

# VU Research Portal

## Quantification of nitrogen deposition and its uncertainty with respect to critical load exceedances

Bleeker, A.

2018

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Bleeker, A. (2018). *Quantification of nitrogen deposition and its uncertainty with respect to critical load exceedances*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

# Samenvatting

Dit proefschrift gaat over het kwantificeren van stikstofdepositie en de onzekerheden die daarmee gemoeid zijn, en dan met name over de relevantie van deze onzekerheden voor de overschrijding van de kritische stikstofbelasting. Het huidige beleid met betrekking tot het beschermen van de Natura2000 gebieden, zowel in Nederland als in andere Europese landen, is mede gebaseerd op deze overschrijdingen. Onzekerheden in de schattingen van de stikstofdepositie hebben een direct gevolg voor de overschrijdingen en, daarmee, eventueel op de inschatting van de effectiviteit van maatregelen gericht op het terugdringen van stikstofemissies ter bescherming van de natuurgebieden. De algemene vraag die in dit proefschrift wordt beantwoord, is of de onzekerheden in de depositieschattingen en de overschrijdingen van de kritische belastingen voldoende bekend zijn om gebruikt te kunnen worden voor het beleid. Kennis over deze onzekerheden kan dan meegenomen worden in afwegingen bij het nemen van reductiemaatregelen op basis van de depositieschattingen, waarbij daarnaast rekening gehouden wordt met argumenten als: voorzorgsprincipe, effecten, zorgen uit de samenleving.

Het kwantificeren van de depositie en de overschrijding van de kritische belasting is het hoofdonderwerp van dit proefschrift, met een focus op de onzekerheid in de depositieschattingen. De onzekerheid in de kritische belasting wordt niet behandeld. Hoe kunnen we de stikstofdepositie schatten en wat is de onzekerheid in de depositieschattingen? Weten we, wanneer we alles in ogenschouw nemen, wel genoeg over die onzekerheden? Zijn de onzekerheden dusdanig dat uitgebreide emissiereductie maatregelen, gebaseerd op (in dit geval) overschrijdingen van kritische belastingen, genomen kunnen worden. In de volgende paragrafen worden deze vragen beantwoord via het behandelen van de onderzoeksvragen in dit proefschrift.

## *Hoe kunnen we de stikstofdepositieniveaus en hun verloop in de tijd bepalen?*

Stikstofdepositie is het resultaat van emissie, transport en atmosfeer-biosfeer uitwisseling van gereduceerd stikstof, voornamelijk afkomstig van landbouwbronnen, en geoxideerd stikstof afkomstig van het verbranden van fossiele brandstoffen. Stikstof kan direct op het aardoppervlak deponeren in de vorm van gassen en aerosolen, maar ook door het neerslaan als natte depositie. Stikstofdepositie kan bepaald worden via metingen, modelberekeningen en een combinatie van die twee. Een gedetailleerd overzicht van verschillende methodes die hiervoor gebruikt kunnen worden, wordt gegeven in de Hoofdstukken 2-5 van dit proefschrift. Voor natte depositie worden regenvangers gebruikt die zowel de hoeveelheid als de chemische samenstelling van de neerslag meten.

Ondanks het langdurige gebruik van dergelijke vangers kunnen de verschillen tussen de meetmethodes tot 27% voor ammonium en 25% voor nitraat bedragen voor dezelfde meetlocatie. Droge depositie is moeilijker te meten en er is geen enkel instrument beschikbaar dat de droge depositie van de verschillende stikstofcomponenten direct kan meten. Daarom worden verschillende methodes gebruikt voor de verschillende stikstofcomponenten.

Modellen zijn essentieel voor het kwantificeren van de depositie en om emissies aan depositie te kunnen relateren. Modellen kunnen helpen om processen te begrijpen, maar ook om het effect van scenario's en beleidsopties te bepalen. Modellen kunnen zijn mede gebaseerd op metingen, door deze op te schalen of door parametrisaties, gebaseerd op metingen, te vertalen naar depositiemodellen. In het algemeen worden metingen gebruikt voor het valideren van theoretische of empirische modellen. Modellen verschillen in hun toepassingen; zo zijn er kleinschalige en grootschalige modellen (zie Hoofdstuk 4).

De trend in atmosferische concentraties en depositie wordt idealiter bepaald op basis van metingen. Hoofdstuk 5 bespreekt de trends in metingen en het effect van beleid in Europa. De discussie over de trend van gereduceerd stikstof liet zien dat voor het interpreteren van langetermijn trends een verbeterd mechanistisch begrip en modellering nodig is. Dit is met name het geval voor een verbeterde generalisatie van de bi-directionele uitgangspunten voor ammoniakuitwisseling, het gebruiken van chemische interacties bij het omgaan met droge depositie en de verdere ontwikkeling van de regionale modellering van de ammoniakemissies in relatie tot milieuomstandigheden.

Het doel van de verschillende methodes is om de stikstofdepositie te bepalen die relevant is voor overschrijdingen van kritische belastingen en, daarom, representatief moeten zijn op een schaal van ecosystemen en de tijdschaal van een jaar. Door verschillende redenen op het gebied van logistiek, financiële mogelijkheden, beschikbaarheid van gegevens, kan de opzet van zowel metingen en modellering sub-optimaal blijken te zijn. Doordat de uiteindelijke opzet van een meetnet bijna altijd een compromis is tussen deze onderwerpen, is het effect er van op de berekende en gemeten deposities niet altijd duidelijk. Voordat een meetnet ontwikkeld wordt, moet het effect op de uiteindelijke onzekerheid worden onderzocht.

Wanneer het doel is om het verloop in de tijd te ontdekken of te volgen, moet rekening gehouden worden met een veranderende chemie in de atmosfeer. Zo heeft een verandering van  $\text{SO}_2$  in bijvoorbeeld Nederland voor een lagere (-10%) natte depositie van ammonium geleid. Een goed inzicht in de chemische interacties is daarom nodig om de potentiële 'maskeer effecten' te begrijpen die het gevolg zijn van veranderende emissies van mogelijke reagentia.

Voor beiden methodes, meten en modelleren, is het mogelijk dat onzekerheden worden geïntroduceerd door de omissie van relevante processen. Er zijn consistente trends in gemeten concentraties en depositie, gebruik makend van vergelijkbare meetmethodes, waarbij veranderingen zichtbaar zijn voor zowel stikstofconcentraties – als depositie. Vergelijkingen in het laboratorium en in het veld zijn uitgevoerd om de metingen te valideren, zoals besproken in Hoofdstuk 3.

*Wat is de onzekerheid in stikstofdeposities op verschillende ruimtelijke schalen en welke factoren beïnvloeden die?*

Zowel de niveau's als de trends van stikstofdepositie zijn onderwerp van een breed scala van onzekerheden. Systematische en willekeurige fouten komen voor bij het bepalen van de depositie door metingen en modellering (of een combinatie). In Hoofdstuk 8 wordt duidelijk dat de schattingen van atmosferische stikstofdepositie in het algemeen een significant hoog onzekerheidsniveau heeft, op landschapschaal over het algemeen van ongeveer een factor 2.

### **Modellering**

De belangrijkste onzekerheden bij het modelleren van de depositie komen voort uit het beperkte inzicht in bi-directionele fluxen van reactief stikstof en de nog grotendeels onbekende bronnen en vormen van organische stikstofdepositie. De onzekerheden in de gemodelleerde waarden zijn het resultaat van willekeurige en systematische fouten. Terwijl systematische fouten vooral het gevolg zijn van onvoldoende kennis over de depositieprocessen, of door het negeren van processen of variabelen, zijn willekeurige fouten het resultaat van variabiliteit in gemeten waarden en/of parameters, zoals weergegeven in Hoofdstuk 5. Deze kunnen veroorzaakt worden door bijvoorbeeld meetfouten en parameterisaties. Kennis over de betrouwbaarheid van modellen voor het schatten van depositie is vaak beperkt. Dit komt voornamelijk door het feit dat er slechts beperkt observaties van veel van de belangrijke depositieparameters beschikbaar zijn. Dit beperkt een goede evaluatie van de depositieschattingen van reactief stikstof en dan met name de droge depositie component. Er is, meer specifiek, een gebrek aan metingen voor een aantal van de belangrijke componenten zoals gasvormig salpeterzuur ( $\text{NH}_4$ ), grof nitraat aërosol en ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Zonder dit is een allesomvattende modevaluatie bijna niet mogelijk. Andere bronnen voor de onzekerheden in gemodelleerde deposities zijn gerelateerd aan: verdeling tussen gasvorming salpeterzuur en fijn of grof nitraat aërosol, schattingen van ammoniakemissies (en relatie met meteorologische factoren, landbouwpraktijk en gekoppeld aan begrip van de biosfeer-atmosfeer uitwisseling), droge depositie van deeltjes, het niet meenemen van alle stikstofcomponenten (bijv. organisch N), ontbreken van bi-directioneel  $\text{NH}_3$  transport, sub-grid fluxen van  $\text{NH}_x$  componenten, maar ook effecten van bijvoorbeeld topografie op natte depositie.

Verschillende aspecten spelen een rol bij verschillende ruimtelijke schalen. Kijkend naar het verschil tussen een lage en een hoge resolutie, zullen de processen in atmosferische transport- en depositiemodellen de lokale schaal in meer detail moeten beschrijven. Dit zorgt voor meer druk op de beschikbaarheid en kwaliteit van gegevens en gebrek aan deze aspecten zal mogelijk een optimale inzet negatief beïnvloeden. De representativiteit van de modelresultaten kan dan een probleem worden, met mogelijke grote onzekerheden tot gevolg. Voor modellen zal de onzekerheid in het algemeen toenemen bij een toenemende resolutie. De kans dat de feitelijke gemiddelde depositie voor een bepaald gebied correct wordt ingeschat neemt toe voor een groter gebied, wanneer er alleen sprake is van willekeurige afwijkingen. In het geval van systematische afwijkingen is de onzekerheid onafhankelijk van de schaal. Op een hogere resolutie wordt representativiteit een belangrijker onderwerp en introduceert het een hogere onzekerheid in de depositieschattingen wanneer er gebruik wordt gemaakt van hoge-resolutie gegevens die de feitelijke lokale situatie niet weerspiegelen. Het verkrijgen van gegevens van een hoge kwaliteit (op een hoge resolutie), die nodig zijn om een verdere toename van de onzekerheid in het modeluitkomsten op een hoge resolutie te voorkomen, kan gehinderd worden door financiële en/of privacy beperkingen.

## **Metingen**

Het gegeven van de representativiteit speelt ook bij metingen van stikstofdepositie een rol. Een hoge meetnetdichtheid is nodig voor het vangen van grote gradiënten in luchtconcentraties en deposities van stikstof. Financiële randvoorwaarden kunnen echter de mogelijkheden beperken, met een minder dicht netwerk tot gevolg. In dat geval moet het op voorhand duidelijk zijn wat het effect van deze beperking op de mogelijkheid van het netwerk om de ruimtelijke en temporele verdeling van de concentraties en/of deposities te vangen. Nieuwe methodes, zoals satellietwaarnemingen kunnen dit probleem beperken, maar daarvoor zijn nog verdere ontwikkelingen nodig.

*Hoe beïnvloedt de onzekerheid in de stikstofdeposities de relatie met effecten op biodiversiteit en overschrijding van de kritische depositie?*

Hoofdstuk 6 laat zien dat ongeveer 11% van het oppervlak van de beschermde natuurgebieden in de wereld, vallend onder de Conventie over Biologische Diversiteit, meer dan  $10 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$  ontvangen. Dit geeft een situatie weer waarbij negatieve effecten op de ecosystemen waarschijnlijk zullen voorkomen. Voor het jaar 2030 wordt niet verwacht dat deze situatie zal veranderen.

In principe heeft ieder onderdeel van de genoemde relatie zijn eigen (soms grote) onzekerheid, waarbij het combineren van deze onzekerheden niet eenvoudig is. Door de manier waarop de fouten door de emissie/depositie/kritische belas-

ting/overschrijding keten bewegen, is er de mogelijkheid dat onzekerheden in de keten elkaar compenseren. Vanwege een dergelijke compensatie is het niet gemakkelijk om aan te geven wat de totale onzekerheid in het systeem zal zijn. Een voorbeeld hiervan is het mixen van geoxideerd stikstof tijdens grotere transportafstanden, vergeleken met die van gereduceerd stikstof. Individuele bronnen hebben, gebaseerd op de combinatie van een activiteit en een emissiefactor, hun eigen onzekerheden. Daarbij is er een toenemende mogelijkheid voor het compenseren van afwijkingen ten gevolge van de grotere transportafstand in de atmosfeer (in vergelijking met gereduceerd stikstof), wat de onzekerheid in de totale depositieschattingen vermindert. Een ander voorbeeld is, dat ten gevolge van de foutencompensatie de schattingen van de totale stikstofdepositie nauwkeuriger zijn dan die van de individuele stikstofcomponenten.

De onzekerheid kan geschat worden voor de situatie waarbij de onderdelen van de keten bekend zijn, door bijvoorbeeld de vergelijking met beschikbare meetresultaten. Maar door de invloed van systematische afwijkingen, zoals bijvoorbeeld bij een missende stikstofcomponent bij het bepalen van de empirische kritische belasting voor een bepaalde vegetatietype, kan er verderop in de keten een probleem ontstaan. Voor het bepalen van de empirische kritische belasting wordt de totale (bekende) stikstofaanvoer gerelateerd aan een waargenomen effect bij de vegetatie. Echter, wanneer er ook een bijdrage is van een onbekende stikstofcomponent (bijv. organisch stikstof) zal het koppelen van het effect aan de stikstofcomponenten die wel bekend zijn, er toe kunnen leiden dat beleidsmakers drastischer maatregelen nemen voor deze bekende componenten. Zo kan bijvoorbeeld, wanneer maatregelen voor het reduceren van de ammoniakemissie niet het gewenste effect laten zien, het verder reduceren van de ammoniakemissie een makkelijke oplossing zijn. Echter, tegelijkertijd kan een onbekende stikstofcomponent invloed hebben op de zichtbare effecten op de biodiversiteit en dus kunnen dan de bekende componenten zoals ammoniak hiervoor foutief verantwoordelijk gehouden worden.

*Is er bewijs voor de hypothese van dit proefschrift, of kan het worden gefalsificeerd?*

Voor het beschermen van de Nederlandse natuurgebieden tegen stikstofdepositie is er een drastische reductie van de ammoniakemissie nodig. Volgens de berekeningen gepresenteerd in Hoofdstuk 7 is een reductie nodig van meer dan 70% in vergelijking met de situatie in 1980. Mogelijkheden voor het verminderen van de emissies en hun uiteindelijke effect zijn onderzocht, gebruik makend van informatie over berekende deposities, kritische belastingen en hun overschrijding. Een dergelijk onderzoek combineert de verschillende stappen in de oorzaak-gevolg keten, zoals ook gepresenteerd in Hoofdstuk 6, met onzekerheden die de afzonderlijke onderdelen van deze relatie beïnvloeden.

Voor dit proefschrift is de volgende hypothese opgesteld:

*Stikstofdepositie levert een bijdrage aan de negatieve maatschappelijke effecten ten aanzien van biodiversiteit, klimaat en volksgezondheid. Voor de ontwikkeling van beleid om stikstofdepositie en de effecten ervan te verminderen zijn betrouwbare schattingen van de depositie nodig op verschillende ruimtelijke en temporele schalen, gebaseerd op metingen en modellen. Dergelijke schattingen zijn nodig voor het bepalen van de oorzaak-gevolg relaties, zoals de schatting van de overschrijding van kritische belastingen. Beleid om de overschrijdingen te reduceren gaan gepaard met kosten voor de economische sectoren en de samenleving. Daarom is het belangrijk om de onzekerheden in de schattingen te kennen. Kennis over stikstofdepositie is echter nog niet compleet en een volledige kwantificering van de onzekerheden is te beperkt voor het toepassen van de schattingen voor het beleid. Zolang het verschil tussen de schattingen en de beleidsdoelen niet groot is, kunnen de schattingen niet gebruikt worden zonder het identificeren van de onzekerheden. Dit geldt zowel voor het beschrijven van de depositietrends als voor schatting van de depositie op specifieke locaties.*

Zoals beschreven in dit proefschrift, zijn er verschillende methodes beschikbaar om de depositie voor diverse schalen te kwantificeren. Een combinatie van meten en modelleren is nodig voor het verkrijgen van de beste schatting. Echter, ruimtelijk en temporeel geaggregeerde stikstofdepositie is nog steeds onzeker ten gevolge van de aard van de bronnen, transport en landschapsafhankelijke depositie. Problemen blijven derhalve bestaan ten aanzien van gemeten en gemodelleerde depositie. Zoals beschreven in Hoofdstuk 8, spelen de volgende zaken hierbij een rol, resulterend in systematische en willekeurige afwijkingen:

- Gebrek aan gedetailleerde en accurate gegevens over activiteiten (willekeurig)
- Bronspecifieke emissiefactoren (systematisch)
- Missende componenten (systematisch)
- Ontbrekende processen (systematisch)
- Gebrek aan metingen (willekeurig)

Modelstudies, gebaseerd op modellen die gevalideerd zijn op basis van de kennis van dat moment, zijn algemeen gebruikt voor, bijvoorbeeld, overschrijdingen van kritische belastingen en voor beleidsevaluaties. Terwijl de huidige modellen in staat zijn om de effecten van maatregelen te evalueren, zoals gepresenteerd is voor het ruimtelijke emissie optimalisatie onderzoek (Hoofdstuk 7), is de onzekerheid echter niet volledig gekwantificeerd. De moeilijkheid hierbij komt voort uit de aard van het probleem: grote ruimtelijke en temporele variatie van emissies en depositie. Maar ook door een schijnbaar eenvoudige atmosferische chemie die echter moeilijk te vangen is in modellen ten gevolge van de aanwe-

zigheid van verschillende chemische evenwichten in de atmosfeer.

Een goed voorbeeld van de effecten van deze onzekerheden is het Nederlandse ammoniakgat. Deze systematische afwijking wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld missende zee-emissies, een aantal andere missende kleinere bronnen, maar ook ten gevolge van incomplete depositieparameters voor bijvoorbeeld bemest grasland. Een ander voorbeeld is de foutieve interpretatie van de daling van  $\text{SO}_2$  en het effect van lange-afstands transport en de aandacht voor de ammoniakconcentratie, in plaats van die voor de totale massabalans. Willekeurige afwijkingen worden geïntroduceerd in situaties waar bijvoorbeeld de gerapporteerde locaties van emissies niet overeen komen met de feitelijke locaties en daarom de bijdrage van de depositie van deze bronnen aan de overschrijding van de kritische belasting wordt over- of onderschat.

Ondanks dat er pogingen zijn gedaan om de onzekerheden in de stikstofconcentraties en -depositie te kwantificeren, ontbreekt een volledige inschatting van de onzekerheden, doordat die voor de hierboven opgesomde afwijkingen niet altijd bekend zijn. Wanneer een dergelijke kwantificering niet compleet is, is inzicht in de echte stikstofdepositie niet mogelijk.

Is beleidsontwikkeling dan wel mogelijk? Is het acceptabel om vergaande emissiereductie maatregelen door te voeren, gebaseerd op (in dit geval) overschrijding van kritische belastingen. Aangezien de complete keten van emissie en depositie en overschrijding van kritische belasting wordt vergezeld van een lange lijst met onzekerheden, zou vanuit een wetenschappelijk perspectief de reactie zijn: nee, deze maatregelen zijn niet verantwoord, aangezien er simpelweg nog te veel onbekende (mogelijk grote) onzekerheden zijn.

Echter, geredeneerd vanuit het voorzorgsprincipe is het niet zo eenvoudig. Wanneer er geen maatregelen genomen worden omdat nog niet alle onzekerheden volledig gekwantificeerd zijn, zou een potentieel belastende situatie alleen maar erger kunnen worden. Er zijn waarnemingen van de effecten van bijvoorbeeld stikstof op de biodiversiteit en grondwaterkwaliteit, die laten zien dat het verschil tussen de huidige concentratie- en/of depositieschattingen en de beleidsdoelen (bijv. kritische belastingen) nog steeds groot is. Hierdoor is het nog steeds verantwoord om, ondanks dat de onzekerheden blijven, reducerende maatregelen te nemen. Dit wel onder de voorwaarde dat er een voortdurende inspanning nodig is om de onzekerheden te verminderen en dat de voortgang wat betreft de maatregelen regelmatig wordt geëvalueerd.

Hiervoor wordt aanbevolen om een meetprogramma te (her)introduceren, waarbij met name gekeken wordt naar de belangrijkste componenten van de hier beschreven bron-effect keten. Een dergelijk programma moet zich bezig houden met het verkrijgen van kennis over de processen en hun interacties die



een rol spelen in de keten, waarbij het vooral gaat om het reduceren van de onzekerheden in het meten en modelleren van zowel stikstofdepositie als kritische belastingen. Een ander belangrijk doel van het programma is de mogelijkheid om de effecten van reductiemaatregelen ten aanzien van stikstofdepositie te monitoren. Relevante wetenschappelijke ontwikkelingen voor een dergelijk programma beginnen bij een duidelijke definitie van stikstof(depositie) en het gebruik hiervan in de gehele bron-effect keten. Methodes voor het meten en modelleren van deze stikstof moeten dan in lijn gebracht worden met deze definitie, waardoor het mogelijk is dat nieuwe processen nodig zijn voor modellen waarvoor dan ook parameterisaties en emissies verkregen moeten worden. Het heeft ook consequenties voor de metingen: welke meetmethode en opzet is nodig voor het meten van stikstofdepositie? Recente ontwikkelingen ten aanzien van satellietwaarnemingen kunnen een rol spelen bij het oplossen van uitdagingen rond ruimtelijke en temporele variabelen met betrekking tot stikstofemissie en -depositie, maar er is meer werk nodig voor het verkrijgen van relevante parameters in de totale transportroute van stikstof. Toekomstig onderzoek moet zich richten op de hier beschreven aspecten om uiteindelijk de onzekerheden in de keten te verminderen. Hopelijk zal dit proefschrift een bijdrage leveren aan een verbeterd begrip van stikstofdepositie en aan het verminderen van de onzekerheden in de depositieschattingen.