



Willem A.H. Asman

Kruisbeklaan 28, 3722 TH Bilthoven, Netherlands
e-mail: willem.asman@gmail.com
phone: +31-683111128

Peer review van het expertoordeel onderbouwing beoordelingsdrempel bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities van Prof. dr. Arthur Petersen op verzoek van ██████████, Directoraat Generaal Landelijk Gebied en Stikstof Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur: beantwoording van aan mij gestelde vragen.

Verklaring

Ik beantwoord deze vragen als privépersoon, niet als persoon gelieerd aan een organisatie waarvoor ik vroeger werkte of op dit ogenblik werk. De beantwoording van deze vragen is uitsluitend gebaseerd op mijn wetenschappelijk inzicht en niet door politieke standpunten van welke organisatie dan ook.

Mijn achtergrond

Ik ben chemicus en meteoroloog en heb veel kennis ervaring op het gebied van modellering en meting van emissie, verspreiding en depositie van ammoniak/ammonium op alle schalen: zowel lokaal, nationaal als Europees/mondiaal. Ik heb ook kennis op het gebied van stikstofoxiden en heb me in mindere mate bezig gehouden met het modelleren van depositie van stikstofoxiden en reactieproducten op lokale en nationale schaal. Ik heb van 1989-2022 in het buitenland gewoond (31 jaar in Denemarken en 2 jaar in Oostenrijk toen ik bij IIASA werkte).

De eerste modellen voor ammoniak/ammonium emissie, verspreiding en depositie op lokale, nationale en Europese schaal überhaupt heb ik in de jaren 1983-1985 samen met collega's ontwikkeld aan de Universiteit Utrecht. Deze modellen vormden voor een groot deel de basis van de ammoniak-versie van het TREND-model (thans OPS-model geheten) dat ik samen met mijn collega Hans van Jaarsveld op/voor het RIVM ontwikkelde (1986-1990). Na 1990 heb ik niet bijgedragen aan de verdere ontwikkeling van het OPS-model.

Ik heb daarna ook andere typen modellen voor ammoniakdepositie op lokale schaal ontwikkeld. Het OPS-model is één van de modellen die de basis vormt van het Aerius-calculator. Ik heb mij niet gedurende mijn hele loopbaan fulltime bezig gehouden met atmosferische wetenschap omdat het moeilijk bleek te zijn om als buitenlander in mijn branche in Denemarken te overleven. Ik heb wel verschillende projecten voor het RIVM gehad, waaraan ik in mijn vrije tijd gewerkt heb: o.a. over de interpretatie van de gegevens van het regenwatermeetnet, over ammoniakcompensatiepunten in vegetatie en over de uitwisseling van ammoniak tussen de zee en de atmosfeer.

Ik heb zowel bij milieuinstituten als bij landbouwinstituten in Nederland en het buitenland gewerkt.

Ik heb advies gegeven over atmosferisch ammoniak aan onderzoeksinstituten en autoriteiten in 12 landen.

Ik heb een kleine 200 publicaties op dit gebied, waarvan ca. 40 in internationale wetenschappelijke tijdschriften. Daarnaast heb ik ook andere publicaties Zie o.a.

<https://scholar.google.dk/citations?user=katYGWEAAAAJ&hl=en>

Omdat ik weer “nieuw” ben in Nederland ben ik (nog) niet goed op de hoogte van de Nederlandse situatie in detail: zowel wetenschappelijk als politiek. Ik ben niet eerder betrokken geweest of heb niet in detail kennis opgedaan over eerdere discussies op het gebied van wat de “rekenkundige ondergrens” wordt genoemd.

Ik ben in 1989 geëmigreerd. Toen was er een stikstofprobleem in Nederland. Tot mijn verbazing (had er natuurlijk wel over gelezen en gehoord) was er nog steeds een stikstofprobleem toen ik naar Nederland terugkwam in 2022.

In 1989 was er een stikstofprobleem in Denemarken en dit was de reden waarom ik naar Denemarken gehaald werd. In 2022, toen ik Denemarken verliet, was het probleem er nog steeds. Het probleem is alleen anders dan in Nederland: de emissiedichtheid voor ammoniak is maar de helft van die in Nederland. Stikstofdepositie is niet zozeer het probleem, maar het transport van stikstof uit de landbouw via beekjes naar fjorden en de (Oost)zee. Van nature is daar stikstof de beperkende factor voor algengroei. Zijn er veel algen door veel stikstoftoevoer (als er veel regen is), dan wordt er bij de afbraak van dode algen op de bodem zoveel zuurstof verbruikt, dat er geen zuurstof in het water is. Dit leidt tot sterfte van de bodemdieren en vissen.

Ik heb geen verstand van wetenschapsfilosofische achtergronden van ondergrenzen.

Als relatieve nieuweling in Nederland sta ik versteld van het detail in de gebruikte modellering en van het verschil in detaillering tussen de verschillende onderdelen van het OPS-model (niet dat ik dat beter zou kunnen). Het lijkt erop alsof alle details die bekend zijn meegenomen dienen te worden, terwijl er ook veel dingen zijn, die niet of in veel geringer detail bekend zijn en dus niet meegenomen worden. Dit geeft een soort wanverhouding tussen de detaillering van verschillende onderdelen. Wellicht komt dit door juridische perikelen. Natuurlijk ben ik ook verbaasd over wat een rekenkundige ondergrens wordt genoemd van $0,005 \text{ mol ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ genoemd. Dat is een erg lage grens.

Even een paar opmerkingen over ammoniak. Men zou ook soortgelijke beschouwingen kunnen houden voor stikstofoxiden.

Afhankelijk van de bronsterkte kan het effect van de ammoniakemissie van een stal op de jaargemiddelde concentratie op een afstand in de orde van 500 m waargenomen worden (“steekt het boven de achtergrondconcentratie uit”). Op grotere afstanden “verzuipt” het signaal in de bijdrage van andere ammoniakbronnen. Dat betekent echter niet dat te ammoniak uit deze stal niet verder wordt getransporteerd en niet op natuurgebieden gedeponereerd kan worden. Van de Nederlandse ammoniakemissie komt ca. 70% in het buitenland terecht (Fagerli et al., 2024). Na ca. 500 m is het effect van bronnen met een normale bronsterkte dus niet goed meetbaar. Met een atmosferisch transportmodel kan heel goed de depositie veroorzaakt door de bron op grotere afstand dan 500 m gemodelleerd worden. Hoe groter de afstand tot de bron des te onzekerder wordt het of een bepaalde bron nog een bijdrage levert aan een specifiek natuurgebied. Waar ergens de grens ligt is moeilijk te zeggen. Maar draagt de bron niet bij aan het specifieke natuurgebied, dan draagt deze wel bij aan andere (natuur)gebieden in binnen- en buitenland.

Daarom is het van belang de reductie van de bronsterkte van één specifieke bron in samenhang te zien met algemene emissiereducties op regionaal en landelijk niveau.

Met de mij gegeven tijd (en iets meer) heb ik de hieronder volgende opmerkingen bij de vragen.

Rekenkundige ondergrens

Het zou aanbeveling verdienen om een definitie te geven van wat onder een rekenkundige ondergrens verstaan wordt, omdat het hele stuk daarover gaat.

Ik versta onder rekenkundige ondergrens: het kleinste rekenkundig significante getal dat een model kan produceren.

Ik begrijp dat het voor juristen en beleidsmakers fijn zou zijn om een absolute ondergrens te hebben voor de modelresultaten.

Beantwoording van de vragen

Vraag 1.

Wat vindt u van de wijze waarop Petersen gebruikmaakt van de onderliggende referenties?

- a. Worden de referenties juist of onjuist gebruikt en waarom?
Op atmosferisch-chemisch gebied zie ik geen wetenschappelijke referenties. Het kan zijn dat deze wel gegeven worden in rapporten van commissies, waarnaar verwezen wordt. Het is mij gezien de beperkte tijd die ik heb (1,5 dag) onmogelijk om deze rapporten te lezen.
- b. Zijn er studies die volgens u ontbreken?
Zie a.

Vraag 3.

Wat vindt u van de redenering dat er sprake zou moeten zijn van een rekenkundige ondergrens?

- a. Op welke punten bent u het eens of oneens met de redenering en waarom?
Het OPS-model heeft vanuit de atmosferische chemie gezien geen rekenkundige ondergrens, dus ook geen $0,005 \text{ mol ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$. Het model geeft bij benadering alleen de verhouding tussen de emissie op één punt en depositie op een ander punt weer (het kan heel misschien zijn dat er enige kleine niet-lineariteiten zijn die een kleine absolute ondergrens geven). Als er fouten zijn, zijn het relatieve fouten en geen absolute fouten. Derhalve is er geen absolute ondergrens die bij het model hoort. Er kan natuurlijk wel evt. een ondergrens zijn, waarbij de betekenis van de resultaten niet of niet goed meer geïnterpreteerd kunnen worden. Dit is echter geen rekenkundige ondergrens in mijn ogen.
- b. Zijn de aangehaalde argumenten in de redenering inhoudelijk juist?
Er wordt gesproken over het erbij betrekken van de meetonzekerheid. Meetonzekerheid heeft in principe niets met de onzekerheid in de modellering te doen. Het is natuurlijk wel zo dat dit een rol speelt als modelresultaten worden vergeleken met metingen. Er worden ook gegevens van TNO aangedragen over de kleinst meetbare hoeveelheid. Dat is in mijn ogen

in principe geen argument om dit bij de discussie over een ondergrens van een model te betrekken. Dat zijn twee verschillende dingen. Overigens bij een groter volume aan doorgezogen lucht of een betere analysemethode krijgt men weer een lagere ondergrens.

Zijn er argumenten die volgens u ontbreken?

-

Vraag 4.

Wat vindt u van de redenering dat 1 mol/ha/jaar een verantwoorde keuze is voor de rekenkundige ondergrens?

- a. Op welke punten bent u het eens of oneens met de redenering en waarom?

Ik kan mij er als atmosferisch-chemicus niet over uitspreken. Dit type beoogde ondergrens is een beleidskeuze want het OPS/Aeriusmodel heeft geen rekenkundige ondergrens. Het zou net zo goed 0,1 mol N/ha/jaar of 10 mol N/ha/jaar kunnen zijn of iets anders

- b. Zijn de aangehaalde argumenten in de redenering inhoudelijk juist?

Ik vrees dat een deel van de informatie over Denemarken en wellicht ook informatie over van Duitsland verouderd en/of niet juist is.

Bij de **vergelijking tussen de vergunningverlening** in verschillende landen dient men niet alleen naar de depositiedrempel te kijken, maar naar de **hele keten van emissieschatting - berekening van de depositie - depositiedrempel**. De modellen voor de berekening van de depositie zijn erg verschillend in verschillende landen. In Denemarken wordt bij de berekening b.v. geen rekening gehouden met het compensatiepunt voor ammoniak, in Nederland wel (Per Løfstrøm, inmiddels gepensioneerd onderzoeker van Aarhus Universitet, e-mail van 20 mei 2024). Dat betekent waarschijnlijk dat de Deense wetgeving ondanks een veel hogere depositiedrempel van b.v. 14 mol ammoniak-N ha⁻¹ jaar⁻¹ misschien wel strenger is dan de Nederlandse, die een absolute drempel heeft van slechts 0,005 mol N ha⁻¹ jaar⁻¹, want met het Deense verspreidings- en depositiemodel worden waarschijnlijk systematisch hogere deposities berekend dan met het OPS-model. Dat geldt ook voor de Duitse situatie waar ook geen rekening wordt gehouden met een compensatiepunt voor ammoniak (Umweltbundesamt, 2024)

In Vlaanderen verwacht ik geen andere berekening van de depositie omdat het daar gebruikte VLOPS-model gebaseerd is op het OPS-model van het RIVM.

Er wordt verwezen naar buitenlandse depositiedrempels. Ik zou me wat Denemarken betreft niet te veel illusies maken over de grondigheid waarmee de keuze tot stand gekomen is. Dat heeft ook te maken dat het probleem van stikstofdepositie minder speelt. De informatie over Denemarken die in het "expertoordeel" staat is waarschijnlijk erg verouderd. Er is al jaren een andere methode. Voor informatie over de recente wetgeving zie Retsinformation (2024).

In paragraaf 27 staat de volgende informatie over de drempelwaarde, alleen voor de bijdrage van ammoniak (waarschijnlijk betreft dit alleen de droge depositie van ammoniak):

- Is er meer dan 1 ammoniakbron nabij dan is de drempel 0,2 kg N ha⁻¹jaar⁻¹ (= 14 mol ha⁻¹ jaar⁻¹).

- Is er 1 andere ammoniakbron nabij dan is de drempel $0,4 \text{ kg N ha}^{-1}\text{jaar}^{-1}$ (= $29 \text{ mol ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$).
- Is er geen andere ammoniakbron nabij dan is de drempel $0,7 \text{ kg N ha}^{-1}\text{jaar}^{-1}$ (= $50 \text{ mol ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$).

Met het begrip nabij wordt het volgende bedoeld: De afstand tussen het centrum van de ammoniakbron en het meest kritische punt in een natuurgebied (waarschijnlijk met de laagste KDW). Niet alle bronnen dienen bij deze procedure meegenomen te worden

Er wordt gedefinieerd wat men onder een ammoniakbron verstaat, die meegenomen moet worden bij de beoordeling. Het aantal ammoniakbronnen dat meegeteld moet worden is de som van alle volgende bronnen:

1. Aantal bronnen met een emissie van meer dan $150 \text{ kg NH}_3\text{-N}$ per jaar binnen 200 m.
2. Aantal bronnen met een emissie van meer dan $450 \text{ kg NH}_3\text{-N}$ per jaar binnen 200-300 m.
3. Aantal bronnen met een emissie van meer dan $750 \text{ kg NH}_3\text{-N}$ per jaar binnen 300-500 m.
4. Aantal bronnen met een emissie van meer dan $1500 \text{ kg NH}_3\text{-N}$ per jaar binnen 500-1000 m.
5. Aantal bronnen met een emissie van meer dan $5000 \text{ kg NH}_3\text{-N}$ per jaar binnen 1000-2500 m.

Er zijn nog aanvullende bepalingen, die de procedure voor de aanvraag van een vergunning nog wat ingewikkelder maken.

c. Zijn er argumenten die volgens u ontbreken?

-

d. Indien u 1 mol/ha/jaar geen verantwoorde keuze vindt, is er dan een andere verantwoorde keuze en waarom?

Er bestaat m.i. op wetenschappelijke gronden geen verantwoorde keuze. Elke keuze is een politieke keuze, ook al is die gedeeltelijk gebaseerd op wetenschappelijke informatie. Ik zou als wetenschapper daarom de keuze aan de politiek laten. Men kan dan b.v. ervoor kiezen om met aanvullende emissiereductiemaatregelen komen, zodat de Nederlandse emissie als geheel niet toeneemt, waardoor men wellicht problemen bij de Raad van State vermijdt. Dit kan wellicht wel nadelig uitvallen voor sommige natuurgebieden.

Vraag 5.

Wat vindt u de redenering dat significante gevolgen als verwaarloosbaar kunnen worden beschouwd vanuit het principe 'kleine kans x klein effect = verwaarloosbaar risico'?

Dit is geen vraag die iets met atmosferische chemie te maken heeft. Daar kan ik dus geen antwoord op geven.

- a. Op welke punten bent u het eens of oneens met de redenering en waarom?
- b. Zijn de aangehaalde argumenten in de redenering inhoudelijk juist?
- c. Zijn er argumenten die volgens u ontbreken?

Vraag 7.

Heeft u verder nog opmerkingen bij de documenten?

Ik mis belangrijke informatie: de **ondergrens voor droge depositie van ammoniak**, die in het OPS-model, dus ook in Aerius is **ingebouwd**.

Ik schat dat de droge depositie van ammoniak zoals berekend door het RIVM in orde van grootte van 30% bijdraagt aan de totale stikstofdepositie in Nederland.

Zoals algemeen bekend (staat in de meeste artikelen over atmosferisch ammoniak) zitten er ammonium- (NH_4^+) en zuur (H^+) ionen in planten. Bij een bepaalde verhouding tussen deze ionen in planten hoort een luchtconcentratie aan ammoniak (NH_3): het zogenaamde compensatiepunt (Farquhar et al., 1980; Lemon en Van Houtte, 1980). Zij behandelden het compensatiepunt wat betreft de huidmondjes. Veel later bleken er ook compensatiepunten te zijn voor de uitwisseling van ammoniak met het bladoppervlak en voor de uitwisseling van tussen de bodem en de atmosfeer en de vegetatie. Deze compensatiepunten kan men samenstellen tot een totaal-compensatiepunt.

In de eerste atmosferische verspreidings- en depositiemodellen voor ammoniak werd de droge depositiesnelheid wat kleiner aangenomen dan men op grond van de chemische eigenschappen van ammoniak zou denken. Dit om enigszins rekening te houden met het bestaan van een compensatiepunt (Asman et al., 1987; Asman en van Jaarsveld, 1992). Er waren toen geen metingen van de droge depositiesnelheid van ammoniak. In het buitenland doet men dit veelal nog steeds.

Sutton et al. (1995) beschreven het eerste model dat rekening houdt met de verschillende compensatiepunten, maar er waren nog maar heel weinig metingen van het (totale) compensatiepunt. De parametrisering van het compensatiepunt in OPS is beschreven m.b.v. van de subroutine DEPAC (van Zanten et al., 2010; voor ammoniak gebaseerd op Wichink Kruit et al., 2010), dat gebaseerd is op metingen van het compensatiepunt van gras in een onbemest grasland in Wageningen (Wichink Kruit et al., 2007). Er wordt aangenomen dat alle compensatiepunten beschreven in Nederland kunnen worden met de resultaten van de metingen in Wageningen. Compensatiepunten voor verschillende planten zijn verschillend (De Ruijter et al., 2013). Zhang et al. (2010) ontwikkelden een iets ander model dat rekening houdt met de verschillen tussen verschillende planten.

Of er depositie of emissie plaatsvindt, hangt af van het verschil tussen de luchtconcentratie en het compensatiepunt. Is de concentratie aan ammoniak in de lucht **hoger** dan het totale compensatiepunt dan vindt er **droge depositie** plaats. Is de concentratie aan ammoniak in de lucht **lager** dan het totale compensatiepunt, dan vindt er emissie plaats. In de praktijk betekent dit, dat indien de concentratie aan ammoniak in de lucht onder een bepaalde waarde ligt er geen depositie op een natuurgebied plaatsvindt. Dit is dus een soort ondergrens.

Deze ondergrens hangt van zeer veel verschillende factoren af en is groter in gebieden met een hogere actuele en langdurige ammoniakconcentraties (van Zanten et al. 2010). Deze ondergrens is voor elk tijdstip voor elke plaats in principe anders. Deze ondergrens bedraagt waarschijnlijk vele **honderden mol ha⁻¹jaar⁻¹**. Ik heb op dit ogenblik niet de noodzakelijke gegevens om de gemiddelde ondergrens voor verschillende plaatsen in Nederland uit te rekenen. Het RIVM zou dat gemakkelijk kunnen doen.

Interessanter is wellicht om te kijken naar de verschillen tussen een atmosferisch transportmodel met compensatiepunt zoals het OPS-model en het meer klassieke transportmodel waarin alleen

droge depositie en geen emissie van ammoniak plaatsvindt. Dit omdat de meer klassieke modellen vaak in het buitenland worden gebruikt. In het meer klassiek transportmodel wordt de droge depositie beschreven met het zogenaamde “big leaf model”. Hierin houdt men vaak rekening met een vermindering van de droge depositie vanwege de aanwezigheid van het compensatiepunt. Deze vermindering is vrij arbitrair. In zo'n model kan overigens nooit emissie plaatsvinden.

Zhang et al. (2010) laten zien dat het verschil in depositie berekend met hun model met een compensatiepunt en het “big leaf model” zonder compensatiepunt, dat zij vroeger gebruikten, groot is. Door het aannemen van het compensatiepunt werd de berekende depositie kleiner. In het model met compensatiepunt is de depositie gedurende typische zomercondities (met een hoger compensatiepunt) 20–100 ng m⁻² s⁻¹ lager dan berekend met het “big leaf model” (komt overeen met 371 - 1860 mol ha⁻¹ jaar⁻¹ indien deze situatie het hele jaar zou duren) voor bossen met lage N-concentraties resp. landbouwgebieden. In de winter zijn deze verschillen geringer, maar op jaarbasis kan het verschil waarschijnlijk best aanzienlijk zijn (**orde van grootte: zeker 100 mol ha⁻¹ jaar⁻¹** en daarmee waarschijnlijk groter dan in het buitenland gehanteerde depositiedrempels die gebruikt worden in combinatie met een “big leaf model”). Het OPS-model verschilt een beetje met het model van Zhang et al. (2010), maar de algemene tendens is, ook om logische redenen, duidelijk: modellen met een compensatiepunt leiden waarschijnlijk tot lagere deposities dan modellen zonder compensatiepunt. In deze modellen kan er ook geen emissie uit vegetatie plaatsvinden. Modellen zonder compensatiepunt kunnen wel nog onderling verschillen wat betreft de gebruikte droge depositiesnelheid en daardoor met de berekende depositie.

Hoogst waarschijnlijk zijn de depositiedrempels in het buitenland uitgedacht zonder daarbij te denken aan het type atmosferisch transportmodel dat men aanwendt. Dat neemt niet weg, dat als men de vergunningverlening in de verschillende landen onderling wil vergelijken men de hele keten emissie - depositie - effectbeoordeling moet meenemen.

Het is in dat verband **niet juist** om depositiedrempels die gebruikt worden bij modellen zonder compensatiepunt **zonder meer** te gebruiken bij de beoordeling van de resultaten van modellen met een compensatiepunt. Dat betekent waarschijnlijk dat de Deense wetgeving (drempel + model) ondanks een veel hogere depositiedrempel van b.v. 14 mol ammoniak-N ha⁻¹ jaar⁻¹ (berekening zonder compensatiepunt) misschien wel strenger is dan de Nederlandse, die een absolute drempel heeft van slechts 0,005 mol N ha⁻¹ jaar⁻¹ (berekening met compensatiepunt).

Referenties

Asman, W.A.H., Janssen, A.J. (1987). A long range transport model for ammonia and ammonium for Europe. *Atmospheric Environment* 21, 2099-2119.

Asman, W.A.H., van Jaarsveld, J.A. (1992). A variable-resolution transport model applied for NH_x in Europe. *Atmospheric Environment* 26A, 445-464.

De Ruijter, F.J., Huijsman, J.F.M., Van Zanten, M.C., Asman, W.A.H., Van Pul, W.A.J. (2013) Ammonia emission from standing crops and crops emissions. Contribution to total ammonia emission in The Netherlands. Report 535, Plant Research International, Wageningen UR, Wageningen

Fagerli et al. (2024) Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components, geraadpleegd op 26 oktober 2024 op https://emep.int/publ/reports/2024/EMEP_Status_Report_1_2024.pdf

- Farquhar, G.D., Firth, P.M., Wetselaar, R., Weir, B. (1980) On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment: determination of the ammonia compensation point. *Plant Physiol.* 66, 710-714.
- Lemon, E., Van Houtte, R. (1980) Ammonia exchange at the land surface. *Agron.J.* 72, 876-883.
- Retsinformation (2024) Bekendtgørelse om godkendelse og tilladelse m.v. af husdyrbrug geraadpleegd op 7 november 2024 op <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2024/1089>.
- Sutton, M.A., Schjørring, J.K., Wyers, G.P. (1995) Plant-atmosphere exchange of ammonia. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 351, 261-278.
- Van Zanten, M.C., Sauter, F.J., Wichink Kruit, J.A., van Jaarsveld, J.A., van Pul, W.A.J. (2010) Description of the DEPAC module. Rapport 680180001/2010, RIVM, Bilthoven.
- Wichink Kruit, R.J., van Pul, W.A.J., Otjes, R.P., Hofschreuder, P., Jacobs, A.F.G., Holtslag A.A.M. (2007) Ammonia fluxes and derived canopy compensation points over non-fertilized agricultural grassland in The Netherlands using the new gradient ammonia - high accuracy - monitor (GRAHAM). *Atmospheric Environment* 41, 1275-1287.
- Wichink Kruit, R.J., van Pul, W.A.J., Sauter, F.J., van den Broek, M., Nemitz, E., Sutton, M.A., Krol, M., Holtslag, A.A.M. (2010) Modeling the surface-atmosphere exchange of ammonia. *Atmospheric Environment*, Vol. 44, 877-1004.
- Umweltbundesamt (2024) Ausbreitungsmodell nach TA Luft, AUSTAL, Programmbeschreibung zu Version 3.2, Stand 2023-08-01, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Ingenieurbüro Janicke, Überlingen, geraadpleegd op 9 november 2024 op https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2338/dokumente/austal_de.pdf.
- Zhang, L., Wright, L.P. Asman, W.A.H (2010). Bi-directional air-surface exchange of atmospheric ammonia - A review of measurements and a development of a big-leaf model for applications in regional-scale air-quality models. *J. Geophys. Res.* 115, D20310, doi:10.1029/2009JD013589