en fijnmazigere domein. Deze aanpak begint met een grootschalig EU-domein en schaalt stapsgewijs af naar het kleinste domein rond de Nieuwkoopse Plassen. In Figuur 23 zijn de vijf domeinen weergegeven die in Tabel 4 zijn gedefinieerd.



Figuur 23: De gedefinieerde domeinen in LOTOS-EUROS aangegeven in blauwe vlakken van groot naar klein: EU, NWE, NL, PZH, NPH. Zie Tabel 4 voor meer details.

Tabel 4 Domeindefinities van gesimuleerde domeinen in LOTOS-EUROS.

Domein	Gridresolutie	Domeingrootte
Europa (EU)	20 x 20 km (0.5° x 0.25°)	W15-E35; N35-N70
Noordwest Europa (NWE)	6 x 6 km (0.1° x 0.05°)	E2-E16; N47-N56
Nederland (NL)	2 x 2 km (0.025° x 0.0125°)	E3.15-E7.5; N50.6-N53.7
Provincie Zuid-Holland (PZH)	1 x 1 km (0.015° x 0.009°)	E3.56-E5.30; N51.50-N52.41
Nieuwkoopse Plassen & de Haack (NPH)	500 x 500 meter (0.0073° x 0.0045°)	E4.49-E5.07; N51.95-N52.32

5.2.2.2 OPS (algemeen)

Het OPS (Operationele Prioritaire Stoffen) model is een Lagrangiaans transport- en depositiemodel waarin de relaties tussen individuele bronnen en receptoren (locaties waarop de concentratie uitgerekend wordt) beschreven worden door Gaussische pluimen (Sauter et al., 2016). OPS maakt gebruik van trajectoriën voor het lange-afstands-transport. Hierbij wordt een luchtpakketje gevolgd langs het pad dat het aflegt door de lucht en wordt zodoende rekening gehouden met veranderende weersomstandigheden gedurende de reis, zoals bijvoorbeeld veranderende windrichting en -snelheid. De bijdrages van verschillende bronnen worden bij elkaar opgeteld voor een enkel rekenresultaat.

Eenzijds is het doel van OPS om de verspreiding van verontreinigende stoffen in de lucht in Nederland te berekenen (bijvoorbeeld fijnstof, en verzurende stoffen zoals zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak). Een ander voornaam doel is het berekenen van de depositie in Nederland, oftewel hoeveel van de stoffen op het aardoppervlak terecht komt. Voor elke afzonderlijke bron wordt de concentratie berekend als resultaat van dispersie en transport, waarbij rekening wordt gehouden met chemische omzettingen (indien relevant) en droge en natte depositie over de trajectorie. Voor een bepaalde locatie worden de bijdragen van al deze afzonderlijke bronnen opgeteld om tot de totale concentratie op die locatie te komen. Deze concentratie op een locatie (voor droge depositie), of de massa in de kolom boven het aardoppervlak (natte depositie), worden vervolgens gebruikt om de depositiehoeveelheden op de receptor te berekenen.

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van zowel OPS-LT als van OPS-ST, waarbij LT staat voor Long Term (lange termijn) en ST voor Short Term (korte termijn). Een belangrijk verschil is dat in OPS-LT langetermijn gemiddelde concentraties en deposities worden berekend zoals jaarlijks of maandelijks, terwijl OPS-ST uurlijkse berekeningen kan uitvoeren. Diverse model parametrisaties zijn echter hetzelfde of vergelijkbaar tussen beide OPS-varianten.

OPS wordt gedreven door meteorologische waarnemingen van 18 KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) stations. Preprocessor MPARKNMI wordt gebruikt om van deze metingen ruimtelijk gemiddelde meteorologische omstandigheden te bepalen voor 6 districten binnen Nederland (Regio 1-6, voornamelijk gebaseerd op het wind regime over Nederland) en voor Nederland in zijn geheel (Regio 0). Deze ruimtelijk gemiddelde output bevat uurlijkse globale straling, temperatuur en relatieve vochtigheid gemiddeld over heel Nederland en neerslagduur, windrichting en windsnelheid zowel gemiddeld over heel Nederland als over de regio. De modelspecifieke toelichting volgt hieronder.

5.2.2.3 OPS-LT

De langetermijn-versie van OPS, OPS-LT, berekent jaargemiddelde concentraties en deposities. OPS-LT is statistisch in de zin dat voorkomende atmosferische verspreidingssituaties, bijvoorbeeld alle uren in een jaar, vooraf worden ingedeeld in een aantal klassen binnen preprocessor METPRO. Deze klassen zijn gebaseerd op atmosferische stabiliteit en menglaaghoogte (6 klassen), transportrichting (12 windrichtingssectoren) en transportafstand (lokaal (eerste uur), 100 km, 300 km en 1000 km). De bijbehorende meteorologische variabelen en verspreidingsparameters worden bepaald aan de hand van de eigenschappen binnen die klasse. Deze meteostatistiek wordt gevoed aan het OPS-LT model.

Vervolgens worden binnen OPS-LT de transportkarakteristieken over de daadwerkelijke afstand en windrichting tussen een individuele bron en een specifieke receptor berekend door interpolatie van de meteostatistiek voor de relevante afstandsklassen en windrichtingssectoren. Hierbij wordt rekening gehouden met de verhouding tussen de daadwerkelijk afgelegde afstand door meandering van de pluim en de hemelsbrede bron-receptor afstand. Hierbij kunnen de meteorologische gegevens uit de drie dichtstbijzijnde regio's genomen worden of op basis van één regionale set (te sturen via het invoerbestand).

Deze aangepaste transportkarakteristieken worden gebruikt om de bijdrage aan concentratie en depositie op een receptorlocatie van een bron uit te rekenen voor elk van de 6 stabiliteitsklassen. Tenslotte wordt de totale bronbijdrage berekend door een gewogen gemiddelde te nemen van de bijdrages uit de verschillende stabiliteitsklassen, waarbij de frequentie van voorkomen van de klassen gebruikt wordt als gewicht.

OPS-LT houdt rekening met eerste-orde chemische reacties in de atmosfeer voor zowel de verwijdering van het primair uitgestoten materiaal als voor de vorming van secundaire aerosolen. Het gebruikt hiervoor chemische conversiefactoren berekend met het Euleriaanse chemische transportmodel EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme, <https://www.emep.int/>)

Bij het berekenen van natte depositie wordt er rekening gehouden met twee processen. De eerste is het uitwassen van stoffen onder de wolk waarbij stoffen oplossen in de neervallende druppels. Dit is vooral relevant dichtbij de bron als er nog geen interactie met de wolk is. Het tweede proces is het uitregenen waarbij de stoffen reeds worden opgelost in druppels tijdens de wolkenvorming.

Voor het berekenen van droge depositie wordt gebruik gemaakt van DEPAC. Hierbij wordt depositie uitgerekend voor negen landgebruiksklassen, waarna er een gewogen gemiddelde wordt genomen met de frequentie van voorkomen van elke landgebruiksklasse op de receptorlocatie. Hiervoor wordt een landgebruikskaart gebruikt die voorkomt uit het aggregeren van Landelijk Grondgebruik Nederland (LGN).

De tijd die OPS-LT nodig heeft om een bron-receptorrelatie door te rekenen is door de statistische aard van het model zeer kort. De totale rekentijd is vervolgens afhankelijk van het aantal bronnen en receptoren. Om de invloed van alle bronnen in Europa op Nieuwkoopse Plassen door te rekenen (waarbij er op elke 500 bij 500 meter een receptor ligt in het natuurgebied) is minder dan een half uur nodig.

Doordat elke bron-receptorrelatie individueel gerapporteerd kan worden kunnen bronnen op elke manier gegroepeerd worden. Dit stelt OPS-LT in staat de bijdragen van verschillende bedrijfssectoren en geografische regio's te onderscheiden. Deze eigenschappen maakt het model geschikt om inzicht te krijgen in de invloed van verschillende activiteiten op de stikstofdepositie in Nieuwkoopse Plassen en het inschatten van het effect van emissiereducerende maatregelen.

5.2.2.4 OPS-ST

De kortetermijn-versie van OPS, OPS-ST, is geschikt om uurlijkse berekeningen uit te voeren. De uurlijkse meteo zoals afgeleid met de eerder beschreven MPARKNMI preprocessor dient hiervoor als input. Normaliter is dit een regio- of Nederland-gemiddelde, maar indien lokale metingen bekend zijn kunnen (delen van) deze meteorologische variabelen ook genomen worden als input in OPS-ST met/zonder gebruikmaking van MPARKNMI. Er wordt niet geïnterpoleerd tussen verschillende meteoregio's. OPS-ST maakt ook gebruik van trajectoriën, maar op een andere manier dan in OPS-LT. Waarbij de trajectorievariabelen in OPS-LT voor iedere bron gelijk zijn, wordt in OPS-ST voor iedere bron afzonderlijk een trajectorie berekend die zich in de tijd ontwikkelt over een afstand (in horizontale en verticale richting). De meteorologische variabelen zoals bijvoorbeeld windsnelheid en -richting, en pluimkarakteristieken zoals bijvoorbeeld breedte en diepte, worden ieder uur opnieuw geëvalueerd voor ieder pluimsegment (pluimdeel over de afstand die voor dat stukje pluim in een uur is afgelegd). De segmenten worden tot 96 uur bijgehouden; bij grotere reistijd van een luchtpakketje wordt de bijdrage aan een receptor verwaarloosd.

Bij een pluim in OPS-ST is aangenomen dat het concentratieprofiel loodrecht op de pluimas zowel in verticale als in horizontale richting Gaussisch verdeeld is. Indien een receptorlocatie binnen een pluimsegment ligt, heeft dit segment van een bron een bijdrage aan de concentratie en depositie op een receptor. Meer dan één pluimsegment kan bijdragen aan een receptor, bijvoorbeeld in het geval van een draaiende wind. Op deze manier worden alle bron-receptorrelaties doorlopen om de individuele bronbijdragen per receptor te bepalen welke worden opgeteld om tot de totale concentratie en depositie te komen.

OPS-ST houdt rekening met eerste-orde chemische reacties in de atmosfeer, maar in tegenstelling tot OPS-LT alleen voor de verwijdering van het primair uitgestoten materiaal en niet voor de vorming van secundaire aerosolen. Conversiekaarten vanuit EMEP zijn momenteel (nog) niet beschikbaar voor gebruik in OPS-ST. Zodoende worden voor SO_2 en NH_3 eenvoudige chemische conversiesnelheden voorgeschreven. Voor NO_x is dit ietsje geavanceerder en wordt er ook rekening gehouden met de NO_2/NO_x verhouding als functie van de afstand.

Natte depositie wordt in OPS-ST op dezelfde manier uitgerekend als in OPS-LT. Voor droge depositie wordt in OPS-ST ook gebruik gemaakt van DEPAC. Hoewel ook onderscheid gemaakt kan worden tussen 9 landgebruiksklassen, wordt er op een specifieke locatie en over de trajectorie alleen gerekend voor het dominante landgebruik en worden zodoende geen afzonderlijke landgebruiksfracties doorgerekend. Voor het landgebruik en de ruwheidslengte op de receptorlocaties kan ook de LGN-kaart worden gebruikt, of kan een vaste waarde worden voorgeschreven. Voor de trajectoriën wordt altijd een constant op te geven ruwheidslengte gebruikt die identiek is voor alle bronnen die worden doorgerekend en wordt het landgebruik gelijkgesteld aan dat op de receptor.

De tijd die OPS-ST nodig heeft om een bron-receptorrelatie door te rekenen is door het bijhouden van 96 uur aan trajectoriedata per bron aanzienlijk langer dan voor OPS-LT. Ook zijn bepaalde ruimtelijke variaties in OPS-ST minder sterk ontwikkeld dan in OPS-LT (zoals beperkte variatie in landgebruik en ruwheidslengte over de trajectorie). Dit maakt dat OPS-ST meer geschikt is voor de lokale schaal waarbij een beperktere set aan bronnen wordt doorgerekend. De uurlijkse berekeningen maken OPS-ST ook zeer geschikt voor het vergelijken van output met kortdurende lokale meetcampagnes of om de dagelijkse gang in concentraties/deposities te bestuderen. Tevens kan OPS-ST gebruikt worden om Gaussische modellen met LES modellen te vergelijken. Bovendien is in dit onderzoek de ontwikkeling in OPS-ST voorzien om uurlijks variërende emissies te kunnen voorschrijven waardoor het effect van variabele emissies in de tijd op de concentraties en deposities beter geschat kan worden.

5.2.2.5 DALES

DALES is een Large Eddy Simulation (LES) model. Dit model berekent zowel de luchtstroming als de verspreiding, reactie en depositie van vervuilende stoffen, met een hoge resolutie in ruimte en tijd. Het biedt daarmee de gecombineerde voordelen van Gaussische pluimmodellen (namelijk, de ruimtelijke resolutie) en chemische transportmodellen (expliciete berekening van transport, chemie & depositie). Hierdoor kunnen evaluatie en validatie van depositieberekeningen op detailniveau plaatsvinden. Het nadeel is dat de benodigde rekentijd en computerkracht aanzienlijk groter zijn dan bij andere modellen. Daarom worden DALES berekeningen meestal uitgevoerd voor een klein gebied en over beperkte perioden (circa één week). Door verschillende kortere episodes met uiteenlopende meteorologische condities en emissies door te rekenen, ontstaat een reeks 'snapshots' die samen een relatief compleet beeld geven op hoge resolutie en detailniveau – iets wat grid- en pluimmodellen niet kunnen bieden.

De vergelijking met metingen geeft veel inzicht in hoe verschillende atmosferische processen onder diverse omstandigheden bijdragen aan de uiteindelijke depositie. Dit is belangrijke informatie voor de ontwikkeling van de nieuwe depositieparametrisatie voor de vegetatietypen van de Nieuwkoopse Plassen (Doel 1).

Bronsterktebepaling van emissies (Doel 2 en 4) gebeurt op basis van mobiele metingen en een Gaussisch pluimmodel van hoe een pluim zich vormt vanaf de emissielocatie. Met DALES kan een detailvergelijking met het gebruikte Gaussisch pluimmodel worden gemaakt.

DALES heeft de volgende invoerdata nodig: meteorologische gegevens, landgebruik, emissies en randvoorwaarden. Meteorologische gegevens worden van dezelfde bron betrokken als voor LOTOS-EUROS, namelijk ECMWF. Deze worden geïnterpoleerd vanuit de brondata op het fijne rooster van DALES. De ECMWF-gegevens worden in DALES alleen gebruikt als beginschatting voor het meteorologische veld, in volgende stappen berekent DALES dit zelf.

DALES maakt gebruik van dezelfde emissiegegevens als LOTOS-EUROS en OPS. En net als voor LOTOS-EUROS moeten voor DALES de (TEMPO) tijdseries gebruikt worden voor de verdeling van emissies over de tijd.

Ook voor landgebruik wordt gebruik gemaakt van dezelfde data als LOTOS-EUROS: de ESA en CORINE landgebruikskaarten. Voor DEPAC wordt daarnaast ook de TOP10NL (PDOK, 2023, Referentie <https://www.pdok.nl/introductie/-/article/basisregistratie-topografie-brt-topnl>, 2023) gebruikt uit de Basisregistratie Topografie, een dataset met een resolutie van 10 x 10 meter. De gebruikte landgebruikstypen in deze kaarten worden via een vertaaltabel omgezet naar de landgebruikstypen waar het depositiemodel DEPAC mee kan werken. Daarnaast is een kaart nodig met informatie over de ondergrond, met name voor de vochtigheid van de bodem, een grootheid die een belangrijke rol speelt in de energiebalans van DALES-berekeningen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de BOFEK kaart (Heinen et al., 2022) en een model dat de relatie legt tussen bodemvochtgehalte en bodemwaterpotentieel (Van Genuchten, 1980).

De randvoorwaarden voor concentraties van vervuilende stoffen aan de noord-, oost-, west- en zuidkant van het rekegebied van DALES, worden bepaald met LOTOS-EUROS-berekeningen voor Zuid-Holland. Op deze manier wordt er in de berekeningen ook rekening gehouden met emissies die van buiten het domein naar binnen waaien. Voor de meteorologische variabelen worden dubbel-periodieke randvoorwaarden gebruikt. Dit betekent dat variabelen wind, vochtigheid en temperatuur op de oostgrens van het domein gelijkgesteld worden aan die op de westgrens en de variabelen op de noordgrens gelijk aan die op de zuidgrens. Omdat het rekendomein doorgaans klein is in vergelijking tot grootschalige meteorologische processen, zal het effect van deze aanname op de berekening van het stromingsveld een geringe impact hebben.

5.2.2.6 DEPAC

DEPAC (DEPosition of Acidifying Compounds) is een module die fluxen berekent op basis van concentraties van verschillende componenten op een vaste hoogte boven het maaiveld (van Zanten et al., 2010). Deze module wordt gebruikt voor fluxberekeningen in diverse atmosferische chemische

transport- en dispersiemodellen. DEPAC wordt toegepast in de meeste Nederlandse modellen, zoals OPS (Sauter et al., 2020), LOTOS-EUROS (Manders et al., 2017), en wordt ook gebruikt in alle modellen die voor dit onderzoek bij de Nieuwkoopse Plassen en de Haack worden ingezet.

Naast gebruik binnen deze modellen, wordt het zelfstandige DEPAC-1D model ingezet om NH_3 -fluxen bij het centrale meetpunt op de Nieuwkoopse Plassen te berekenen, op basis van lokale concentratiemetingen van NH_3 en SO_2 in combinatie met meteorologische gegevens. Daarbij wordt rekening gehouden met effecten van co-depositie met SO_2 , evenals met stomatale compensatiepunten voor NH_3 (Wichink Kruit et al., 2010).

DEPAC maakt gebruik van de bekende weerstandanalogie uit de elektriciteitsleer om fluxen te berekenen. De totale weerstand wordt berekend als de som van de reciproke aerodynamische weerstand (r_a), de quasi laminaire grenslaagweerstand (r_b) en de effectieve weerstand van het oppervlak (vaak vegetatieweerstand genoemd, r_c). De aerodynamische weerstand (r_a) en de quasi laminaire grenslaagweerstand (r_b) worden berekend in een schil rond DEPAC. Deze componenten zijn onder andere afhankelijk van weersomstandigheden en de diffusie eigenschappen van een specifieke stof. De effectieve weerstand van het oppervlak (r_c) wordt vervolgens in DEPAC zelf berekend. Hierin worden de verschillende componenten die een rol spelen bij depositieprocessen dicht bij het aardoppervlak meegenomen. De berekening van de effectieve weerstand van het oppervlak (r_c) in DEPAC is de reciproke som van de stomatale weerstand van de vegetatie (r_s), de weerstand van het externe bladwater (r_w) en de effectieve weerstand van de aardbodem zelf ($r_{\text{soil, eff}}$). Deze termen zijn afhankelijk van meteorologische en chemische omstandigheden, maar in hoge mate ook van het landsgebruikstype. Om betrouwbare berekeningen te kunnen maken van de depositiefluxen op de specifieke landgebruikstypen van de Nieuwkoopse Plassen, is het noodzakelijk deze landgebruikstypen aan DEPAC toe te voegen. De depositiefluxen gemeten op het centrale meetpunt in het gebied zullen worden gebruikt om de berekeningen in DEPAC te valideren en de parameters van de procesbeschrijving beter te schatten. Om de vergelijking met het centrale meetpunt gemakkelijker te maken, zal er in eerste instantie met het zelfstandige DEPAC-1D model gewerkt worden. Vervolgens kunnen de nieuwe aanpassingen in DEPAC worden toegepast in de overige modellen (OPS, LOTOS-EUROS en DALES).

5.2.3 Overeenstemming van input

Om de resultaten van OPS-LT en LOTOS-EUROS goed te kunnen vergelijken is het belangrijk om de invoer op elkaar af te stemmen. De meest essentiële invoer zijn hierbij de emissies waarmee de modellen gevoerd worden. Hieronder wordt beschreven waarop deze zijn gebaseerd voor beide modellen. Wat betreft de andere invoer zoals meteorologie en landgebruik is het besluit genomen om de standaard invoer voor elk model te gebruiken voor de overzichtsberekeningen, aangezien het afstemmen hiervan een tijdsintensieve taak is. Tijdens het vervolg van dit onderzoek zal gekeken worden naar hoe dit aangepakt kan worden voor de verdere berekeningen.

Emissies

Voor emissies wordt er binnen Nederland standaard gebruik gemaakt van de gegevens van de Emissieregistratie. Deze registreert jaarlijks de emissies van alle relevante Nederlandse bronnen. De dienst berekent de meeste emissies zelf en controleert jaarlijks aangeleverde bedrijfsemissies. De emissiedata wordt ruimtelijk verdeeld, zodat bekend is waar emissies vrijkomen (www.emissieregistratie.nl). Voor dit onderzoek heeft de Emissieregistratie NO_x - en NH_3 -datasets geleverd met een hogere ruimtelijke resolutie.

Om de modeluitkomsten goed met elkaar te kunnen vergelijken, is het noodzakelijk dat de ingevoerde emissies overeenkomen. Hiervoor is een emissieset samengesteld die specifiek is afgestemd op de Nieuwkoopse Plassen. Als basis is de emissieset gebruikt van de Grootschalige Concentratiekaart (GCN) (Mijnen-Visser et al., 2025). Deze set bevat puntbronnen voor grote bedrijven en emissies verdeeld over vlakken van 1 x 1 kilometer. Deze resolutie geldt tot een aantal tientallen kilometers buiten de Nederlandse grens; verder van de grens neemt de resolutie geleidelijk af. In deze set worden de emissies binnen een uitsnede van 14 x 14 kilometer rondom de Nieuwkoopse Plassen, voor alle sectoren behalve stallen, vervangen door emissies met een hogere resolutie (500 x 500 meter). De veldemissies worden vervangen door emissies uit INITATOR (Kros et al., 2019). De overige sectorale emissies komen overeen met de emissies die worden gebruikt in de Monitor Stikstofdepositie in Natura-2000 gebieden (WA Marra et al., 2024).

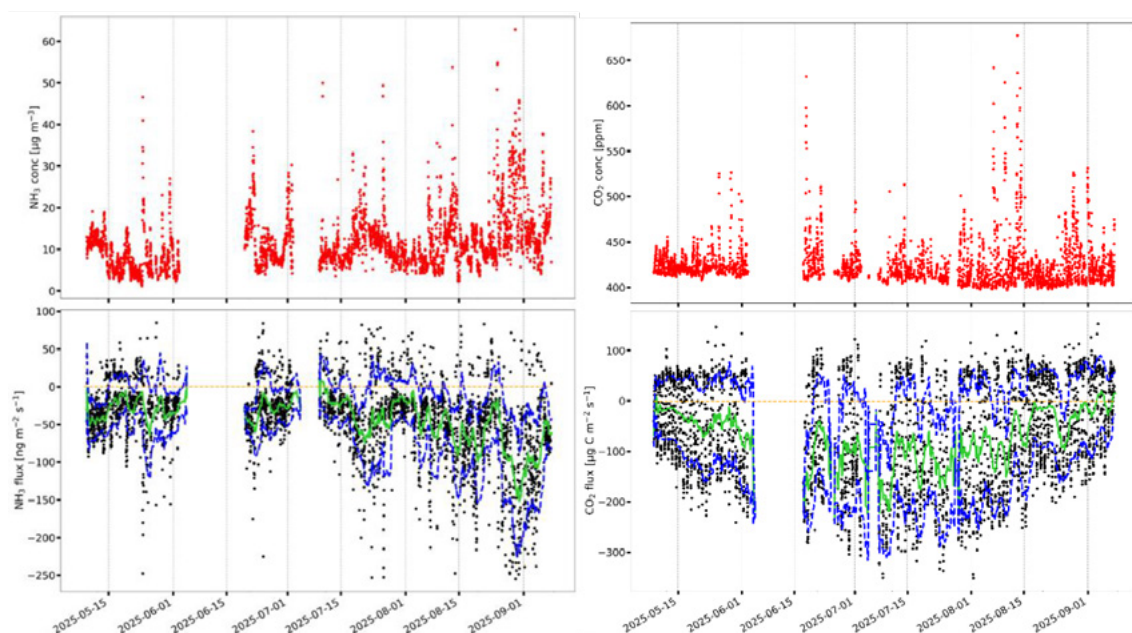
6 Resultaten

6.1 Metingen

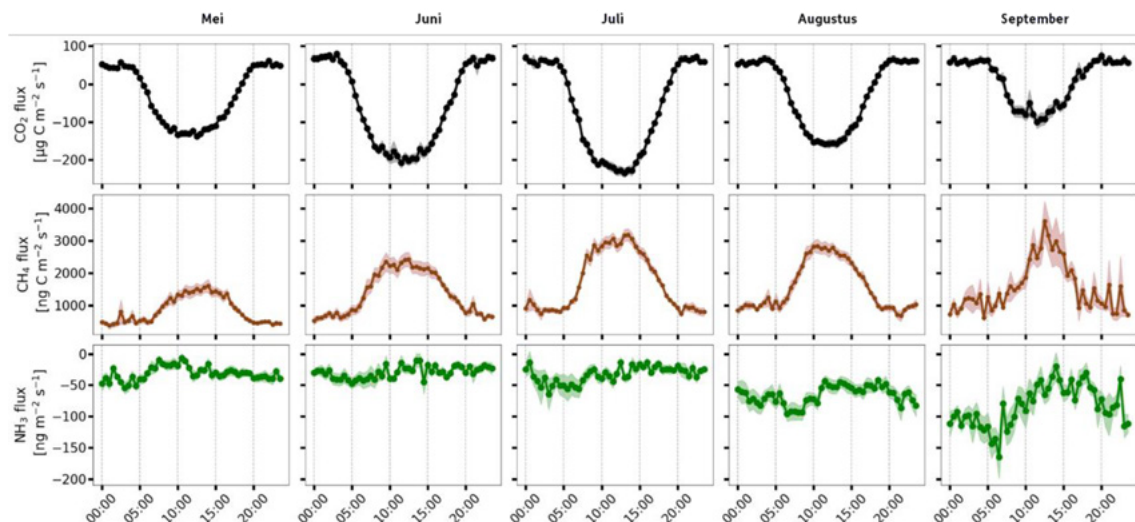
6.1.1 Centraal meetpunt

Op het centrale meetpunt levert het ammoniakinstrument vanaf begin mei 2025 bruikbare gegevens op. In de bovenste helft van Figuur 24 (links) is te zien hoe de laagst gemeten ammoniakconcentratie (de rode punten) rond de 4-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ligt, met incidentele pieken tot boven 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Linksonder staan de ammoniak-fluxmetingen. Het merendeel van de metingen liggen onder de nullijn, wat betekent dat de vegetatie op die momenten NH_3 uit de atmosfeer opneemt (depositie). Er zijn ook metingen boven de nullijn te zien, wat duidt op emissie. Dit treedt meestal op wanneer dunne waterlaagjes op de planten verdampen, waarin eerder NH_3 was opgenomen.

In de twee rechterdelen van de grafiek staat CO_2 weergegeven. Hier is duidelijk te zien dat in de zomer, bij veel zonlicht, de opname van CO_2 door het gewas het grootst is. Dit blijkt uit de diepste delen (meest negatieve waarden in de onderste subplot) van de grafiek.



Figuur 24: Links tijdreeks van de ammoniakconcentratie (boven, in rood) en de flux (onder) per half uur (in zwart, gemiddeld (groen) gemiddeld met standaarddeviatie (in blauw)). Gaten in de dataset komen door stroomuitval of uitval van het meetinstrument. Rechts idem voor CO_2 .



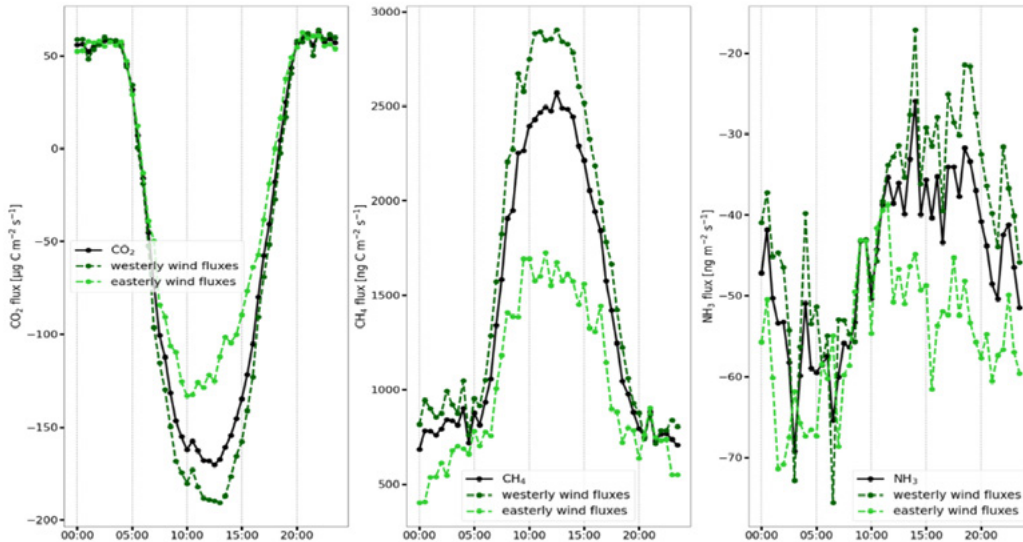
Figuur 25: Gemiddelde dag-nachtvariatie van de flux per maand voor de drie gasen: CO₂, CH₄ en NH₃.

Figuur 25 toont de patronen van de fluxmetingen per maand gegroepeerd als een gemiddeld dag- en nachtpatroon. De bovenste zwarte lijnen laten de CO₂-flux zien: planten nemen overdag CO₂ op uit de atmosfeer (waardoor de waarden onder de nullijn liggen) en geven een deel 's nachts weer af. De middelste figuur is juli, de maand met het meeste zonlicht en de hoogste temperaturen. De middelste set figuren (bruine lijnen) laten methaangas zien dat in de bodem ontstaat en vervolgens vrijkomt in de atmosfeer. Deze figuren tonen uitsluitend positieve waarden. Omdat methaanvorming sterk afhankelijk is van de temperatuur, is de emissie het hoogste in de zomer. In de onderste set figuren (groene lijnen) is de ammoniakflux weergegeven. Gemiddeld over de maand is de ammoniakdepositie vrij constant gedurende de 24 uur in een dag, met name in de eerste drie maanden. In augustus en september ontstaat echter een patroon met een lagere waarde (dus meer depositie) in de ochtend; opname in dauwlagen kan hiervoor een verklaring zijn.

Over de vijf gemeten maanden is een netto opname van 3000 kilo CO₂ per hectare te zien, een afgifte van ongeveer 100 kilo methaan per ha en een depositie van rond de 3 kilo NH₃ per hectare. Dit laatste getal komt overeen met circa 200 mol droge ammoniakdepositie per hectare. Deze waarden kunnen nog niet zonder meer worden geëxtrapoleerd naar een jaarsom. Om de totale stikstofdepositie te bepalen, zijn ook gegevens over neerslag, NO_x, HNO₂ en HNO₃ en deeltjes nodig.

Bij de start van de metingen was het hele terrein om de mast heen gemaaid, op een strook riet direct langs het water na. Gedurende het groeiseizoen ontstaat op het terrein een tweedeling, met lagere vegetatie aan de oostkant van de mast en meer opschietend riet aan de westzijde. Dat is het gevolg van het beheer van het terrein; waarbij het oostelijk deel in augustus wordt gemaaid en het westelijk deel in de winter. Als alle fluxmetingen bij elkaar worden gezet, maar verdelen in metingen met wind uit het oosten (0-180 graden) en wind uit het westen (180-360 graden), dan is een duidelijk verschil te zien tussen de twee delen van het terrein (Figuur 26). De drie panelen laten CO₂, CH₄ en NH₃ zien, de lichtgroene lijnen geven de resultaten weer bij oostelijke wind, donkergroen bij westelijke wind. De lage vegetatie aan de oostkant heeft minder bladoppervlak en neemt minder CO₂ op, de lichtgroene lijn gaat minder "diep" naar beneden dan de donkergroene lijn. Voor methaan is een hogere emissie uit het westen zichtbaar. Uit eerder onderzoek (Hendriks et al, 2007) is bekend dat methaanemissie vooral afkomstig is uit de sloten, waardoor dit patroon overeenkomt met de verwachtingen. Voor ammoniak is de depositie juist hoger aan de oostzijde. Dit hangt waarschijnlijk minder samen met de vegetatie, en wordt vooral veroorzaakt door hogere concentratieniveaus die optreden wanneer de wind uit het oosten waait.

In het volgende rapport wordt de analyse beschreven van de vergelijking van de gemeten fluxgegevens in combinatie met de gegevens van gewashoogte, bodemtemperatuur, neerslag, met wat te verwachten is op basis van literatuur. Deze analyse draagt bij aan het beter begrijpen en verklaren van hoe depositie werkt (doel 1).

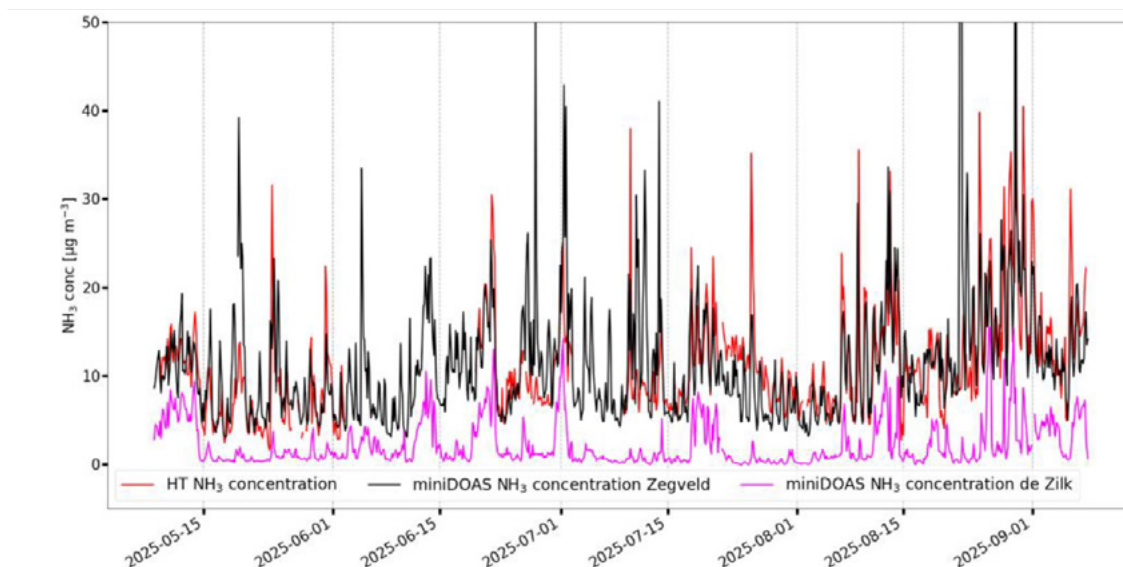


Figuur 26: Dag-nachtpatronen in de hele dataset (zwart) gesplitst naar wind uit het westen (donkergroen) en uit het oosten (lichtgroen). Links voor CO₂, midden voor CH₄ en rechts voor NH₃.

Tijdschalen in de metingen

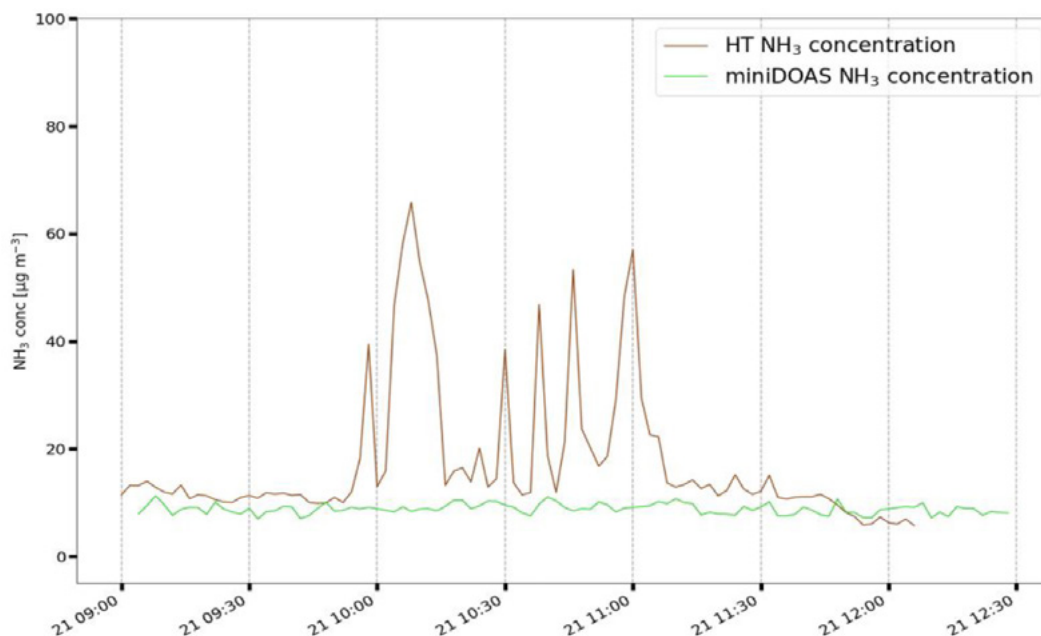
De concentratiepatronen laten nog geen duidelijk seizoenspatroon zien, omdat de resultaten voor de winterperiode nog ontbreken. Gedurende de hele meetperiode tot nu toe zijn er bijvoorbeeld zowel emissies uit mestaanwending als uit de stallen. In de komende maanden (na half september) worden er geen veldemissies verwacht in de gebieden rondom het natuurgebied en zijn de landbouw gerelateerde NH₃-emissies voornamelijk aan de stallen toe te wijzen. In de winter nemen de meeste emissies die met natuurlijke processen te maken hebben af, terwijl dit voor verbrandings- en industriële emissies niet noodzakelijk het geval is. De verwachting is dan ook dat in de komende maanden de NH₃-concentraties in het gebied zullen dalen, maar dat de CO₂-, CH₄- en ook NO_x-concentraties zullen stijgen. Dit komt niet zozeer doordat de emissies sterk stijgen, maar vooral doordat de atmosfeer in de winter rustiger is en luchtverontreiniging zich minder ver omhoog mengt. Hierdoor verzamelt de vervuiling zich in een kleiner luchtvolume.

Door de concentratiegegevens van het centrale meetpunt nu te vergelijken met de LML-metingen aan de kust (de Zilk) en vlakbij (Zegveld), is te zien in Figuur 27 dat de niveaus van NH₃ op de twee stations bij Nieuwkoop dicht bij elkaar liggen. Ook zijn deze duidelijk hoger dan wat er aan de kust gemeten wordt. Pieken in de rode lijn, die de metingen aan de kust laten zien, treden met name op als de wind uit oostelijke richting waait en de lucht vanuit ons land naar de zee waait. Ook de rode en zwarte lijnen laten dan pieken zien. Die pieken zijn dus niet per se van nabijgelegen bronnen rondom Nieuwkoop, maar zijn het resultaat van allerlei bronnen bovenwinds.



Figuur 27: Metingen van de NH_3 -concentratie vergeleken tussen het centrale meetpunt (rood) en de LML-stations Zegveld (zwart) en de Zilk (roze). Voor het bestuderen van seizoensvariatie is de dataset nog te klein. Wel zijn variaties te zien met een tijdschaal van weken met hogere en lagere concentraties, afhankelijk van bijvoorbeeld oostelijke of westelijke wind.

Bij inzoomen in Figuur 27 is het effect van lokale activiteiten in de metingen terug te zien. Een voorbeeld daarvan staat in Figuur 28. Gedurende een uur komt de wind eerst over Zegveld (LML-station), dan over een bemest weiland en daarna over het centrale meetpunt. De concentratie op dat meetpunt is dan ongeveer 40-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hoger dan op het LML-station. Als de wind draait, waait deze NH_3 -pluim niet meer over het centrale meetpunt en draagt dan ook op deze locatie niet verder bij aan de depositie. Door naar het voorkomen van dit soort pluimen van lokale bronnen te kijken, kunnen de depositiemetingen mogelijk worden gesplitst in bijdragen van bronnen in de buurt.



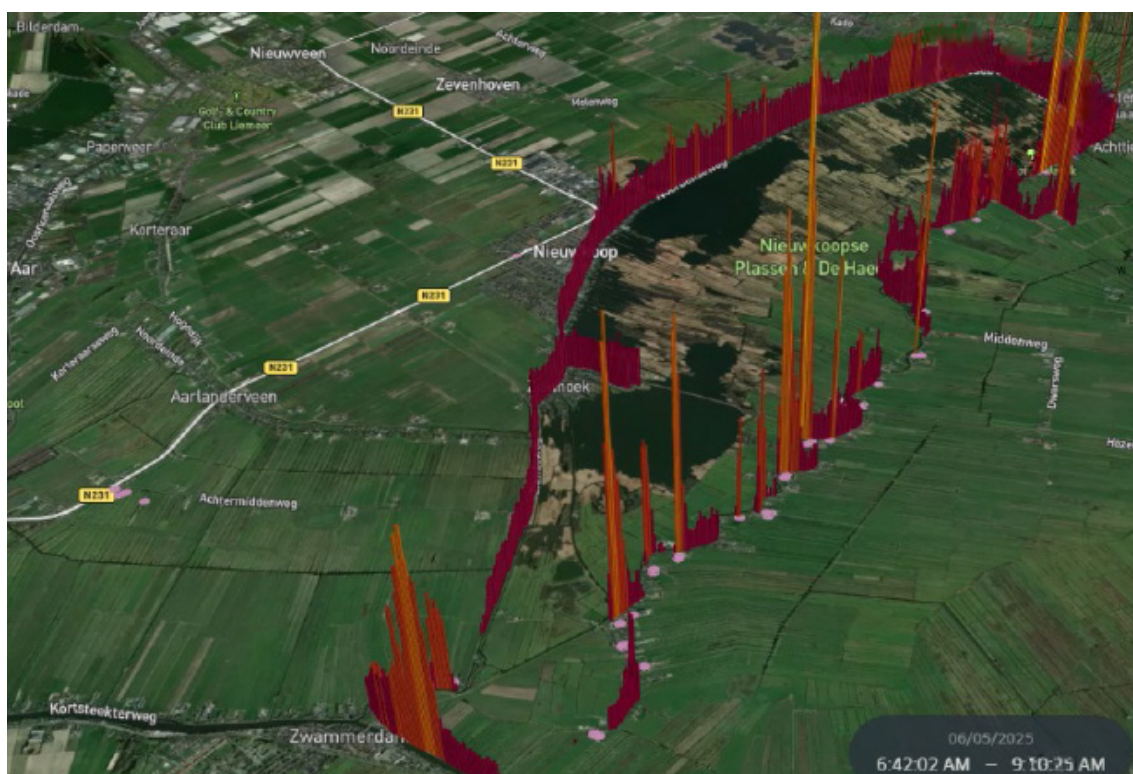
Figuur 28: Verschil in de metingen bij zuidelijke wind waarbij de lucht eerst langskomt op Zegveld (LML, groene lijn) dan passeert over een bemest weiland en daarna aankomt op het centrale meetpunt (bruine lijn).

6.1.2 Metingen verspreid over het gebied

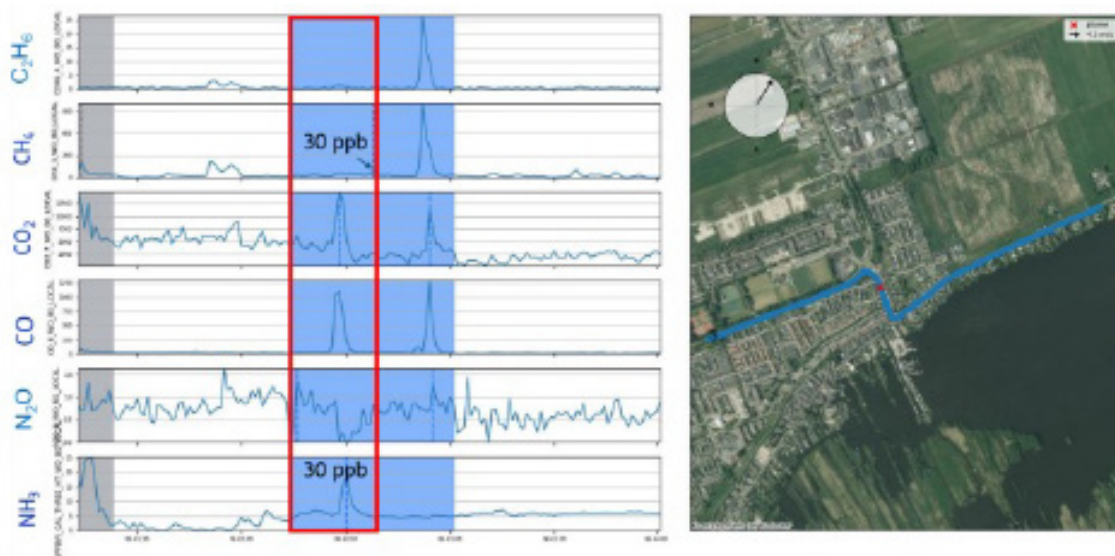
De data van de maandgemiddelde metingen zijn op het moment van schrijven nog (net) niet compleet genoeg en de verwerking daarvan wordt dan ook uitgesteld tot het volgende rapport. Dit geldt zowel voor de wet-only en bulkmetingen, als voor de resultaten van de Delta denuders en de passieve sampler-metingen.

6.1.3 Mobiele metingen

Lokale bronnen zijn op te sporen door met een meetwagen rond te rijden en de pluimen toe te wijzen aan mogelijke bronnen. Door met de meetwagen rond te rijden in het gebied zijn locaties zichtbaar waar zich bronnen van ammoniak of stikstofoxides bevinden. Op het centrale meetpunt is dan, net als bij het bemeste weiland uit Figuur 28 te zien of het signaal van de andere bronnen ook waarneembaar is. Tot het moment van schrijven zijn op 2 dagen mobiele metingen uitgevoerd. Een voorbeeld van een rondrit met de meetwagen is weergegeven in Figuur 29. Daarbij zijn op het meettraject de NH_3 -concentraties in de verticaal uitgezet. De hoogste pieken (geel) lopen op tot $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De hoogste piek in de concentratie hoeft niet per se ook de hoogste emissie te vertegenwoordigen, want het maakt uit hoeveel afstand er zit tussen de bron en het pad van de meetwagen.



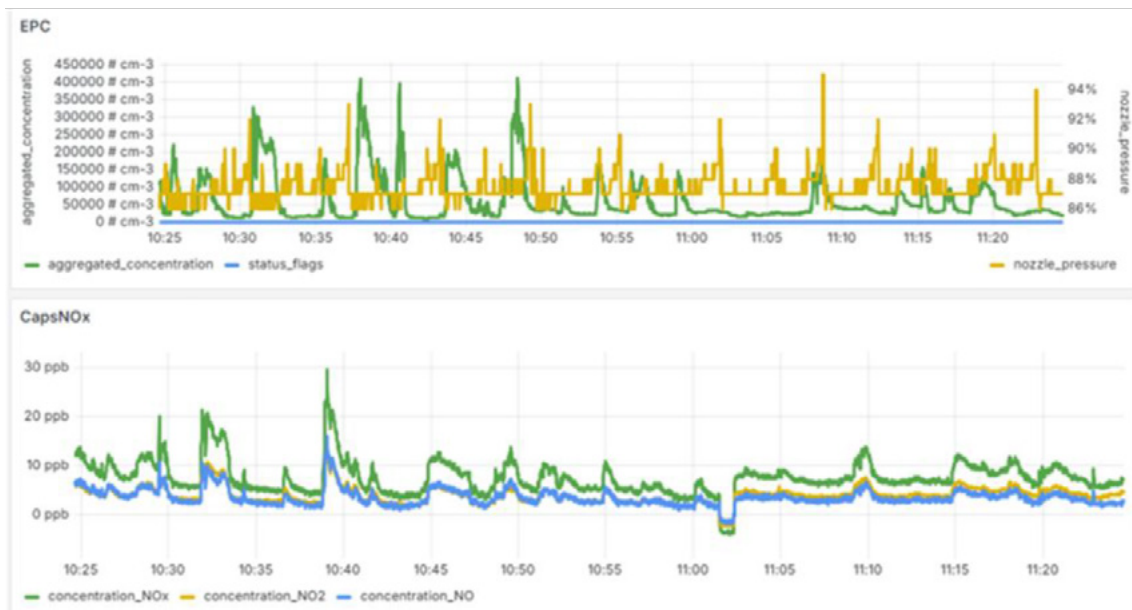
Figuur 29: Gemeten ammoniakconcentraties tijdens een rondrit om de Nieuwkoopse Plassen. De gele pijl geeft de gemiddelde windrichting aan. De hoogte geeft het niveau van de concentratie aan op die locatie.



Figuur 30: Een detail van de mobiele metingen (2 minuten) met twee verschillende bronnen.

Figuur 30 toont wat voor soort analyse mogelijk is met de mobiele metingen. De grafiek toont een detail van de metingen met de meetwagen waarbij naast NH_3 ook andere gassen zijn weergegeven. In de blauwe box zien we een 30 ppb NH_3 -piek (onderste lijn) en tegelijkertijd een CO- en CO_2 -piek. Vlak erna is een kleine (30 ppb) methaanpiek te zien. Hoewel methaan en ammoniak bij landbouwbronnen vaak samen te zien zijn is dat hier dus niet het geval. Gezien de aanwezigheid van een CO- en CO_2 -piek samen met een NH_3 -piek wordt deze door een verbrandingsmotor veroorzaakt. Wat even later wel zichtbaar is, is een piek in methaan en ethaan. Dit ethaangas komt alleen vrij bij verbranding of lekkage van fossiel (aard)gas. CO_2 en CO geven ook een piek, dus hier gaat het om een verbranding van aardgas zonder NH_3 -productie.

Voor doel 4 (rol van vliegverkeer) is een eerste verkennende meting uitgevoerd om te zien wat de karakteristiek is van gaspluimen die uit vliegtuigen komen. Om een optimaal signaal te krijgen is deze test vlakbij Schiphol uitgevoerd waar vliegtuigen op 150 meter hoogte overkwamen. Onder die omstandigheden zijn de pluimen zowel met deeltjes-aantallen als met NO_x waargenomen (Figuur 31). Op basis van deze resultaten wordt een schatting gemaakt voor vliegtuigen die op 500-1000 meter of hoger overkomen, zodat een optimale testlocatie voor vervolgmetingen in de buurt van Nieuwkoop kan worden bepaald. Bij deze bepaling is het van belang dat de gas- en deeltjespluim van een vliegtuig dat op 800 meter hoogte overkomt niet per se recht onder de vliegroute de grond raakt. Afhankelijk van hoe schuin de wind staat ten opzichte van het pad waar de uitlaatgassen in de atmosfeer terechtkomen, kan de gas- en deeltjespluim pas honderden tot meerdere kilometers verderop de grond bereiken.



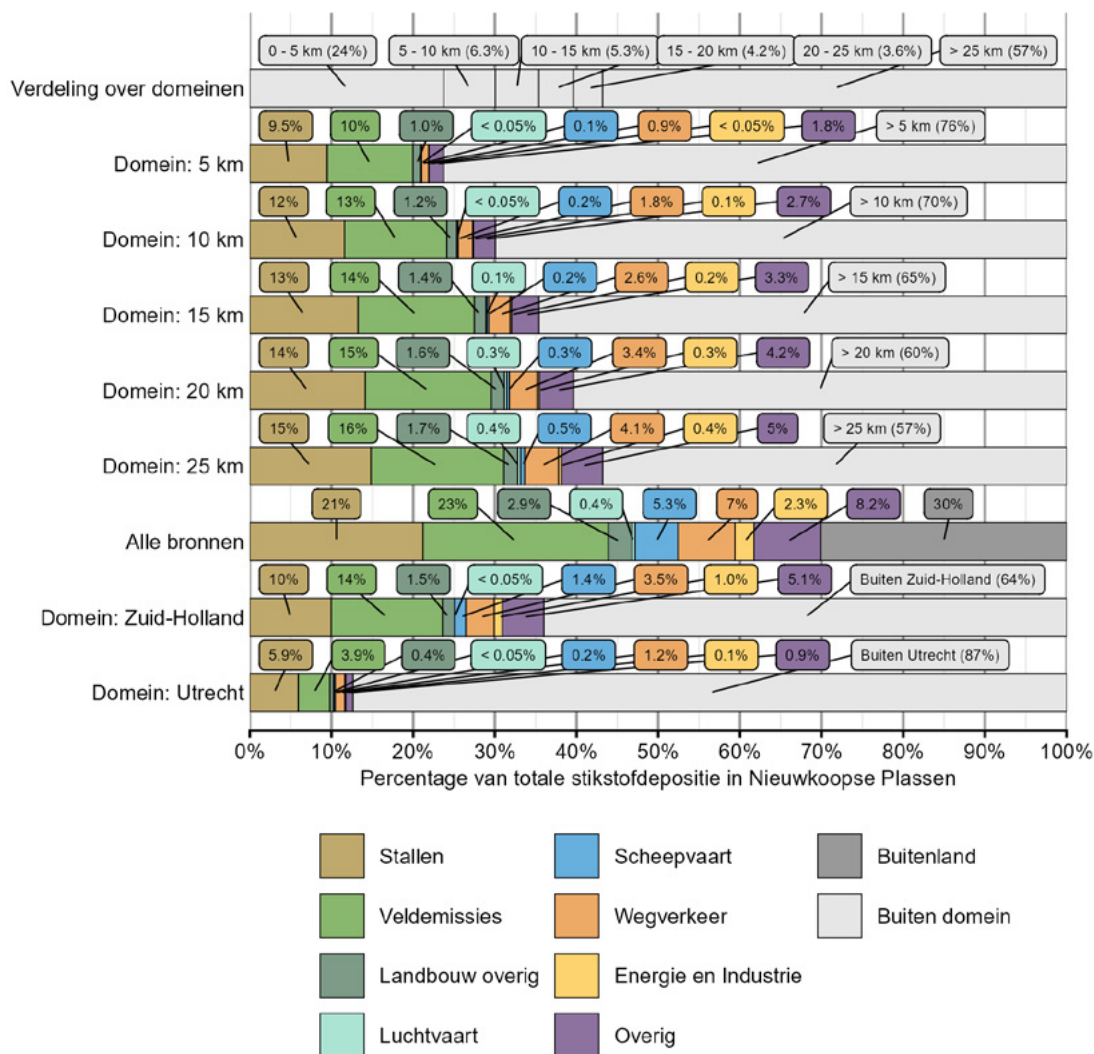
Figuur 31: Eerste pluimmetingen vlakbij Schiphol met pieken in de concentratie van NO_x (onderste grafiek) en deeltjesaantallen (bovenste grafiek) voor vliegtuigen die op ongeveer 150 m hoogte over kwamen.

6.2 Modellen

6.2.1 Overzichtsberendingen OPS

De resultaten van de overzichtsberendingen uit OPS staan in Figuur 33. De balken tellen allemaal op tot 100% van de totale stikstofdepositie in Nieuwkoopse Plassen, en worden geografisch en/of categorisch onderverdeeld. In de bovenste balk is de bijdrage te zien van verschillende geografische domeinen aan de totale stikstofdepositie. Een domein is gedefinieerd als het gebied waarvan de afstand tot de rand van het natuurgebied tussen de aangegeven waardes valt. In de volgende vijf balken wordt de bijdrage van de emissie categorieën uiteengezet voor het gebied van de rand van het natuurgebied tot de buitengrenzen van de respectievelijke domeinen (5, 10, 15, 20 en 25km), met daarnaast de bijdrage van alle bronnen die daarbuiten vallen. De één na laatste balk geeft de bijdrage van alle bronnen in Nederland weer, onderverdeeld naar emissie categorieën, en de bijdrage van emissies in het buitenland. De laatste twee balken geven de bijdrage onderverdeeld naar emissie categorieën weer voor alle bronnen in Zuid-Holland en Utrecht, en daarnaast de bijdrage van alle bronnen daarbuiten.

De verdeling van bijdragen uit de overzichtsberendingen zijn vergeleken met de verdeling in DASHview en komen hiermee bijna volledig overeen. Ook is de totale berekende depositie in Nieuwkoopse Plassen vergeleken met de totale depositie in de AERIUS Monitor voor het gebied. Het verschil is ongeveer 3%, wat gezien de verschillen in de methode (o.a. het rekenjaar, de emissies en grid op het natuurgebied) zeer klein is.



Figuur 33: overzichtsberekeningen uit OPS

Deze overzichtsberekeningen geven een goede eerste indicatie voor antwoorden op het tweede, derde en vierde doel van de provincie Zuid-Holland. Hierbij is het belangrijk om te vermelden dat dit voorlopige resultaten zijn die bestaan uit modelberekeningen die niet gekalibreerd zijn aan lokale metingen van het regionale meetnet. Ook worden er nationale gegevens gebruikt voor de emissies, die lokaal verfijnd zijn (zie 3.5.4). Hoewel er dus bruikbare informatie uit deze resultaten te halen is, vormt het geen gedegen basis om harde conclusies uit te trekken.

Het tweede doel van de provincie is “meer inzicht in de herkomst van de stikstofdepositie in het Natura 2000-gebied”. De overzichtsberekeningen geven een eerste indicatie van de herkomst van de stikstofdepositie op jaarbasis. Deze informatie kan in toekomstige rapportages uitgebreid worden door in beeld te brengen hoe de herkomst door het jaar heen verandert.

In het derde doel wordt voorgenomen om meer inzicht over de relatie tussen maatregelen gericht op emissiereductie en de depositie in Nieuwkoopse Plassen. Hoewel er nog geen scenario's met gedetailleerde gegevens zijn doorgerekend geven deze berekeningen een ruwe eerste schatting voor wat het beleidsbereik is. Deze berekeningen maken gebruik van generiek beschikbare informatie en laten zien dat de bijdrage van de verschillende bronnen binnen de eerste 5 kilometer rond het gebied 24% is. Deze is als volgt verdeeld: Landbouw 20.5%, Wegverkeer 0.9%, luchtvaart <0.05% industrie en energie <0,05%, scheepvaart 0.1% en alle overige categorieën 1.8%. In het geval dat lokale maatregelen beperkt worden tot een domein van 5 kilometer rondom het natuurgebied zou in het meest extreme geval, het stoppen van alle activiteiten met emissie van stikstofverbindingen, leiden tot een depositiereductie van ongeveer 24%. Bij uitbreiding van het domein naar 10 kilometer buiten het natuurgebied of heel Zuid-Holland is dan een reductie van ongeveer 30% respectievelijk 36% mogelijk. Het effect van emissiereducerende maatregelen is dus sterker naarmate de emissie dicht bij het natuurgebied ligt. Er is echter meer onderzoek nodig om de exacte potentiële reductie te kwantificeren, ook van minder ingrijpende maatregelen.

Het vierde doel gaat over het in kaart brengen van de impact van het overvliegende luchtverkeer op de depositie in Nieuwkoopse Plassen. In het emissiebestand wat gebruikt is voor de overzichtsberekeningen wordt inderdaad een aanvliegroute beschreven waarin vliegtuigen laag genoeg (600-800 meter) overvliegen om bij te dragen aan de stikstofdepositie in het natuurgebied. Uit de berekeningen blijkt echter dat deze bijdrage zeer beperkt is (minder dan 0.05%). Wanneer het domein uitgebreid wordt tot een gebied wat Schiphol bevat groeit de bijdrage iets, maar blijft nog steeds onder een half procent van de totale stikstofdepositie. Het is mogelijk dat vliegtuigen sporadisch lager overvliegen dan beschreven in het emissiebestand, en dat deze emissiepieken kunnen veroorzaken. Deze pieken zouden wellicht gemeten kunnen worden met de mobiele meetapparatuur, maar zullen over een langere periode in vergelijking met andere bronnen waarschijnlijk nog steeds een kleine bijdrage aan de depositie leveren.

7 Voortgang

Het meetprogramma voor de Nieuwkoopse Plassen en de Haeck is gestart in maart 2025 en is vanaf mei volledig operationeel. De meetdata die tot nu toe zijn verzameld, leveren op het eerste gezicht veel nieuwe informatie op, waarmee de vier gestelde doelen naar verwachting goed gehaald kunnen worden. Zo is te zien dat in deze meetperiode de laagst gemeten ammoniakconcentratie rond de 4-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ligt, met incidentele pieken tot boven 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

7.1 Doel 1: Meer kennis van depositie

De metingen voor het bepalen van de droge depositie van ammoniak verlopen goed. Ook de biometeorologische data, die nodig is om de gemeten depositie te kunnen vergelijken met de gemodelleerde waarden, is beschikbaar. De verwachting is dat de concentratieniveaus van NH_3 in de winter zullen dalen en dat aan het eind van het eerste jaar voldoende gegevens beschikbaar zijn om de eerste vergelijkingen met het model te kunnen doen. Indien er iets aan de meetopstelling toegevoegd moet worden, zijn NO_2 -depositiemetingen waardevol, met name in relatie tot het halen van doelstellingen 3 en 4.

7.2 Doel 2: Welke bronnen zijn belangrijk?

Wat betreft de herkomst van de depositie en de respectievelijke bijdragen van verschillende typen bronnen, geven de overzichtsberekeningen uit de modellen een eerste indicatie van de herkomst van de stikstofdepositie op jaarbasis. Deze berekeningen maken gebruik van generiek beschikbare informatie en laten zien dat de bijdrage van de verschillende bronnen binnen de eerste 5 kilometer rond het gebied 24% is. Deze is als volgt verdeeld: Landbouw 20.5%, Wegverkeer 0.9%, luchtvaart <0.05% industrie en energie <0,05%, scheepvaart 0.1% en alle overige categorieën 1.8%. Hoewel er nog geen specifieke scenario's zijn doorgerekend, geven deze eerste berekeningen een globale indicatie van het mogelijke bereik.

Tegelijkertijd leveren de continue metingen in combinatie met de gegevens van de mobiele metingen voldoende data om vanaf nu eerste berekeningen aan lokale emissies te gaan doen, en zo verschillen tussen maanden, de eerste vergelijkingen te doen tussen gemeten depositie en berekende depositie en verschillen te verklaren aan de hand van status van de vegetatie. Ook kan dan het relatieve belang van bronnen worden ingeschat op basis van mobiele metingen. In de winter is een verandering te verwachten waarbij sommige bronsystemen minder en anderen meer zullen bijdragen aan de depositie. Om balans te houden in de communicatie over hoe belangrijk verschillende bronnen zijn, is het essentieel dat ook in die periode over voldoende gegevens beschikbaar zijn voordat conclusies worden getrokken.

7.3 Doel 3: Wat doen de maatregelen?

Om de impact van maatregelen te kunnen beoordelen, zijn in theorie metingen nodig vóór de implementatie én metingen erna. Voor zover bekend zijn er sinds de start van het meetprogramma nog geen maatregelen getroffen. Met de metingen die tot nu toe zijn verzameld, wordt de '0-situatie' dataset gevuld. Vanuit wetenschappelijk oogpunt zou het wenselijk zijn om dit gedurende een periode van 3 jaar te doen. Zodra er daadwerkelijk maatregelen worden uitgevoerd in het gebied, kan de data van vóór en na de maatregelen met elkaar vergeleken worden. Dit is vooral effectief wanneer precies bekend is waar en welke maatregel wordt geïmplementeerd, zodat in dat specifieke deel van het gebied – bijvoorbeeld met de meetwagen – gericht extra metingen kunnen worden uitgevoerd.

7.4 Doel 4: Wat is de invloed van vliegverkeer?

Het is duidelijk dat er veel vliegverkeer boven het gebied is. Of deze bijdrage goed meetbaar is, is op dit moment nog niet bekend. De eerste testmetingen bij Schiphol zijn inmiddels uitgevoerd en deze worden de komende maanden verder uitgebreid.

7.5 Vervolg

Het is op dit moment nog te vroeg om kwantitatieve uitspraken te doen over de depositieniveaus of de bijdrage van verschillende brontypen op basis van metingen. Zodra ook winterdata beschikbaar is, ontstaat een eerste indruk.

Wanneer in mei volgend jaar data uit alle vier seizoenen beschikbaar zijn, valt er een heel jaar te analyseren en daarover zijn dan de eerste conclusies te trekken.

Het samenspel van emissie, transport en depositie hangt sterk samen met weersomstandigheden, zoals windrichting, temperatuur en neerslag. Daarom is het verstandig om het meetprogramma niet na één jaar te stoppen, maar om het onderzoek meerdere jaren voort te zetten. Dit is bovendien essentieel om de effecten van eventuele emissiereductiemaatregelen goed te kunnen evalueren.

Tot op heden is het nog niet gelukt om informatie over activiteiten in het gebied structureel binnen te krijgen. De hoop is dat de eerste resultaten die nu beschikbaar zijn concreet laten zien waarvoor de activiteitgegevens nodig zijn, en dat het daardoor wel lukt die informatie te krijgen.

Bij de start van het onderzoek lag de focus op NH_3 . Het uitbreiden van de metingen naar NO_x is een belangrijke volgende stap. Het toevoegen van NO_x -metingen aan het centrale meetpunt geeft mogelijk ook inzicht in de impact van vliegverkeer. Of dit in de praktijk goed lukt, hangt af van de sterkte van het NO_x -signaal van deze bron ten opzichte van andere NO_x -bronnen.

Referenties

<https://www.zuid-holland.nl/online-regelen/subsidies/subsidies/landbouw-subsidieregeling/?reload=true>

TNO (2024). Het gedrag van stikstofverbindingen in de atmosfeer (Rapportnummer R10757).

<https://www.natura2000.nl/gebieden/zuid-holland/nieuwkoopse-plassen-de-haack>

<https://www.schiphol.nl/nl/schiphol-als-buur/woon-ik-onder-een-vliegroute/>

Wamelink, W., Dobben, H. van, Zee, F. van der, Hinsberg, A. van, R. Bobbink, 2023 Overzicht van kritische depositiewaarden voor stikstof, toegepast op habitattypen en leefgebieden van Natura 2000: Herziening 2023

Beirnaert, J., Braam, M. and Zanten, M.v., 2023. MAN, wat een meetnet! Lucht, 3: 31–35.

Hoogerbrugge, R. et al., 2024. Uncertainty in the determined nitrogen deposition in the Netherlands. Status report 2023, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.

Lolkema, D.E. et al., 2015. The Measuring Ammonia in Nature (MAN) network in the Netherlands. Biogeosciences, 12(16): 5133–5142.

Plantaz, M.A.H.G., 1998. Surface/atmosphere exchange of ammonia over grazed pasture Landbouwniversiteit Wageningen, <https://edepot.wur.nl/196305>
There are no sources in the current document.

Van Zanten, M.C.v., Sauter, F.J., Wichink Kruit, R.J., Jaarsveld, J.A.v., Pul, W.A.J.v., 2010. Description of the DEPAC Module. Dry Deposition Modelling with DEPAC_GC2010. RIVM.

Wichink Kruit, R., van Pul, W., Sauter, F., van den Broek, M., Nemitz, E., Sutton, M., Krol, M., Holtslag, A., 2010. Modeling the surface–atmosphere exchange of ammonia. Atmos. Environ. 44 (7), 945–957. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.049>.

Description of the DEPAC Module. Dry Deposition Modelling with DEPAC_GC2010. RIVM.
Sauter, F., Sterk, M., Swaluw, E.v.d., Kruit, R.W., Vries, W.d., Pul, A.v., 2020. The OPS Model; Description of OPS 5.0.0.0. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven.

Manders, A.M., Builtjes, P.J., Curier, L., Denier van der Gon, H.A., Hendriks, C., Jonkers, S., Kranenburg, R., Kuenen, J.J., Segers, A.J., Timmermans, R., 2017. Curriculum vitae of the LOTOS–EUROS (v2. 0) chemistry transport model. Geosci. Model Dev. (GMD) 10, 4145–4173. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4145-2017>.

Kranenburg, R., Segers, A. J., Hendriks, C., and Schaap, M.: Source apportionment using LOTOS-EUROS: module description and evaluation, Geosci. Model Dev., 6, 721–733, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-721-2013>, 2013.

Kranenburg, R., Schaap, M., Coenen, P., Thürkow, M., Banzhaf, S., PINETI-4: Modelling and assessment of acidifying and eutrophying atmospheric deposition to terrestrial ecosystems, German Environment Agency, 2024

Guevara, M., Colette, A., Guion, A., Petiot, V., Adani, M., Arteta, J., Benedictow, A., Bergström, R., Bolignano, A., Camps, P., Carvalho, A. C., Christensen, J. H., Couvidat, F., D'Elia, I., van der Gon, H., Descombes, G., Douras, J., Fagerli, H., Fatahi, Y., Friese, E., Frohn, L., Gauss, M., Geels, C., Hänninen, R., Hansen, K., Jorba, O., Kaminski, J. W., Kouznetsov, R., Kranenburg, R., Kuenen, J., Lannuque, V., Meleux, F., Nyiri, A., Palamarchuk, Y., Pérez García-Pando, C., Robertson, L., Russo, F., Segers, A., Sofiev, M., Struzewska, J., Timmermans, R., Uppstu, A., Valdebenito, A., and Ye, Z.: Technical note: Sensitivity of the CAMS regional air quality modelling system to anthropogenic emission temporal variability, *EGUsphere*, 2025, 1–47, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1287>, 2025.

Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., and Suttie, M.: The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3515–3556, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>, 2019.

R. Timmermans, D. van Pinxteren, R. Kranenburg, C. Hendriks, K.W. Fomba, H. Herrmann, M. Schaap, Evaluation of modelled LOTOS-EUROS with observational based PM10 source attribution, *Atmospheric Environment: X*, Volume 14, 2022, 100173, ISSN 2590-1621, <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100173>.

M. Thürkow, S. Banzhaf, T. Butler, J. Pültz, M. Schaap, Source attribution of nitrogen oxides across Germany: Comparing the labelling approach and brute force technique with LOTOS-EUROS, *Atmospheric Environment*, Volume 292, 2023, 119412, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119412>.

Lukas Blickensdörfer, Marcel Schwieder, Dirk Pflugmacher, Claas Nendel, Stefan Erasmí, Patrick Hostert, Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany, *Remote Sensing of Environment*, Volume 269, 2022, 112831, ISSN 0034-4257,

(Heinen, M., Mulder, H. M., Bakker, G., Wösten, J. H. M., Brouwer, F., Teuling, K., and Walvoort, D. J. J.: The Dutch soil physical units map: BOFEK, *Geoderma*, 427, 116–123, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116123>, 2022)

Van Genuchten, M. T.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898, <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>, eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>, 1980

Sauter, F., Siteur, K. Sterk, M., Van der Swaluw, E., Wichink Kruit, R., de Vries, W. (2025). The OPS-model. Description of OPS,5.3.1.0. [OPS-model.pdf](#)

Kros, H., van Os, J., Voogd, J. C., Groenendijk, P., van Bruggen, C., te Molder, R., & Ros, G. (2019). *Ruimtelijke allocatie van mesttoediening en ammoniakemissie: beschrijving mestverdelingsmodule INITIATOR versie 5*. (Wageningen Environmental Research rapport; No. 2939). Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/474513>

W. A. Marra et al. Monitor stikstofdepositie in Natura 2000-gebieden 2024, rapportnummer DOI 10.21945/RIVM-2024-0076.

Hendriks, D. M. D., van Huissteden, J., Dolman, A. J., & van der Molen, M. K. (2007). The full greenhouse gas balance of an abandoned peat meadow. *Biogeosciences*, 4(2007), 411–424. <https://doi.org/10.5194/bg-4-411-2007>

