



empowered by
**imec, Wageningen University & Research,
Radboud University and Radboudumc**



Eindrapportage
Environmental Sensing uitbreiding
verplichtingnummer 1400012711

<i>Auteur(s):</i>	Jasper Fabius, Upasna Rai, Burcu Celikkol, Shaojie Zhuang, Jan Vonk, Peter Laloli
<i>Opdrachtgever</i>	Ministerie van LNV, Louke Koopmans
<i>Datum:</i>	14-02-2024
<i>Review door:</i>	Gerjan Hilhorst
<i>Sensitivity:</i>	Public

1 Inhoud

1	Inhoud	2
2	Managementsamenvatting	3
3	Inleiding	4
4	Doel en aanpak	5
5	Voortgang	6
5.1	<i>Kalibratie</i>	6
5.2	<i>Ruimtelijke verspreiding</i>	11
6	Conclusies	22

2 Managementsamenvatting

Dit is de eindrapportage van verplichtingnummer 1400012711

OnePlanet Research Center en TNO willen een bijdrage leveren aan het verbeteren van het inzicht in de stikstofproblematiek. Het doel van het programma is een low-cost sensorplatform te ontwikkelen dat fijnmazig meten van stikstofverbindingen (in dit geval stikstofdioxide, NO₂ en ammoniak, NH₃) mogelijk maakt met daarbij een online ICT-infrastructuur voor de opslag en verwerking van meetgegevens.

LNV ondersteunt dit programma met dit uitbreidingsproject waarin de doelen zijn om de kalibratie van de huidig beschikbare NH₃ sensoren te verbeteren, en de ruimtelijke verspreiding van ammoniak rond een bron in temporele zin beter in kaart te brengen.

De werkzaamheden zijn 1 september 2022 gestart en na het bepalen van de locaties van de sensorboxen, zijn deze in september en oktober 2022 geplaatst op een referentiestation van het RIVM en een proefboerderij. Sindsdien wordt data verzameld en geanalyseerd.

Uit de inzichten die we tot nu toe hebben verkregen uit de opstellingen op het RIVM-referentiestation en de opstellingen op de proefboerderij, blijken de sensoren onderling een grotere variatie te vertonen en treedt er eerder degradatie op dan verwacht. Van beide effecten kunnen we leren en er zijn ook maatregelen tegen te treffen, maar dat vereist waarschijnlijk een andere aanpak dan oorspronkelijk geschetst. Er is een project voor een relatief grootschalige validatiestudie opgezet. Het doel van deze validatiestudie is om in kaart te brengen welke factoren bijdragen aan degradatie, hoe we daar mogelijkwijs voor kunnen compenseren, en hoeveel variatie er tussen verschillende sensorboxen blijft bestaan ondanks de maximaal haalbare kalibratie. Dit project willen we ook bespreken met LNV.

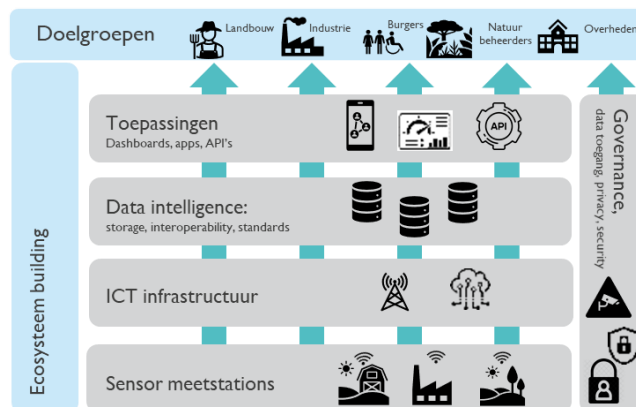
De meeste hardware onderdelen van de sensorbox zijn robuust gebleken voor een meetperiode van minstens een jaar. Dat geldt echter niet voor de NH₃ sensor. Een eenmalige kalibratie is niet afdoende om de accuraatheid van de sensoren langdurig te waarborgen. Daar staat tegenover dat de sensoren wel gevoelig zijn voor fluctuaties in NH₃ als gevolg van veranderingen van windrichting. Het meteostation dat benodigd was voor de lokale windmetingen was succesvol geïnstalleerd, maar er waren helaas veel missende gegevens door technische mankementen. Het verschil tussen de metingen van het lokale meteostation en die van nabijgelegen KNMI-stations laat zien dat het belangrijk is om lokaal meteorologische metingen te doen. Een Gaussisch pluimmodel is gebruikt om te schatten hoe NH₃ concentraties fluctueren als gevolg van een verandering in windrichting en -snelheid, en de mate van NH₃ emissie uit de stal. Er zijn korte periodes geweest waarin de geschatte en gemeten concentraties relatieve overeenkomsten vertoonden (d.w.z. in beide gevallen hogere waarden op locatie X dan op locatie Y).

Er is nog ruimte voor verbetering mogelijk en vereist om de kwaliteit van de NH₃ metingen te verbeteren. Daarnaast kunnen ook meer geavanceerde verspreidingsmodellen worden gebruikt om tot een nauwkeurigere overeenkomst tussen sensormeting en modelschatting te komen.

3 Inleiding

OnePlanet Research Center en TNO willen een bijdrage leveren aan het verbeteren van het inzicht in de stikstofproblematiek. Het doel van het programma is een low-cost sensorplatform te ontwikkelen dat fijnmazig meten van stikstofverbindingen (NO₂ en NH₃) mogelijk maakt met daarbij een online ICT-infrastructuur voor de opslag en verwerking van meetgegevens. Hierbij wordt gebruik gemaakt van componenten die commercieel verkrijgbaar zijn, gebaseerd op de best mogelijke standaarden voor meten, dataverwerking en beveiliging. Vervolgens is het de bedoeling om de specificatie (blauwdruk) waarin het ontwerp en de implementatie is vastgelegd te delen met de markt zodat een fijnmazig, transparant en modulair sensornetwerk en een open digitaal platform kan ontstaan.

Gedurende de eerste fase worden 3 pilots uitgevoerd om het bewijs te leveren dat de oplossing werkt (proof of concept) en praktijkervaring op te doen. Het project richt drie pilots in met sensorboxen (in stedelijke/industriële omgeving, in landelijke/agrarische omgeving en indien mogelijk in een natuurgebied). Daarnaast wordt gemeten op één of meer referentielocaties (meetstation van RIVM).



Figuur 1 Lagenmodel voor Environmental Sensing

De grootste technische uitdaging in ons programma is dat er op dit moment voor ammoniak geen sensoren op de markt zijn die voldoen aan de gewenste combinatie van lage kosten, gevoeligheid en nauwkeurigheid voor lage concentraties NH₃ in de buitenlucht.

LNV heeft aan OnePlanet Research Center/TNO gevraagd waar zij het programma zou kunnen versterken. Dit is welkom op dit laatste punt: in deze uitbreiding streven we ernaar om met de huidig beschikbare sensoren in combinatie met data-analyse, dichter in de buurt te komen van de vereiste gevoeligheid voor ammoniak.

4 Doel en aanpak

1. De kalibratie van de huidig beschikbare sensoren verbeteren, en daarmee de gevoeligheid verbeteren en uiteindelijk detectielimiet verlagen.
2. De ruimtelijke spreiding van ammoniak rond een bron in temporele zin beter in kaart brengen.

1. Verbeteren kalibratie

De sensoren leveren een stroomsterkte, die afhankelijk is van de concentratie ammoniak. Om dit te kunnen omrekenen naar de concentratie ammoniak is een kalibratie-algoritme nodig, dat ook rekening houdt met de invloed van temperatuur/luchtvochtigheid en eventuele storende gassen (interferenten). De sensoren worden af fabriek geleverd met een kalibratie waarmee de gemeten waarden omgezet kunnen worden, maar hier verwachten we met het ontwikkelen van een algoritme een verbetering te kunnen maken. Voor het verzamelen van de daarvoor benodigde data zijn 3 sensorboxen nodig op een RIVM-referentiestation. Uit de data die deze opstelling oplevert, bepalen we de relatie tussen de sensormetingen, en de metingen van het RIVM-referentiestation. We zullen een correlatieanalyse doen op deze dataserie met als doel het ontwikkelen van een datagedreven kalibratie-algoritme waarmee we de snelle variaties in ammoniakconcentraties in beeld kunnen brengen. Met het ontwikkelde algoritme kunnen we de piekwaardes kalibreren en de onzekerheidsniveaus bepalen.

Vervolgens wordt bepaald welke gevoeligheid aantoonbaar gehaald kan worden op een classificatie niveau vergelijkbaar met Class 2 sensor system (zoals gedefinieerd door CEN/TC 264 WG42 Air Quality Sensors). Omdat er op het moment nog geen normen zijn vastgelegd voor NH₃ sensoren (wel voor andere stoffen als NO₂, NO en O₃) zal voor de norm met een aanname gebaseerd op expertopinie gewerkt worden

2. Ruimtelijke verspreiding

In dit onderdeel bepalen we de ruimtelijke verspreiding van ammoniak vanaf een bepaalde bron. Met deze analyse bepalen we in welke mate we emissies van een bron kunnen achterhalen bij verschillende gemeten ammoniakconcentraties op een afstand van diezelfde bron. Voor deze analyse worden ook windsnelheid en -richting meegenomen op basis van KNMI-data.

In praktijk betekent dit dat we op proefboerderij Agri-innovatiecentrum De Marke, een agrarische locatie in de buurt van een natuurgebied, in 1-2 windrichtingen een meetlijn opstellen, bestaande uit in totaal 5-10 sensorboxen op verschillende afstanden. Deze sensorboxen worden uitgerust met de volgens eerder selectieonderzoek beste ammoniaksensor die commercieel verkrijgbaar is (maar die nog niet de gewenste gevoeligheid heeft).



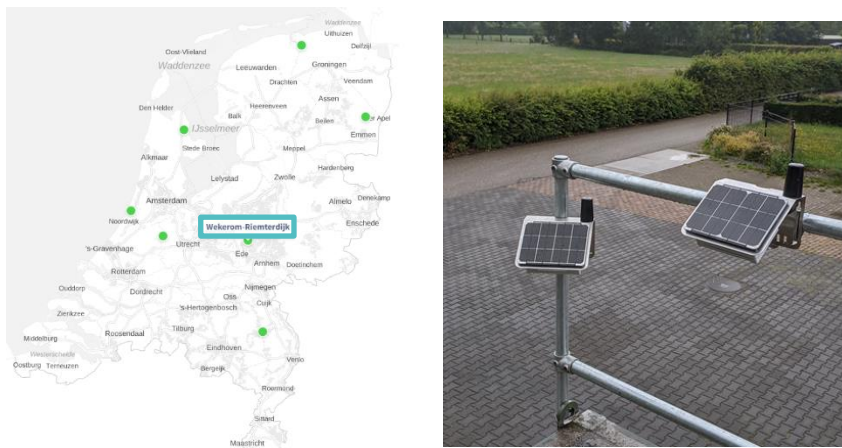
Figuur 2 Schets van meetlijn

5 Voortgang

5.1 Kalibratie

5.1.1 Plaatsing sensoren

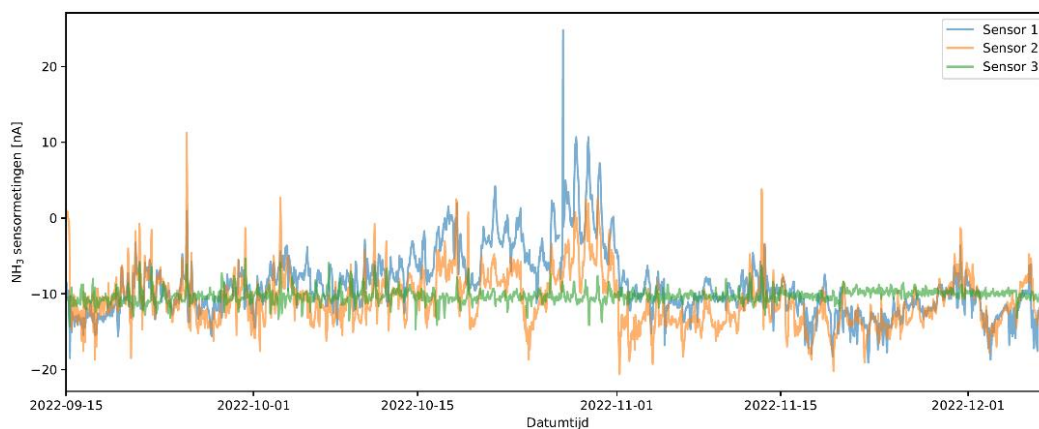
Eind augustus 2022 zijn de sensorboxen geplaatst op het RIVM Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML) referentiestation Wekerom (Gelderland). Sinds dat moment wordt de data verzameld die de sensorboxen elke drie minuten produceren. Deze kan dan vergeleken worden met de beschikbare data van het RIVM-station. De weergegeven RIVM-data zijn uurgemiddelden, daarom zal ook van de sensorbox data uurgemiddelden worden genomen voor de vergelijking.



Figuur 3 Co-locatie bij RIVM LML station Wekerom

5.1.2 Resultaten data-analyse

De uurgemiddelden van de drie sensorboxen bij het RIVM-station in Wekerom zijn afgebeeld in Figuur 4. De ruwe waarden van de sensorbox wordt gegeven in stroomsterkte (nano-ampère; nA). Deze waarden zijn proportioneel aan de ammoniak concentratie, d.w.z. bij een hogere ammoniak concentratie wordt een hogere stroomsterkte geproduceerd. Maar, de exacte relatie tussen ammoniak en stroomsterkte verschilt per sensorbox.



Figuur 4 Ruwe data (in stroomsterkte, nano-ampère) van de drie sensorboxen naast het RIVM-station in Wekerom.

Eindrapportage Environmental Sensing uitbreiding

Om de ruwe data in stroomsterke (nA) om te zetten naar de ammoniak concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) hebben we de data van het RIVM-station gebruikt. Dit station meet de ammoniak concentratie met een miniDOAS systeem. De data van het RIVM-station worden gebruikt als referentie om de ruwe data van de sensorboxen te kalibreren. In de kalibratie wordt per sensorbox berekend hoe de ruwe data moeten worden omgezet naar concentratie, waarbij ook gecompenseerd wordt voor variaties in temperatuur en luchtvochtigheid.

Voor de eerste analyse hebben we de ruwe data van 21 september tot 14 oktober 2022 gebruikt voor de kalibratie. De gekalibreerde waarden zijn te zien in Figuur 5. De onzekerheid (95% betrouwbaarheidsinterval) ten opzichte van de metingen van het RIVM in de kalibratie periode variëren van $7,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor de best presenterende sensorbox tot $11,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor de minst presterende.

Naast het evalueren van de kalibratie periode hebben we de kalibratiecoëfficiënten ook toegepast op de hele periode van 15 september tot 8 december 2022. De resultaten van deze analyse geven een indicatie van de stabiliteit van de sensorboxen zijn over tijd. M.a.w. als de gevoeligheid van de sensorboxen verandert over tijd zullen de berekende kalibratiecoëfficiënten minder accuraat worden, waardoor de onzekerheid ten opzichte van de metingen van het RIVM zal toenemen.

In de analyse van de hele periode van 15 september tot 8 december is een onzekerheid (95% betrouwbaarheidsinterval) van $10,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor de best presenterende sensorbox tot $13,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ voor de minst presterende. In Figuur 5 is te zien dat er per sensorbox verschillende periodes na de kalibratie periode zijn waarin de gekalibreerde waarden afwijkt van de metingen van het RIVM. Voor sensorbox 1 is dit het meest opvallend van 04-11 tot 08-12; voor sensorbox 2 van 22-10 tot 9-11; voor sensorbox 3 van 16-10 tot 2-11.



.....
oktober (lichtblauwe vlak). Deze coëfficiënten zijn toegepast op de gehele meet periode.

5.1.3 Observaties

Variatie binnen een partij sensoren

Tot de start van dit project waren er vier ammoniaksensoren in gebruik. Door deze uitbreiding zijn daar tot nu toe zes sensoren bijgekomen. Deze zes sensoren zijn afkomstig uit een andere partij. Het bleek bij installatie van de eerste twee sensoren op het LML-referentiestation dat de sensoren uit deze tweede partij onderling verschillend gedrag vertonen.

Enige variatie binnen een partij was wel verwacht, maar bij grotere verschillen is het nodig om sensoren eerst onderling af te stemmen door co-locatie. Hierdoor kon het gedrag onderling vergeleken worden en kunnen correcties worden toegepast. Dit zorgt er natuurlijk wel voor dat meetcampagnes een langere looptijd krijgen.

Degradatie van sensoren

De sensor die al langer op het LML-referentiestation actief was (sinds januari 2022) bleek na een maand of zeven te degraderen, waardoor de eerder gedane kalibratie tussen het LML-referentiestation en de sensor niet meer de gewenste overeenstemming gaf.

Het is van belang om te achterhalen of dit gaat om een incident (één sensor) of om een structureel probleem. Volgens de fabrieksdokumentatie zou de levensduur in ideale omstandigheden twee jaar zijn, het verschil met de door ons waargenomen periode tot degradatie is dan wel fors. Hierdoor zijn langere perioden meten op het LML met een groter aantal sensoren nodig om te zien of dit een incident of een structureel punt is. Mocht het een structureel punt zijn dan zal het vaker nodig zijn om de sensoren te vervangen, en wordt een snelle kalibratie van groot belang.

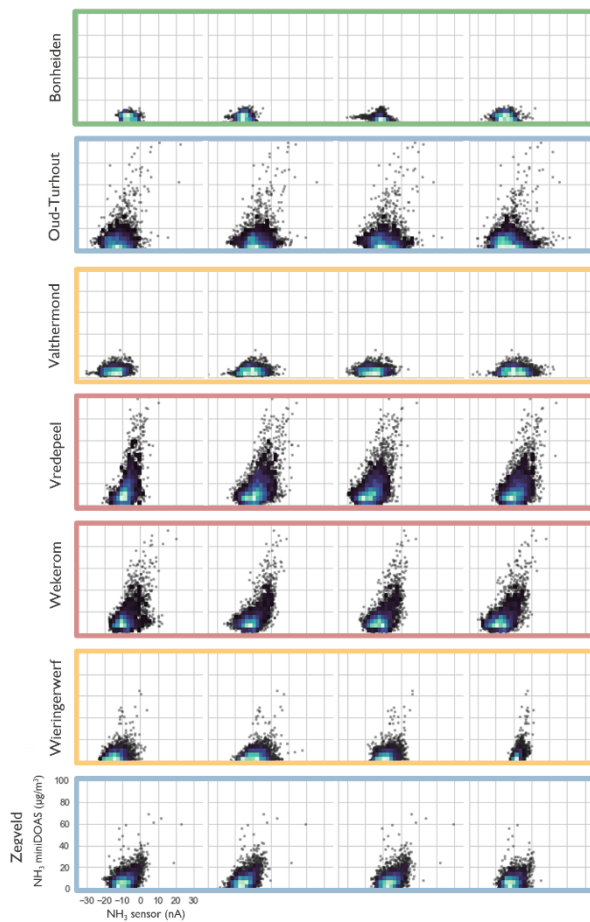
5.1.4 Validatiestudie

Naar aanleiding van de resultaten van de metingen naast het LML-referentiestation in Wekerom en de observaties gedaan tijdens deze metingen is OnePlanet een grootschalige validatiestudie gestart. Hierbij worden 76 sensorboxen geplaatst op 5 LML stations en op 2 stations in België, beheerd door de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), zie Figuur 6. Het doel van deze validatiestudie is meervoudig. In eerste instantie is het doel om te valideren in welke mate de kalibratie afhankelijk is van locatie. Daarbij zal sensor degradatie en variatie tussen sensoren ook in kaart worden gebracht.

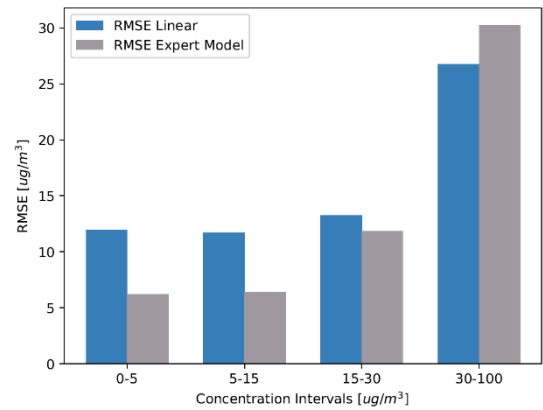


Figuur 6. Locaties OnePlanet validatiestudie. Op elke locatie staat een miniDOAS van het RIVM of de VMM en tenminste 4 sensorboxen van OnePlanet.

De eerste vier maanden van de ruwe data uit deze validatiestudie zijn weergegeven in Figuur 7. Op locatie waar de miniDOAS concentraties boven de $\sim 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ uitkomen correleren de ruwe data van de sensoren. Deze data worden gebruikt om een nieuw kalibratie algoritme mee te ontwikkelen. Op 30 november 2023 is een eerste evaluatie van deze data gehouden met collega's van het RIVM. Het kalibratie algoritme waar OnePlanet aan werkt lijkt een kleinere fout te hebben wanneer de werkelijke NH_3 concentratie (gemeten door de miniDOAS) lager is (Figuur 8).



Figuur 7. Data van 4 maanden OnePlanet validatie studie. Elk paneel geeft de data weer van een NH₃ sensor ten opzichte de miniDOAS metingen op dezelfde locatie. Elke punt is een uurgemiddelde meting. Waar veel punten over elkaar liggen zijn kleuren geplott om de dichtheid weer te geven.



Figuur 8. Voorlopige resultaten ontwikkeling nieuw kalibratie algoritme met de data van de OnePlanet validatie studie. Blauw lineair model (vergelijkbaar met eerder besproken kalibratie van de sensoren in Wekerom), grijs nieuw kalibratie model. De resultaten van het de verschillende kalibratie modellen zijn weergegeven per categorie van miniDOAS metingen. Het nieuwe kalibratie model heeft een kleinere fout bij lagere concentraties.

5.1.5 Classificatie

In EU-richtlijnen zijn normen voor luchtkwaliteit en bijbehorende gegevenskwaliteitsdoelstellingen (engels: Data Quality Objectives, DQO) vastgelegd voor een aantal stoffen. Hierdoor is eenvoudig te bepalen in welke categorie een sensor systeem hoort en welke waarde moet worden gehecht aan de meetresultaten.

DQO (%)	O ₃	CO, SO ₂ , NO ₂	PM ₁₀ , PM _{2,5}
Reference measurements	15	15	25
Class 1 Indicative measurements	30	25	50
Class 2 Objective estimations	75	75	100
Class 3	200	200	200

Hierbij is de DQO gedefinieerd ten opzichte van de grenswaarde, deze grenswaarde is per stof/verbinding vastgelegd. De „grenswaarde” is gedefinieerd als een niveau dat op basis van wetenschappelijke kennis wordt vastgesteld met als doel schadelijke gevolgen voor de menselijke gezondheid en/of het milieu als geheel te vermijden, te voorkomen of te verminderen en dat binnen een bepaalde termijn moet worden bereikt en, wanneer het eenmaal is bereikt, niet meer mag worden overschreden;

De onzekerheidspercentages in de bovenstaande tabel gelden voor afzonderlijke metingen, gemiddeld over het tijdvak voor de grenswaarde, bij een betrouwbaarheidsinterval van 95%.

Op dit moment zijn nog geen grenswaarden en onzekerheidspercentages vastgesteld voor NH₃ en NH₃ sensoren. Daarom is met een aanname gebaseerd op expertopinie gewerkt. Vervolgens wordt bepaald welke gevoeligheid aantoonbaar gehaald kan worden op een classificatie niveau vergelijkbaar met Class 2 sensor system (zoals gedefinieerd door CEN/TC 264 WG42 Air Quality Sensors).

Wat betreft de onzekerheidspercentages lijkt er geen reden om af te wijken van de indeling voor bijvoorbeeld NO₂. Als we van die percentages uitgaan, is het nog van belang om de grenswaarde te bepalen ten opzichte waarvan de onzekerheidspercentages gelden. Hiervoor volgen hieronder een aantal mogelijkheden

1. Aan de hand van de geldende referentie meetmethode
2. Ten opzichte van een inschatting van het vast te stellen niveau

Een mogelijkheid is het omdraaien van de onzekerheidswaarden: het LML gebruikt een miniDOAS als referentiemethode voor het meten van ammoniak concentratie. De onzekerheid daarvan is $0,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, (zie <https://open.overheid.nl/repository/ronl-8e05afc5-009b-4081-bce2-e2290eba158b/1/pdf/bijlage-niet-uit-de-lucht-gegrepen.pdf>), bij maximaal 15% onzekerheid zou dit betekenen dat een waarde van $1,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ met voldoende zekerheid vastgesteld kan worden.

Een alternatieve mogelijkheid is om te stellen dat een methode een onderscheidend vermogen (dus fout) van $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zou moeten hebben. Gegeven de in paragraaf 5.1.2 vermelde onzekerheden kan dus geconcludeerd worden dat de sensorboxen met het huidige kalibratie algoritme niet voldoen aan de te stellen datakwaliteitsdoelen in relatie tot depositie.

Omgekeerd kan gesteld worden dat de best presterende sensor (onzekerheid van $7,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) indien de nauwkeurigheid van 75% van een class 2 system verlangd wordt, in staat zou zijn concentratieveranderingen in de orde van $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ waar te nemen. Dit betekent dat in de buurt van bronnen wel zinnige metingen gedaan kunnen worden (piekdetectie).

Zoals verwacht kunnen de huidige sensorboxen niet ingezet worden voor het met voldoende zekerheid monitoren van achtergrondconcentraties. Wel blijkt piekdetectie mogelijk, waarbij concentratieveranderingen in de orde van $10\text{-}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ waargenomen kunnen worden. Uit de validatiestudie zal moeten volgen of dit verder verlaagd kan worden en de variatie tussen sensoren verkleind kan worden.

5.2 Ruimtelijke verspreiding

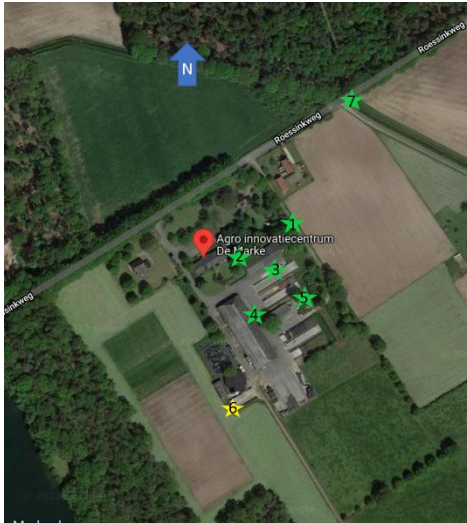
Om de ruimtelijke verspreiding te kunnen bepalen zijn zeven sensorboxen op Agro-innovatiecentrum De Marke geplaatst.

5.2.1 Plaatsing sensoren

Dit is in drie stappen gedaan.

- Stap 0: locatiekeuze (Figuur 9).
De situatie is bekeken, waaruit blijkt dat er twee te verwachten bronnen van ammoniak zijn, de stal voor melkvee- en de jongveestal. Deze jongveestal wordt initieel niet meegenomen in de beschouwing, omdat aangenomen wordt dat deze bron relatief klein is ten opzichte van de melkveestal (relatief weinig en kleine dieren). Omdat de overheersende windrichting zuidwest is, kiezen we voor een hoofdlijn van sensorboxen lopend van zuidwest naar noordoost:
 1. Een sensorbox ten noordoosten op circa 100 meter van de melkveestal
 2. Een sensorbox op 50 meter van de stal, om verspreiding en sterkte van de pluim te bepalen bij windrichting zuidoost
 3. Een sensorbox ten noordoosten van de melkveestal op korte afstand van de melkveestal, direct naast de jongveestal
 4. Een sensorbox direct naast de melkveestal aan de noordoostzijde.
 5. Een sensorbox op 50 meter van de stal, om verspreiding en sterkte van de pluim te bepalen bij windrichting noordwest
 6. Een sensorbox ten zuidwesten van de melkvee stal zodat de ammoniak die wordt aangevoerd met de wind waarneembaar is.

7. Een sensorbox ten noordoosten op grotere afstand (circa 250 m) van de melkveestal



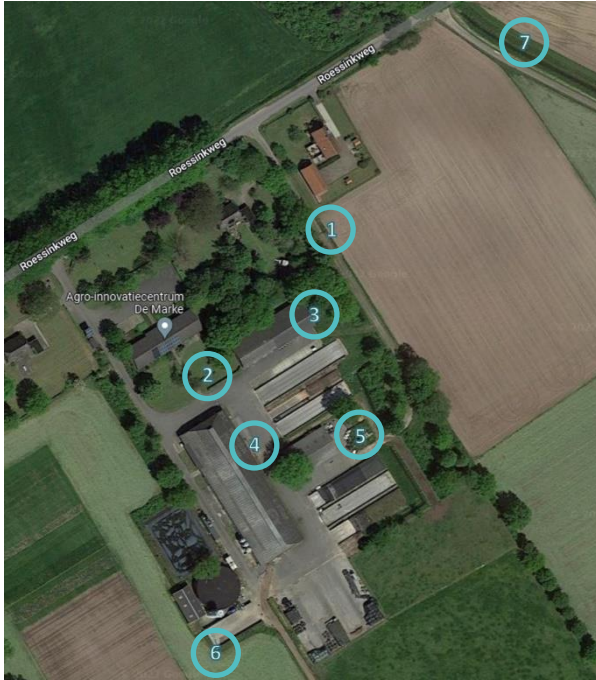
Figuur 9 geplande locaties sensorboxen.

- Stap 1: colocatie. In deze stap zijn alle zeven sensorboxen op dezelfde locatie gehangen, om eventuele verschillen tussen de sensoren onderling te kunnen waarnemen en hiervoor te compenseren. Dit is begin september 2022 gedaan. Zodra genoeg data was verzameld zijn de sensorboxen vervolgens op hun geplande locaties geplaatst.



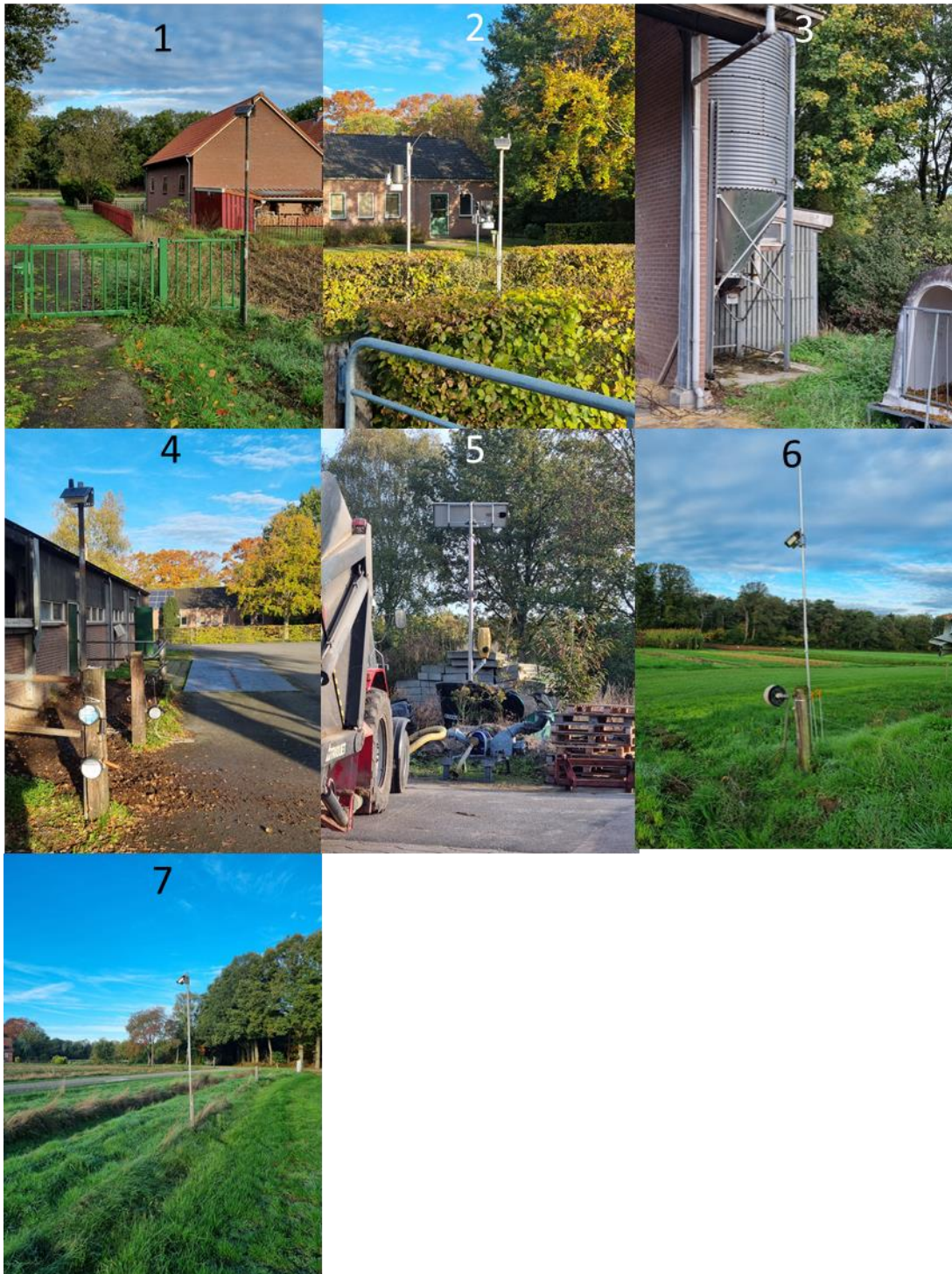
Figuur 10 colocatie bij De Marke

- Stap 2: meetlocaties. Eind oktober zijn de sensorboxen verplaatst naar hun geplande locaties. Deze zijn in onderstaande figuur weergegeven. In overleg met de beheerder van de boerderij is de locatie van sensorbox 7 aangepast, om ervoor te zorgen dat deze niet direct langs een openbare weg zou staan. Hierdoor is wel licht afgeweken van de exacte zuidwest georiënteerde lijn.



Figuur 11 Definitieve locaties en nummering van de sensorboxen gebaseerd op gps-coördinaten.

Hieronder foto's per locatie (Figuur 12.

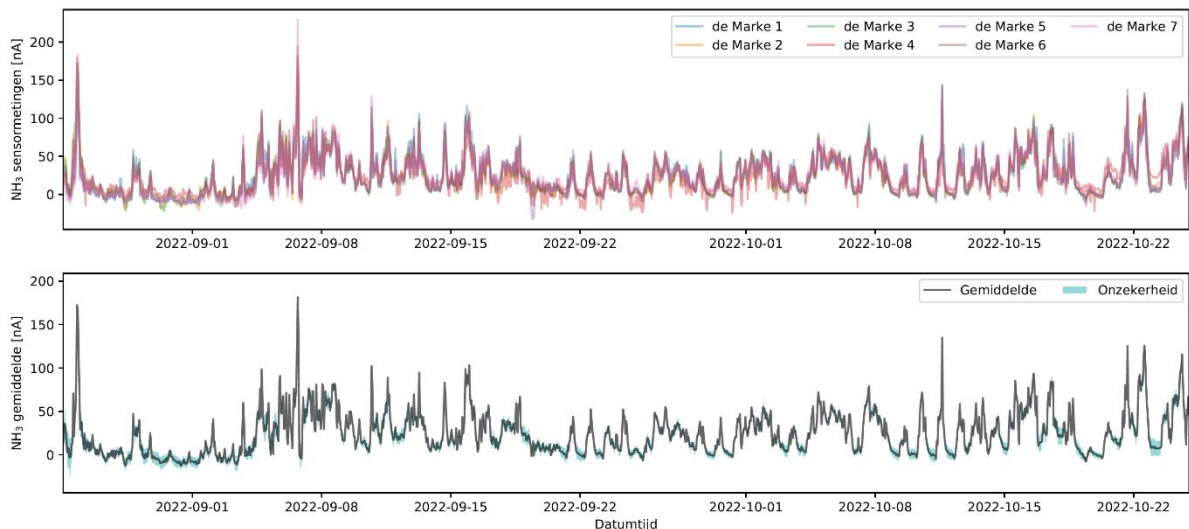


Figuur 12 alle locaties op en rondom De Marke.

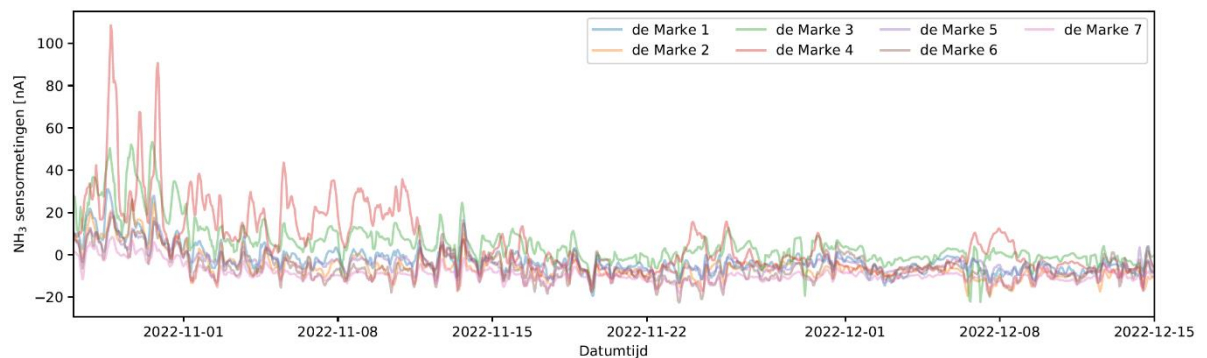
5.2.2 Resultaten data-analyse

Stap 1: colocatie.

Tijdens de periode van colocatie kan worden bekeken in welke mate de verschillende sensorboxen dezelfde output geven. Omdat ze op dezelfde locatie hangen zou in het beste geval de data identiek zijn. De resultaten van de colocatie periode zijn weergegeven in Figuur 13. De 7 sensorboxen gaven veelal gelijkwaardige data en fluctueerden op een vergelijkbare manier over tijd met een 95% betrouwbaarheidsinterval van 20,6 nA.



Figuur 13 Data van de colocatie periode. NH₃ data per sensor, gekalibreerd naar het gemiddelde van de 7 sensorkasten. Boven: data van alle sensorkasten. Onder: gemiddelde (zwart) en onzekerheid (blauw) tussen de 7 sensorkasten.



Figuur 14 Data na het verspreiden van de sensorboxen over het terrein van De Marke en daaromheen. De data zijn gekalibreerd naar het gemiddelde van de zeven sensorboxen.

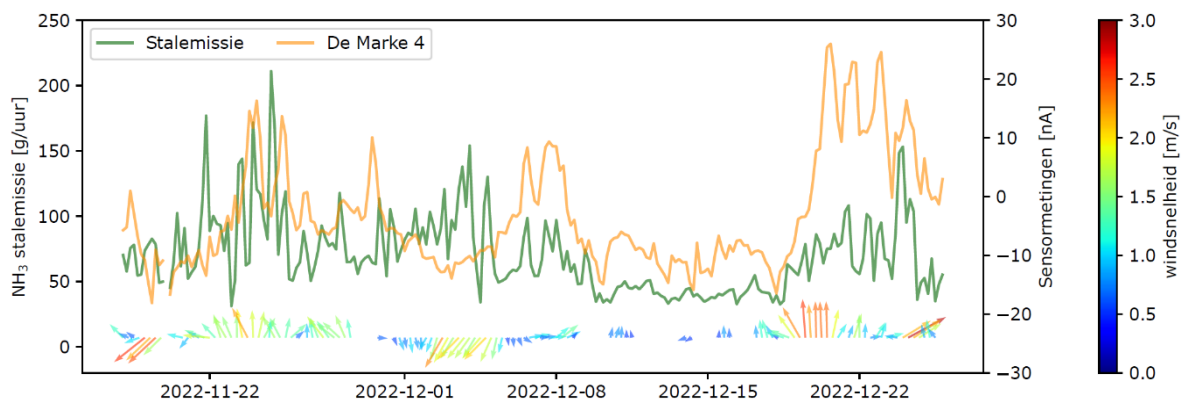
Stap 2: verschillende meetlocaties.

Alle sensorboxen verzamelden continu gegevens tot half november 2023. Het gegevensverliespercentage in die periode was < 2%. Boxen 3 en 4 stopten met het uploaden van gegevens na half november 2023, mogelijk door een hardwareprobleem. Drie boxen (2, 3 en 4) stopten tijdens de experimentele periode met het produceren van bruikbare NH₃ metingen, en de sensoren in die boxen werden in april 2023 vervangen. De NH₃ sensoren in box 2 en 4 waren verslechterd, wat waarschijnlijk komt door hoge blootstelling aan NH₃ gegeven hun locatie ten opzichte van de stal

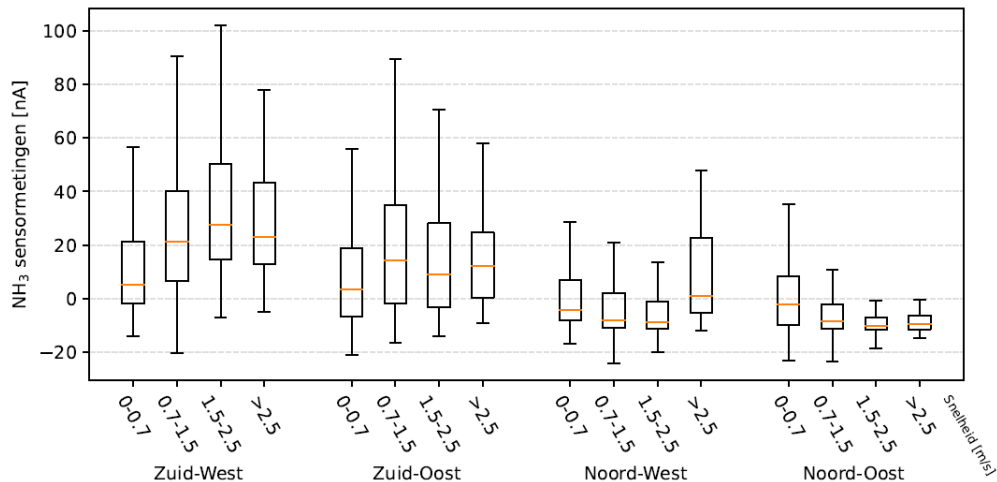
(Figuur 11) en de windrichting. Een opvallende observatie is dat de defecten allebei zijn ontstaan op 26 december 2022 rond 01:00 uur, maar er is geen verklaring voor gevonden. Box 3 had op willekeurige momenten offsetverschuivingen van ~20 tot ~30 nA. De frequentie van deze verschuivingen was relatief laag voor december 2022 en na juli 2023. Het is onduidelijk waarom de data in juli 'spontaan' herstelde, want er is geen ander onderhoud aan deze box uitgevoerd, anders dan het vervangen van de sensor. Na de periode van colocatie zijn de sensorboxen op verschillende locaties gehangen. In Figuur 14 is te zien dat de data van de verschillende sensorboxen meer van elkaar gaat verschillen nadat de sensorboxen op verschillende locaties zijn gehangen.

Op sommige locaties (zoals direct naast de stal) worden hogere NH₃ concentraties verwacht dan op locaties ver van de stal. Echter, dit is sterk afhankelijk van de windrichting. Bijv. de sensorbox het dichtst bij de stal hangt aan de noordoostelijke kant van de stal. Dus is te verwachten dat deze box hoge NH₃ concentraties meet bij een zuidwestelijke of zuidoostelijke wind, maar niet bij een noordoostelijke wind die de NH₃ emissie de andere kant op doet waaien. In Figuur 15 en Figuur 16 zijn de gemeten NH₃ waarden bij verschillende windrichtingen gevisualiseerd. In deze figuren is inderdaad te zien dat de sensorbox dicht bij de stal (d.w.z. box 4) hogere concentraties meet wanneer de wind uit het zuidwesten komt (Figuur 16). Het patroon volgt ook de gemeten NH₃-emissies van de melkveestal (Figuur 15). Bij een zuidwestenwind resulteert een hogere windsnelheid ook in hogere sensorwaarden, maar deze relatie stopt bij een windsnelheid van 2,5 m/s (Figuur 16). Dit zou verklaard kunnen worden doordat er bij hogere windsnelheden meer stallucht vrijkomt door de zijopening dan door de nok, echter wanneer de windsnelheid hoger is dan 2,5 m/s wordt de gasconcentratie lager door verdunning met de buitenlucht. De laagste sensormetingen werden gevonden bij noordoostenwind en er is een sterke correlatie met de windsnelheid. De mogelijke redenen zijn deels de dispersie van NH₃ die advectie overwint en deels de onnauwkeurigheid van windgegevens (zowel lokale metingen als voorspellingen gebaseerd op KNMI-gegevens).

De gegevens van de andere boxen laten geen duidelijke relatie tussen concentratie en windrichting/snelheid zien. Een andere analyse van de metingen van deze boxen is beschreven in de volgende sectie (5.2.3 *Verspreidingsmodel*).



Figuur 15 Metingen van sensorkast De Marke 4 en van de melkveestal. De pijlen geven windrichtingen en -snelheid aan



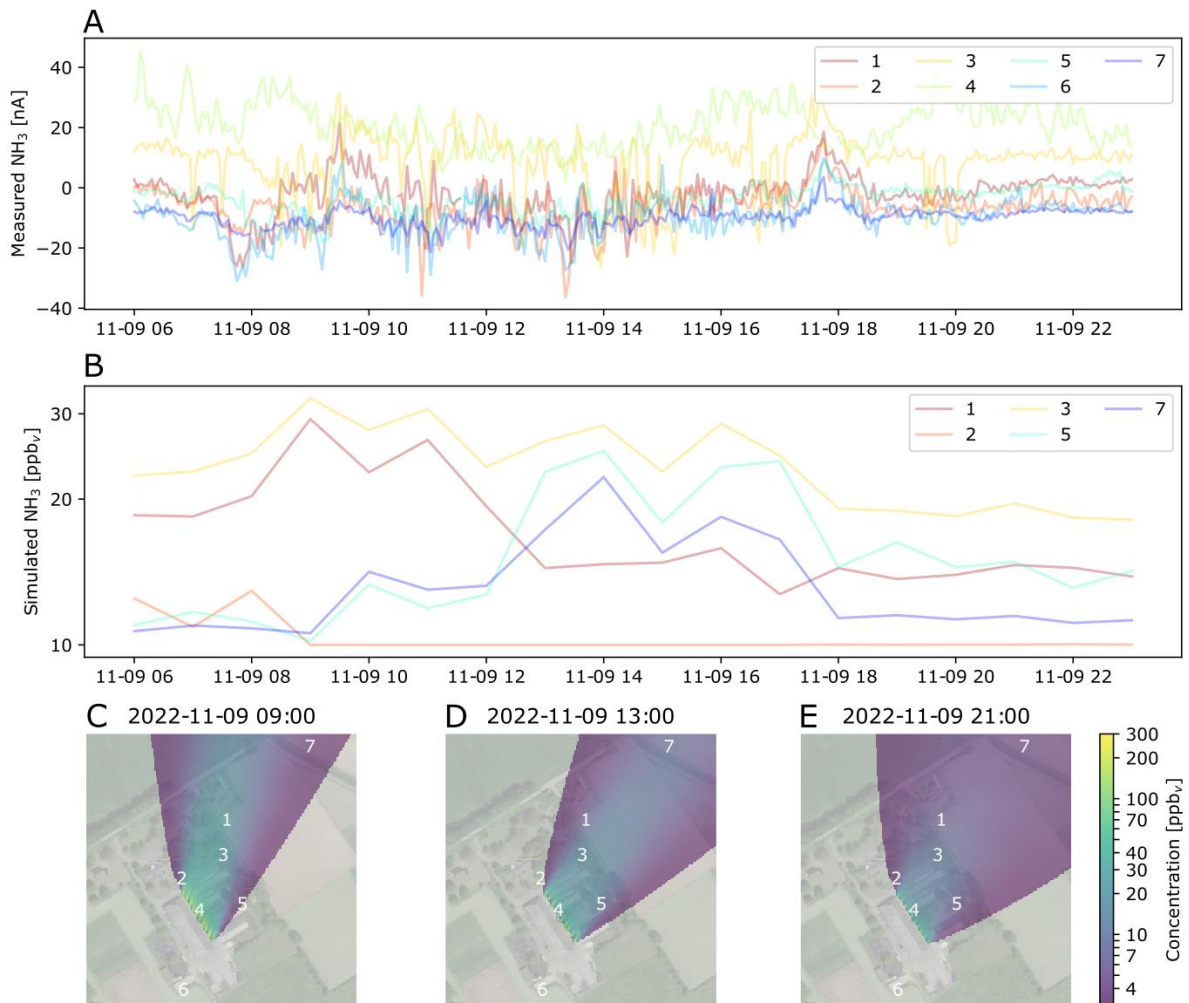
Figuur 16 Metingen van box De Marke 4 onder verschillende windrichtingen en windsnelheid van 01-09-2022 tot 25-12-2022 en van 21-04-2023 tot 15-06-2023. Metingen van andere perioden zijn niet meegenomen door sensorstoring.

5.2.3 Verspreidingsmodel

Een Gaussisch pluimmodel werd toegepast om de NH_3 -concentraties benedenwinds van de stal te schatten. Echter, in dit model wordt een emissiebron verwerkt als een enkel punt. In dit werk werd de concentratie op de meetlocaties geschat door de pluimen van meerdere puntbronnen, gedefinieerd op de nok en de benedenwindse opening van de stal, samen te voegen. Er zijn drie belangrijke beperkingen aan het model. Ten eerste, het model werkt niet voor meetlocaties dicht bij de emissiebron. Ten tweede, het was nodig om een "gouden tijdvenster" te kiezen voor de vergelijking tussen gemeten en geschatte concentraties om de invloed van regen en onstabiele meteorologische omstandigheden waar het model geen rekening mee houdt te beperken. Ten derde, het model houdt geen rekening met de invloed van gebouwen en vegetatie op het luchtstromingspatroon, wat veel onzekerheden zal veroorzaken in de door het model geschatte concentraties.

De figuur hieronder toont een voorbeeld van de gemeten en gesimuleerde concentraties tussen 06:00 en 23:00 uur op 09-11-2023. Tijdens deze periode draaide de windrichting licht van ZZW naar ZW. De snelheid was in het begin 1,5 m/s, maar tijdelijk verhoogd tot 3 m/s tussen 10:00 en 15:00 uur. De NH_3 emissies, volgens de stalmetingen van Wageningen Livestock Research, schommelden aanvankelijk rond 134 gram per uur en daalden daarna snel tot 55 ± 12 gram per uur om 18:00 uur. De effecten van wind en emissiesterkte op de meetlocaties, zoals weergegeven in de gemodelleerde concentratiekaarten, waren gedeeltelijk terug te zien in de sensormetingen.

Het signaal van box 3 was over het algemeen ook hoger en het signaalniveau was licht verhoogd tussen 10:00 en 18:00 uur. De negatieve pieken van dit apparaat wordt veroorzaakt door hardwareproblemen. Box 1 had rond 10:00 uur tijdelijk verhoogde waarden (hoger dan 2, 5 en 7, maar lager dan 3). De signalen van box 4 waren meestal hoger dan die van andere locaties, echter door de korte afstand tot de stal waren de door het model geschatte concentraties niet betrouwbaar (let op de inhomogene concentratiekaart vlak naast de stal).



Figuur 17 Gemeten en gesimuleerde NH₃ concentraties op 3 meter hoogte tussen 06:00 en 23:00 (UTC) op 9 november 2022. Figuur A is de NH₃-sensor output gekalibreerd naar het groepsgemiddelde. Figuur B is de gesimuleerde concentratie met een aangenomen achtergrond van 10 ppb. De gesimuleerde concentratie van box 4 en box 6 in Figuur B zijn niet weergegeven. Figuur C, D en E zijn de gesimuleerde pluimen (voor concentraties > 3 ppb).

Toch was de algemene overeenkomst tussen gesimuleerde en gemeten NH₃ slecht. De brede acceptatie van Gaussische pluimmodellen is vooral te danken aan de eenvoud van het model, echter ten koste van de nauwkeurigheid. De belangrijkste basisaannames zijn 1) vlak en glad terrein, 2) geen fysisch-chemische interacties tussen de gasmoleculen en hun omgeving, en 3) constante omstandigheden (bijv. emissiesterkte van de bron, windsnelheid en -richting, atmosferische stabiliteit). Deze aannames zijn echter niet volledig correct in deze analyse.

5.2.4 Observaties

Meteorologische data

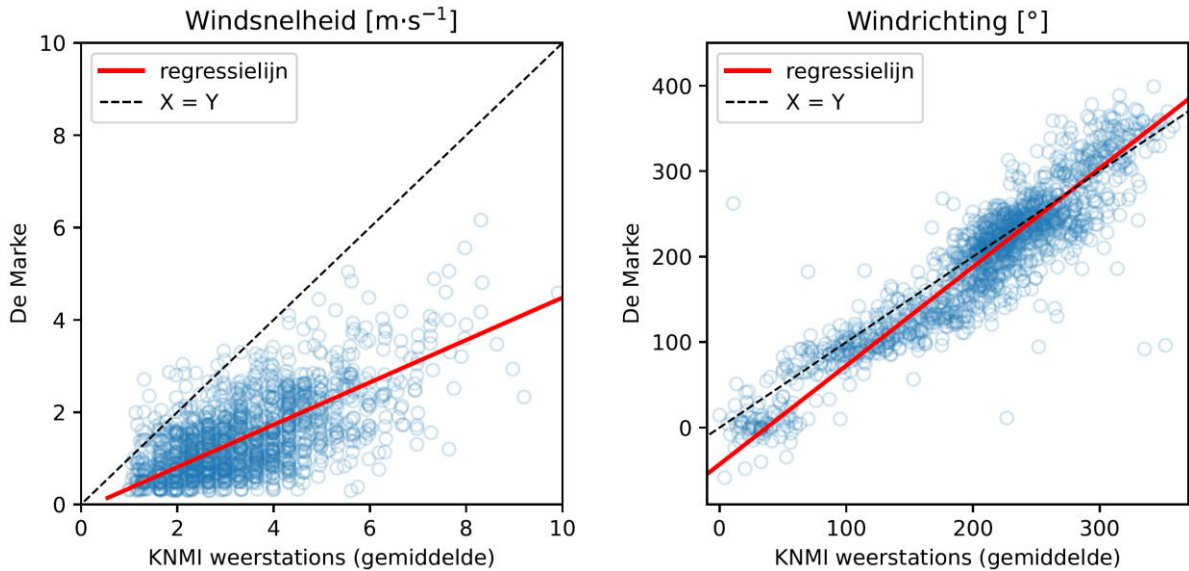
Voor het duiden van de meetresultaten is het noodzakelijk om inzicht te hebben in de lokale weersomstandigheden, met hoge tijdsresolutie. Dit omdat onder andere neerslag, temperatuur, windrichting en windsnelheid van invloed zijn op de verspreiding van ammoniak. Het bleek dat de KNMI-data niet specifiek genoeg is om te kunnen gebruiken bij het interpreteren van de data. Nadat dit duidelijk is geworden, heeft LNV toestemming gegeven voor de aanschaf van een meteostation. Deze is in juni 2023 op De Marke geplaatst.



Figuur 18 locatie van het meteostation

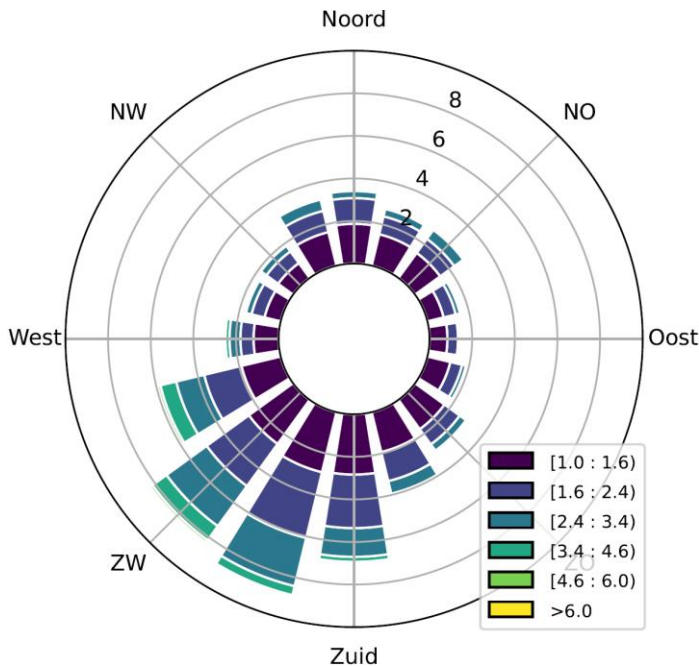
Het meteostation was volledig operationeel sinds 7 juni 2023. Metingen werden elke 3 minuten uitgevoerd en geüpload naar een dataserver van TNO. Aan het eind van het jaar 2023 waren er in totaal 58009 datapunten verzameld met intervallen van 3 minuten. Het apparaat had meerdere intermitterende of langdurige storingen door technische problemen, waardoor respectievelijk 50% en 40% van de 3-minutengegevens en de geaggregeerde uurwaarden ontbraken. De lokaal waargenomen weersomstandigheden werden vergeleken met de gemiddelden van drie KNMI-weerstations (Nr. 275 Deelen, 278 Heino en 283 Hupsel) binnen een straal van 45 km. De gemeten windrichtingen waren sterk gecorreleerd tussen het lokale en de KNMI-stations ($R^2 = 0,86$), maar de absolute waarden waren enigszins vertekend, vooral bij noordoostenwind. De correlatie van de windsnelheden was slechts matig ($R^2 = 0,52$), en de KNMI-metingen waren meestal twee keer zo hoog als de lokale metingen. Verklaring daarvoor is gelegen in het feit dat op KNMI-stations op 10 meter hoogte en vrij van obstakels gemeten wordt, wat bij lokale weerstations doorgaans niet mogelijk is. Lokaal gemeten temperaturen ($R^2 = 0,989$) en relatieve vochtigheid ($R^2 = 0,955$) waren ook sterk gecorreleerd met de KNMI-metingen. Het verschil tussen het lokale weerstation en de KNMI-metingen en absolute fouten hiervan waren respectievelijk $0,53 \pm 0,92$ °C en $2,7 \pm 4,7\%$.

Er werden lineaire modellen gebruikt om windsnelheden en windrichtingen bij De Marke te voorspellen met behulp van KNMI-gegevens wanneer lokale metingen niet beschikbaar waren. De tijdstippen waarop er wel lokale metingen beschikbaar waren zijn gebruikt om de nauwkeurigheid van de voorspellingen te bepalen. De modellen konden nauwkeurigheden (2σ) bieden van respectievelijk $\pm 2,13$ m/s en $\pm 43,5^\circ$. Verbeteringen door de lineaire modellen voor temperatuur en relatieve vochtigheid te gebruiken waren marginaal ten opzichte van de originele KNMI-metingen. Dus konden de originele KNMI-metingen direct gebruikt worden om het lokale klimaat op De Marke te schatten.



Figuur 19 vergelijkingen van windsnelheden (A) en windrichtingen (B) gemeten door het lokale meteostation en het gemiddelde van drie KNMI-weerstations binnen een straal van 45 km rond De Marke.

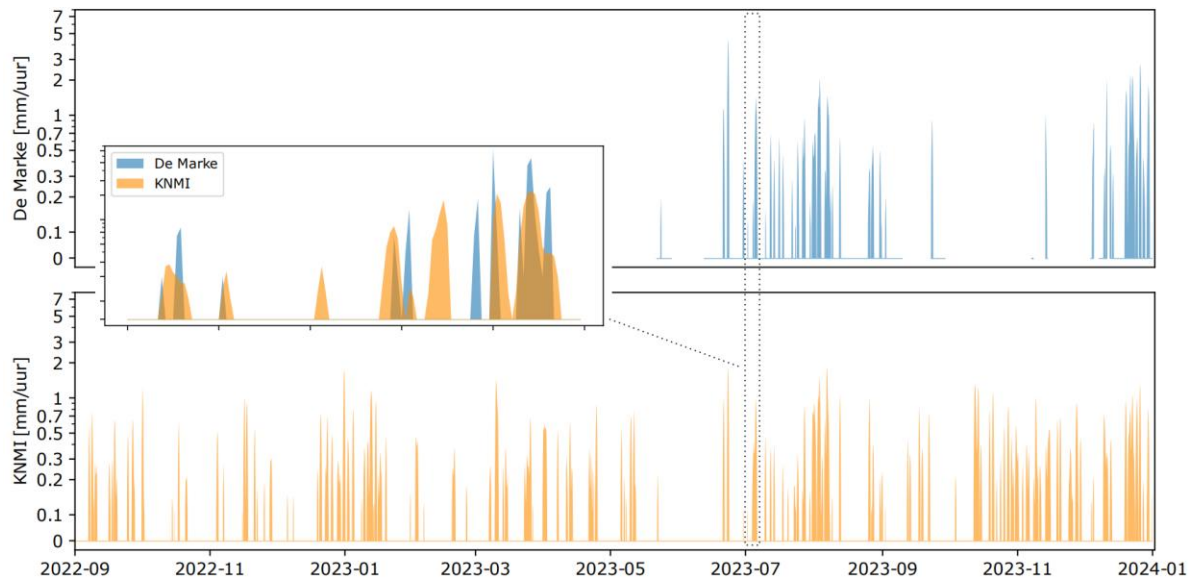
Winderige perioden (windsnelheid $\geq 1\text{m/s}$, bepaald op basis van de gebruikelijke detectielimiet van anemometers met halve bollen) besloegen 60,7% van de 16 maanden dat het project. Zuidwest (incl. ZW, ZZW en WZW) was de dominante windrichting, die goed was voor 38,1% van de winderige perioden of 23,1% van de hele projectperiode.



Figuur 20 Windverdeling tussen 01-09-2022 t/m 31-12-2023 op De Marke. De straal geeft de frequentie (%) van de wind uit elke richting aan. Windsnelheden van minder dan 1,0 m/s werden verwijderd.

Neerslag kwam in deze regio in ongeveer 25% van de tijd voor gedurende de hele projectperiode. Zowel het lokale meteostation als het KNMI hebben bijvoorbeeld veel neerslag gemeten in de regenperioden rond augustus en december in 2023. Metingen van het KNMI-weerstation konden

wijzen op regenperioden in De Marke, maar dit kan vrij lokaal zijn. De Matthews correlatiecoëfficiënt tussen de lokale en KNMI-waarnemingen van dagelijkse neerslaggebeurtenissen (d.w.z. als er op enig moment neerslag werd waargenomen in beide metingen binnen 24 uur) was 0,706 (1 = perfecte overeenstemming, 0 = willekeur, -1 = perfecte onenigheid). Deze correlatie daalde naar 0,495 bij uurlijkse waarnemingen. De voorspelbaarheid van lokale neerslag met behulp van KNMI-metingen is misschien voldoende voor statistische analyse over een breed tijdvenster, maar is suboptimaal voor verspreidingsmodellering waarbij nauwkeurige meteorologische omstandigheden vereist zijn.



Figuur 21 Neerslag gemeten door het lokale meteostation en drie KNMI-weerstations binnen een straal van 45 km rond De Marke.

Zoals eerder genoemd zijn stabiele en constante meteorologische omstandigheden cruciaal voor de accurateheid van het Gaussisch pluimmodel. In totaal voldeed ongeveer 10% van de data, gemeten tussen november 2022 en november 2023, aan de volgende omstandigheden: wind uit het zuidwesten, geen neerslag. Van die 10% waren er 8 tijdvensters waar deze omstandigheden langer dan 12 uur achtereenvolgens aanhielden, en 3 tijdvensters waar dat langer dan 24 uur het geval was. De langste periode was 46 uur. Echter het aantal geschikte tijdvensters daalt als er meer criteria worden gebruikt. Aangezien de meteorologische omstandigheden niet te sturen zijn zal het een uitdaging blijven om een Gaussisch pluimmodel te vergelijken met metingen rondom De Marke.

6 Conclusies

Uit de inzichten die we tot nu toe hebben verkregen uit de opstellingen op het RIVM-referentiestation en de opstellingen op de proefboerderij, blijken de sensoren onderling een grotere variatie te vertonen en treedt er eerder degradatie op dan verwacht. Van beide effecten kunnen we leren en er zijn ook maatregelen tegen te treffen, maar dat vereist waarschijnlijk een andere aanpak dan oorspronkelijk geschetst. Er is een project voor een relatief grootschalige validatiestudie opgezet. Het doel van deze validatiestudie is om in kaart te brengen welke factoren bijdragen aan degradatie, hoe we daar mogelijkwijs voor kunnen compenseren, en hoeveel variatie er tussen verschillende sensorboxen blijft bestaan ondanks de maximaal haalbare kalibratie. Dit project willen we ook bespreken met LNV.

De meeste hardware onderdelen van de sensorbox zijn robuust gebleken voor een meetperiode van minstens een jaar. Dat geldt echter niet voor de NH₃ sensor. Een eenmalige kalibratie is niet afdoende om de langdurige accuraatheid van de sensoren te waarborgen. Daar staat tegenover dat de sensoren wel gevoelig zijn voor fluctuaties in NH₃ als gevolg van veranderingen van windrichting. Het meteostation dat benodigd was voor de lokale windmetingen was succesvol geïnstalleerd, maar er waren helaas veel missende gegevens door technische mankementen. Het verschil tussen de metingen van het lokale meteostation en die van nabijgelegen KNMI-stations laat zien dat het belangrijk is om lokaal meteorologische metingen te doen. Een Gaussisch pluimmodel is gebruikt om te schatten hoe NH₃ concentraties fluctueren als gevolg van een verandering in windrichting en -snelheid, en de mate van NH₃ emissie uit de stal. Er zijn korte periodes geweest waarin de geschatte en gemeten concentraties relatieve overeenkomsten vertoonden (d.w.z. in beide gevallen hogere waarden op locatie X dan op locatie Y).

Er is nog ruimte voor verbetering mogelijk en vereist om de kwaliteit van de NH₃ metingen te verbeteren. Daarnaast kunnen ook meer geavanceerde verspreidingsmodellen worden gebruikt om tot een nauwkeurigere overeenkomst tussen sensormeting en modelschatting te komen. In een dergelijke aanpak zijn naast lokale weersgegevens ook meer gedetailleerde kenmerken van de locatie benodigd.