

Biomonitoring met duinmossen

Hoge stikstofgehaltenes duiden op overbelasting door depositie

Natuurgebieden hebben al decennialang te maken met eutrofiëring en verzuring, veroorzaakt door een hoge atmosferische stikstofdepositie. In een groot deel van het stikstofgevoelige areaal van Nederlandse Natura 2000-gebieden worden kritische depositiewaarden voor stikstof nog altijd overschreden. Het probleem is moeilijk op te lossen vanwege de diffuse aard van emissies en bronnen. In dit artikel bespreken we de huidige stikstofbelasting in droge duingraslanden in relatie tot kritische depositiewaarden.

Het habitattypen Grijze duinen (H2130) is erg gevoelig voor stikstofdepositie. Deze droge en vochtige duingraslanden komen voor in de Nederlandse kustduinen en beslaan een oppervlak van circa 10.000 ha. Vanwege de grote variatie in abiotische condities en vegetatie worden in Nederland drie subtypen onderscheiden: een kalkrijk subtype (H2130A), een kalkarm subtype (H2130B) op droge bodems en een heischraal subtype (H2130C) op vochtige bodems.

Voor elk van deze subtypen zijn op nationaal niveau kritische depositiewaarden (KDW's) vastgesteld, op basis van een internationale review van empirische gegevens (veldstudies, veld- en labproeven) en modellering met het bodemmodel SMART2 (Bobbink *et al.*, 2022). De KDW is een generieke grenswaarde waarboven het risico bestaat dat de kwaliteit van het habitat significant wordt aangetast door de verzurende en/of vermestende invloed van atmosferische stikstofdepositie (Wamelink *et al.*, 2023). In 2012 werden de KDW's voor de subtypen A, B en C vastgesteld op respectievelijk 15, 10 en 10 kg N/ha/j (Van Dobben *et al.*, 2012). Recent zijn deze bijgesteld naar respectievelijk 15, 13 en 11 kg N/ha/j (Wamelink *et al.*, 2023), een lichte verhoging van de KDW voor subtypen B en C. Empirisch onderzoek laat echter zien dat ecologische effecten al kunnen

optreden onder de hiervoor genoemde KDW's. Vooral kalkarme duingraslanden zijn erg gevoelig, daar treden al effecten op bij deposities van 2 tot 8 kg N/ha/j (Kooijman *et al.*, 2017; Pakeman *et al.*, 2016; Remke *et al.*, 2009). In dit onderzoek hebben we gekeken naar de invloed van de actuele stikstofbelasting op duingrasland-ecosystemen door het stikstofgehalte in mossen en korstmossen te meten. Daarbij hebben we ons beperkt tot de droge, kalkrijke en kalkarme duingraslanden (subtypen A en B). In het kader van het onderzoek zijn slaapmossen en gaffeltandmossen verzameld in Nederlandse en buitenlandse duingebieden met stikstofdepositiewaarden variërend van relatief laag tot relatief hoog. Ook hebben we gekeken naar het stikstofgehalte in rendiermossen in gebieden met relatief lage depositiewaarden.

We hebben onderzocht in hoeverre stikstofgehaltenes in (korst)mossen een relatie hebben met de berekende stikstofdepositie door stoftransport- en depositiemodellen, en met de gemeten ammoniak-luchtconcentratie. In dit artikel bespreken we de resultaten. Verder bediscussiëren we onze meetresultaten in relatie tot bovengenoemde KDW's en empirische *ranges*. Ten slotte geven we aanbevelingen voor monitoring van stikstofdepositie.

stikstofdepositie
biomonitoring
grijze duinen
slaapmossen
korstmossen

J.J.M. (Jeroen) Geurts
KWR Water Research
Institute, Groningenhaven 7,
3430 BB Nieuwegein;
jeroen.geurts@kwrwater.nl

C.J.S. (Camiel) Aggenbach
KWR Water Research
Institute.

E.S. (Eva) Remke
Onderzoekcentrum B-Ware

M. (Maxime) Lemmens
Universiteit van Münster

E (Erik) Sanz Mali
Global Factor (Madrid)

Foto **Antonie Glaser**. Grijze duinen langs de Nederlandse Noordzeekust.

Mosmonitoring

Het direct meten van stikstofdepositie op veel locaties is lastig en kostbaar. Daarbij kent de landelijke modellering van de stikstofdepositie allerlei onzekerheden, waardoor modeluitkomsten op specifieke locaties een grote onzekerheid kunnen hebben (Hoogerbrugge *et al.*, 2023). Om de stikstofdepositie in duingraslanden te kwantificeren hebben we in dit onderzoek daarom het totale stikstofgehalte van slaapmossen, rendiermossen en gaffeltandmossen gebruikt als een relatieve maat voor de stikstofdepositie. De mossen zijn bemonsterd in duingebieden met een relatief hoge stikstofdepositie (Nederland, België en Noordwest-Frankrijk) en buitenlandse referentiegebieden met een over het algemeen lagere gemiddelde stikstofdepositie (Denemarken, Noordoost-Duitsland, Zuidwest-Frankrijk en Noordwest-Wales).

Mosses zijn ideaal om het depositieniveau van diverse stoffen te bepalen, omdat ze makkelijk gas en vaste deeltjes uit de lucht opnemen. Bovendien hebben de meeste mossen geen wortelstelsel en vaatbundels,

waardoor op droge bodems capillaire opstijging van bodemvocht naar het mos gering is (Voortman *et al.*, 2013) en dus ook opname van nutriënten beperkt is. Mossen zijn bovendien op veel plekken makkelijk te bemonsteren.

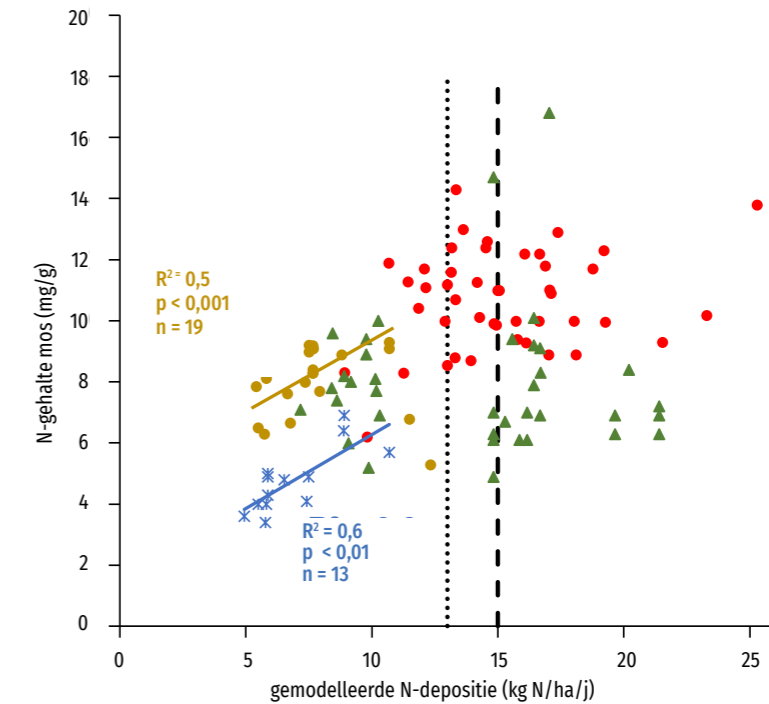
Diverse algemeen voorkomende slaapmossoorten (mossen met vertakte stengels) zijn geschikt voor het monitoren van stikstof. In de Moss Survey van het International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops (ICP Vegetation) wordt al langer gebruik gemaakt van slaapmossen om de atmosferische (achtergrond)depositie van o.a. stikstof, zware metalen, persistente organische verbindingen (POPs) en microplastics in ruimte en tijd in beeld te brengen (Harmens *et al.*, 2011). Voor stikstof heeft Nederland echter nooit meegedaan aan dit programma. In het hele Nederlandse kustduinlandschap en in buitenlandse kustduinen zijn tussen 2019 en 2022 op 66 locaties slaapmossen verzameld volgens het protocol van ICP Vegetation (figuur 1). Dit betrof de

Figuur 1 Het bemonsteren van duinklauwtjesmos in een duingrasland.

Figure 1 Sampling of *Hypnum cupressiforme* var. *lacunosum* in a dune grassland.



- slaapmossen in regio's met hoge stikstofdepositie (NL, BE, NW-FR)
- slaapmossen in buitenlandse referentiegebieden met lage tot matig hoge stikstofdeposities (NO-DE, DK, NW-Wales, ZW-FR)
- ▲ gaffeltandmossen (NL)
- × rendiermossen (NL, NO-DE, DK, ZW-FR)
- - KDW kalkrijk
- KDW kalkarm



Figuur 2 De relatie tussen het gemeten stikstofgehalte in de groene delen van slaapmossen, rendiermossen en gewoon gaffeltandmos en de gemiddelde stikstofdepositie in regio's met een hoge stikstofdepositie en in buitenlandse referentiegebieden met lage tot matig hoge stikstofdepositie.

Figure 2 The relationship between measured nitrogen content in the green parts of pleurocarp mosses, reindeer mosses and dicranid mosses and modelled nitrogen deposition in regions with high nitrogen deposition (the Netherlands, Belgium and NW France) and in foreign reference areas with low to moderately high nitrogen deposition (NE Germany, Denmark, NW Wales and SW France). Dotted, vertical lines show the critical load for calcareous and acidic dry dune grasslands.

soorten duinklauwtjesmos (*Hypnum cupressiforme* var. *lacunosum*), heideklauwtjesmos (*Hypnum jutlandicum*) en groot laddermos (*Pseudoscleropodium purum*). In 2021 is ook gewoon gaffeltandmos (*Dicranum scoparium*), een zuurminnende soort, bemonsterd op 37 locaties in de Nederlandse kustduinen. Dit is geen slaapmos en ook geen gangbare soort voor monitoring van stikstofdepositie in het monitoringsprogramma van ICP Vegetation, maar we wilden testen of deze soort ook een relatie vertoont tussen het stikstofgehalte in de biomassa en de gemiddelde stikstofdepositie. Ook zijn er in 2022 rendiermossen (*Cladonia portentosa*, *C. ciliata*, *C. rangiferina* en *C. arbuscula*) bemonsterd op 13 locaties in Nederland, Duitsland, Denemarken en Zuidwest-Frankrijk. In alle monsters zijn N-totaalgehalten gemeten en in veel van deze monsters ook diverse macro-elementen en zware metalen.

Metingen van stikstofgehalten in mossen zijn vergeleken met de gemiddelde stikstofdepositie (voor Nederland het OPS-model (Hoogerbrugge *et al.*, 2023) en voor buitenlandse locaties het EMEP-model (EMEP, 2022)). Voor een beperkt aantal in 2020 bemonsterde Nederlandse locaties zijn de stikstofgehalten ook vergeleken met de op dezelfde locatie gemeten ammoniakconcentraties in de lucht (Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden, RIVM). De resultaten zijn recent gepubliceerd in een rapportage (Aggenbach & Geurts, 2022).

Stikstofgehalten in relatie tot modelberekeningen van stikstofdepositie

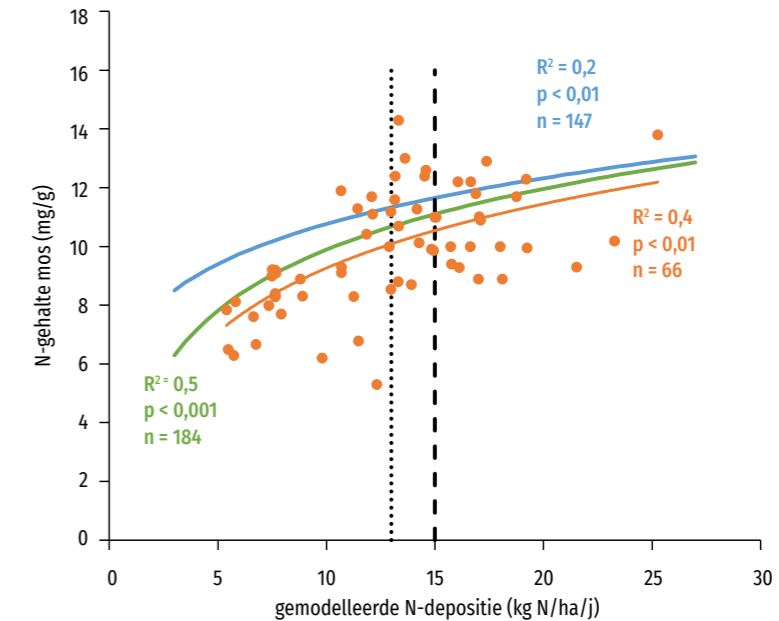
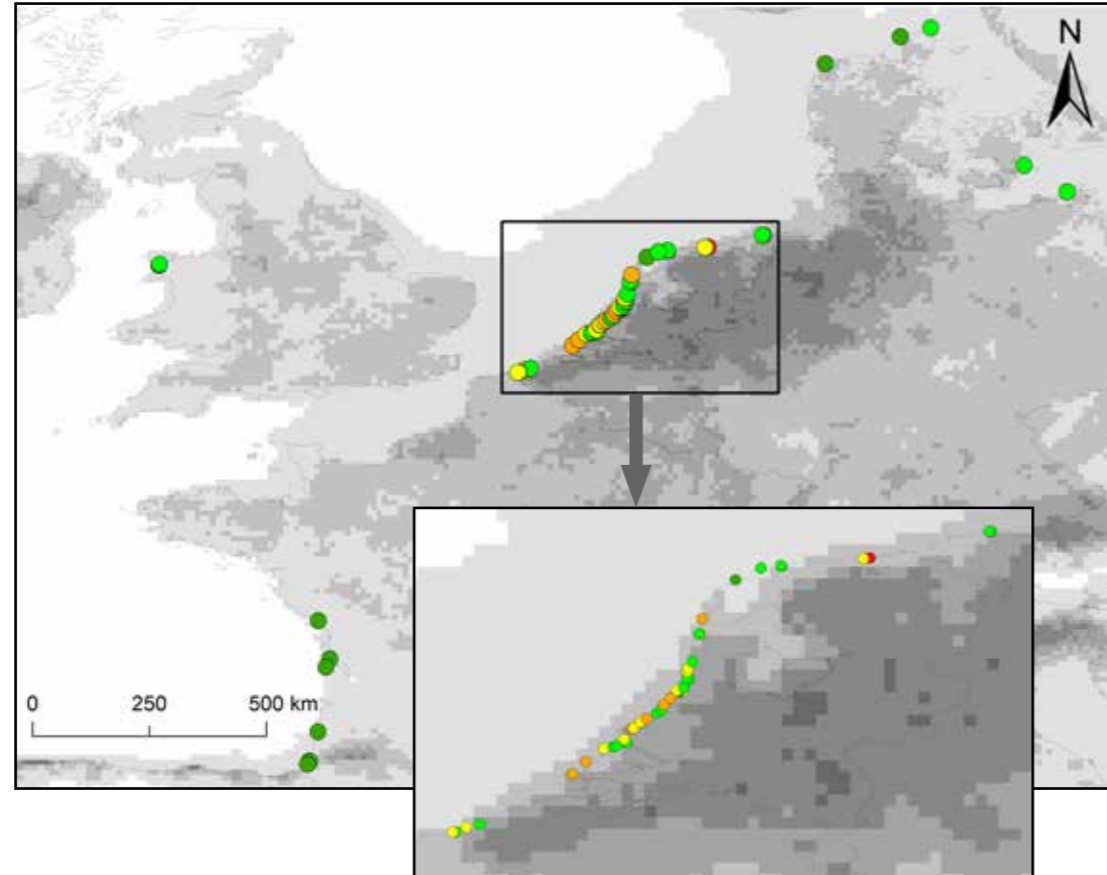
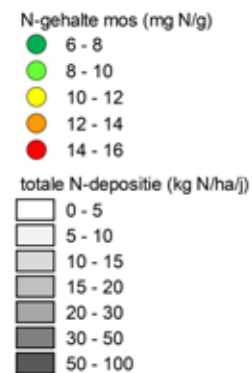
Het stikstofgehalte in slaapmossen is in Nederland hoger dan in veel buitenlandse duingebieden met een relatief lage stikstofdepositie (figuur 2 en 3). Binnen de regio's met een hoge stikstofdepositie (Nederland,

België en Noordwest-Frankrijk) is geen significant verband gevonden tussen de stikstofdepositie volgens modellen en het in slaapmossen gemeten stikstofgehalte (figuur 2; lineaire regressie: $R^2 = 0,05$; $p = 0,133$). Hiervoor zijn een aantal mogelijke oorzaken. Ten eerste is er in deze regio zo veel stikstofdepositie (veelal > 10 kg N/ha/j) dat de mosbiomassa verzadigd raakt met stikstof, waardoor mossen geen extra stikstof meer opnemen. Zulke effecten van verzadiging zijn ook gevonden wanneer stikstofgehalten in mossen worden vergeleken met lokale metingen van stikstofdepositie

(Harmens *et al.*, 2014). Ten tweede kunnen depositie-modellen niet fijnmazig genoeg zijn om het ruimtelijk patroon van stikstofdepositie te bepalen. Zo heeft het Nederlandse Aerius OPS-model cellen van 1 km² en het EMEP-model nog veel grotere cellen (50x50 km²). Lokale terreincondities, zoals (micro-)reliëf, aerodynamische ruwheid van de vegetatie en daardoor verschillen in opname van droge depositie door bovengrondse vegetatie spelen een rol bij de ruimtelijke variatie van depositie. De modelcellen zijn in de duinen relatief groot in verhouding tot de (kleinschalige) ruimtelijk-

Figuur 3 Het patroon van het stikstofgehalte in slaapmossen in Noordwest-Europa, tegen de achtergrond van de gemodelleerde stikstofdepositie (kg N/ha/j) in het jaar 2021 (EMEP, 2022).

Figure 3 The pattern of nitrogen content in pleurocarp mosses in Northwest Europe. Also shown is the modelled deposition (kg N/ha/j) in the year 2021 (EMEP, 2022).



Figuur 4 De logaritmische relatie tussen het gemeten stikstofgehalte in de groene delen van slaapmossen en de gemodelleerde stikstofdepositie in Nederlandse kustduinen en buitenlandse referentiegebieden, met ter vergelijking het verband op basis van data uit eerder Europees onderzoek (Meyer *et al.*, 2015) en de Moss Survey van ICP Vegetation 2015-2017 (Frontasyeva *et al.*, 2020).

Figure 4 The logarithmic relationship between the measured nitrogen content in the green parts of pleurocarp mosses in Dutch coastal dunes and foreign reference areas (orange). Also shown is the relationship between these two variables based on previously conducted research in Europe by Meyer *et al.* (2015) and the Moss Survey of ICP Vegetation in the period 2015-2017 (Frontasyeva *et al.*, 2020). Dotted, vertical lines show the critical load for calcareous and acidic dry dune grasslands.

ke variatie van de topografie en vegetatiestructuur in deze gebieden. Daarnaast vertonen kaarten met gemodelleerde stikstofdepositie langs de kust van de Atlantische oceaan, Noordzee en Ierse zee een sterke gradiënt van relatief lage (boven zee) naar relatief hoge (boven land) stikstofdepositie. Door deze scherpe grens kan de werkelijke stikstofdepositie in duingebieden sterk over- of onderschat worden.

De slaapmossen in de referentiegebieden met een lage tot matige stikstofdepositie (< 11 kg N/ha/j) laten wel een significant positief verband ($R^2 = 0,5$; $p < 0,001$) zien tussen de gemodelleerde depositie en het stikstofgehalte in mossen (figuur 2). Als alle gebieden worden samen genomen, is er ook een significant (logaritmisch) verband (figuur 4). In andere Europese datasets van slaapmossen in korte vegetaties in een brede depositie-range (vooral in het binnenland) werden vergelijkbare relaties gevonden, zoals in een studie van Meyer *et al.* (2015) met data uit Oostenrijk, Zwitserland, Duitsland,

Spanje, Finland, Frankrijk en Slovenië ($n=147$) uit de periode 1998 t/m 2013. Ook de dataset van de ICP Moss Survey van landen uit Noordwest- en Midden-Europa ($n=184$) uit de periode 2015 t/m 2017 (Frontasyeva *et al.*, 2020) laat een relatie zien die vergelijkbaar is met de recente metingen in duinen (figuur 4). Dit betekent dat de relatie van stikstofgehalten in slaapmossen met stikstofdepositie in duingraslanden vergelijkbaar is met die van korte vegetaties in het binnenland. Het stikstofgehalte in gewoon gaffeltandmos vertoont geen verband met de gemodelleerde stikstofdepositie (lineaire regressie: $R^2 = 0$; $p = 0,9$), ook niet bij een stikstofdepositie < 11 kg N/ha/j (figuur 2).

De stikstofgehalten in de rendiermossen vertonen een vrij sterke positieve lineaire regressie met de gemodelleerde depositie ($R^2 = 0,6$; $p < 0,01$). De regressielijn van de rendiermossen heeft wel een veel lager intercept (1,45 mg N/g) dan die van de slaapmossen uit de regio's met een relatief lage stikstofdepositie

Figuur 5 De relatie tussen gemeten ammoniakconcentraties in de lucht in de Nederlandse kustduinen en het stikstofgehalte van slaapmossen op deze locaties in 2020. De ammoniakconcentraties betreffen gemiddelde waarden van maandelijkse metingen van het Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden van RIVM uit de periode juli 2017 t/m januari 2020.

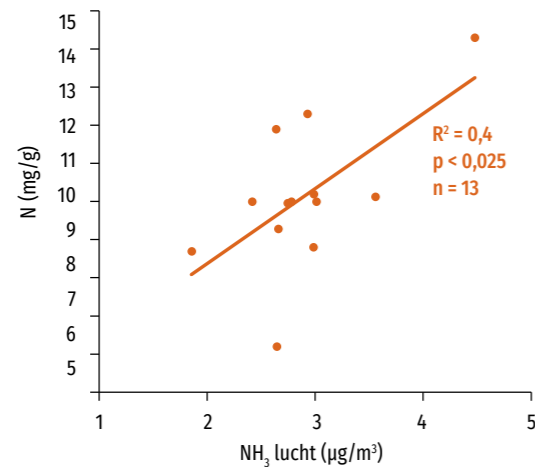


Figure 5 The relationship between measured ammonia concentrations in the air in the Dutch coastal dunes and nitrogen content of pleurocarp mosses on these locations in 2020. Ammonia concentrations are mean values of monthly measurements from July 2017 to January 2020 (MAN data RIVM).

(4,92 mg N/g). Rendiermossen zijn bemonsterd in een depositiebereik van < 11 kg N/ha/j, maar kunnen ook bij hogere stikstofdepositie voorkomen. Een totaal N-concentratie van 13 mg N/g wordt in het rendiermos *C. portentosa* als lethaal beschouwd (Söchting, 1995). Rendiermossen vormen dan vaak geen grote plakaten in de vegetatie en de soortendiversiteit van korstmossen is dan lager. Ammoniak heeft een veel sterker negatief effect op rendiermossen dan andere vormen van stikstofdepositie. In het algemeen is aangetoond dat gereduceerde stikstofverbindingen een sterker negatief effect op vegetatie hebben dan geoxideerde stikstofverbindingen (Smart *et al.*, 2004; Van den Berg *et al.*, 2008). In een langlopend veldexperiment in Schotland op Whim Bog vonden Sheppard *et al.* (2011) een veel sterker effect van droge ammoniak (NH₃) dan van natte ammonium (NH₄⁺) op *C. portentosa*, verschillende mossen (o.a. *Sphagnum*, *Hypnum*, *Campylopus*) en ericoïde dwergstruiken (*Calluna*, *Erica*, *Vaccinium*). Ammoniak kan een drie tot vijf keer sterker effect hebben op de vegetatie van veenecosystemen en epifytische korstmossen dan natte depositie van ammonium of nitraat (Sutton *et al.*,

2020). Ammoniak kan als gas direct via de huidmondjes de planten binnenkomen en verstoort hier fysiologische processen (Sheppard *et al.*, 2011; Sutton *et al.*, 2020). Veel korstmossoorten van voedselarme omstandigheden zijn dan ook extreem gevoelig voor hoge ammoniakconcentraties in de lucht. Negatieve effecten op de soortenrijkdom treden al op bij concentraties van 0,7 tot 3,1 µg NH₃/m³ (Greaver *et al.*, 2023). Vanaf een concentratie van 4 µg NH₃/m³ kan *C. portentosa*, de minst gevoelige en meest algemene soort van de rendiermossen, al na enkele jaren afsterven (Sheppard *et al.*, 2009). De ammoniakconcentratie zoals gemeten op de meetpunten in de Nederlandse duinen gedurende de jaren 2016 t/m 2018 vielen in het bereik waar allerlei negatieve effecten op gevoelige korstmossen kunnen optreden (mediaan: 2,7 µg NH₃/m³; 0,95-percentiel 4,0 µg NH₃/m³) (Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden van RIVM).

Stikstofgehalte in slaapmossen in relatie tot ammoniak-luchtconcentratie

Er is een significant, zwak positief verband gevonden tussen het stikstofgehalte in slaapmossen en de gemeten ammoniakconcentratie in de lucht (figuur 5). Er waren echter maar weinig meetpunten (n=13) waarop beide metingen gedaan zijn en locaties met veel hogere ammoniakconcentraties, die bijvoorbeeld in het binnenland van Nederland optreden, ontbraken. Dit is een belangrijk aandachtspunt voor vervolgonderzoek.

Stikstofkringloop in het ecosysteem

Op de meeste Nederlandse meetlocaties in droge duingraslanden is het stikstofgehalte in slaapmossen hoog, en binnen het bereik waarin verzadiging met stikstof optreedt in de biomassa. Omdat mossen in duingraslanden belangrijk zijn voor de primaire productie, kan een hoog stikstofgehalte in mossen een groot effect hebben op de nutriëntenhuishouding en

daarom ook op het functioneren en de kwaliteit van het ecosysteem. Uit onderzoek aan de stikstofhuishouding van duingraslanden in de Luchterduinen bleek dat de wortelbiomassa het belangrijkste compartiment is voor stikstof in biomassa en daarna de mosbiomassa (Aggenbach *et al.*, 2020). In mosgedomineerde vegetaties zal stikstof dus vooral via de mossen het ecosysteem binnenkomen. Afbraak van mosbiomassa zorgt dan voor het doorsluizen van stikstof naar de humushoudende bodemhorizont. In een langlopend experiment met toevoeging van het ¹⁵N-isotoop in de Lüneburger Heide (D) zijn over zeven jaar de concentraties van ¹⁵N in de verschillende compartimenten van de biomassa en bodemhorizonten onderzocht. Het grootste deel van het toegevoegde ¹⁵N werd eerst in het mos en na verloop van tijd ook in de humuslaag teruggevonden (Bähring *et al.*, 2017). De moslaag vormde samen met de humuslaag een belangrijke opslagplaats voor stikstofdepositie. Door de stikstofverzadiging van de moslaag in de Nederlandse duingraslanden kan meer minerale stikstof doordringen naar de bodem en daar het functioneren van micro-organismen beïnvloeden en de productiviteit van vaatplanten verhogen. Meer stikstof voor vaatplanten kan ook de soortensamenstelling beïnvloeden, o.a. meer grassen ten opzichte van kruiden (Kooijman *et al.*, 2017) en achteruitgang van stikstof-fixerende planten (Aggenbach *et al.*, 2017). Een vergelijking van het patroon van mineralisatie van duingraslanden in Nederland (met een hoge depositie) en Noordwest-Wales (met een lage depositie) laat zien dat in de bodemtoplaag van de Nederlandse duingraslanden per hoeveelheid gemineraliseerde koolstof twee tot drie keer zo veel stikstof gemineraliseerd is dan in Noordwest-Wales (Aggenbach *et al.*, 2020). Dit verschil in mineralisatiepatroon kan samenhangen met verschillen in nutriëntengehaltes, verhoudingen tussen nutriënten en organische componenten in mos- en wortelbiomassa.

Kritische depositiewaarden

Ons onderzoek laat zien dat de Nederlandse KDW's in het bereik liggen waar nog steeds sprake is van een stikstofverzadigd duingraslandecosysteem. Dit kan negatieve effecten hebben op de vegetatie en het functioneren van het ecosysteem als geheel, wat betekent dat de huidige KDW's nog te hoog zijn. Opvallend is dat de KDW's voor kalkrijke en kalkarme duingraslanden in Nederland recent zijn vastgesteld (respectievelijk 15 en 13 kg N/ha/j; Wamelink *et al.*, 2023) in het hoge bereik van de empirische range (5-15 kg N/ha/j), waarbinnen negatieve ecologische effecten zijn waargenomen (Bobbink *et al.*, 2022). Deze empirische range is recent geüpdatet op basis van een internationale review van het beschikbare empirisch onderzoek. De recente verhoging van de Nederlandse KDW voor kalkarme duingraslanden (van 10 naar 13 kg N/ha/j) is bovendien tegengesteld aan de verlaging van de ondergrens van de empirische range van de KDW van 8 naar 5 kg N/ha/j ten opzichte van de vorige vaststelling (Bobbink *et al.*, 2022; Tomassen *et al.*, 2023). De nieuwe KDW voor kalkarme duingraslanden houdt tevens weinig rekening met de grote gevoeligheid van dit habitatsubtype voor een verhoogde stikstofdepositie (Bobbink *et al.*, 2022). We pleiten er daarom voor om de huidige wetenschappelijk onderbouwde empirische kennis meer te laten meewegen in de vaststelling van de KDW's. Daarbij is van belang om ook (beschikbare) empirische kennis over het functioneren van specifieke habitats te gebruiken.

Toekomst

Biomonitoring van stikstofdepositie met algemeen voorkomende slaapmossen en korstmossen kan gebruikt worden om ruimtelijke patronen en trends in stikstofdepositie te traceren en daarmee depositie-modellen te kunnen valideren die nu worden gebruikt voor de onderbouwing en uitwerking van het stikstofbeleid. Bovendien geeft dergelijke monitoring inzicht

in de respons van (een deel van) het ecosysteem zelf. Een fijnmazig meetnet met slaapmossen en/of korstmossen kan een goede aanvulling zijn op het huidige meetnet voor stikstofdepositie, waarin maar op een beperkt aantal locaties kan worden gemeten. Daarnaast kunnen deze metingen gebruikt worden voor het valideren van verbeterde depositiemodellen die bijvoorbeeld meer rekening houden met de ruimtelijke patronen van aerodynamische ruwheid. Door het verzadigingseffect in slaapmossen in de Nederlandse situatie kunnen opgetreden verlagingen in stikstofdepositie echter pas getraceerd worden wanneer deze dalen onder 10-11 kg N/ha/j. Dit is in een bereik waar het beleid voor 2030 nog niet op gericht is, al is deze verlaging in enkele kustduinen op de Waddeneilanden inmiddels wel deels gerealiseerd.

Rendiermossen kunnen een alternatieve testsoortgroep vormen vanwege de sterke positieve relatie

Summary

Biomonitoring with dune mosses. High nitrogen levels indicate overload from deposition

Jeroen Geurts, Camiel Aggenbach, Eva Remke, Maxime Lemmens & Erik Sanz Mali

nitrogen deposition, biomonitoring, grey dunes, pleurocarps, lichens

This study examined the influence of nitrogen loads on dune grassland ecosystems by measuring nitrogen levels in mosses and lichens. Moss samples in Dutch and other Northwest European dune areas were collected in a range from relatively low to relatively high nitrogen deposition.

tussen stikstofdepositie en stikstofgehalte. Daarbij is wel validatie nodig tot in het bereik van de huidige stikstofdepositie, ook om eventuele stikstofverzadiging bij de huidige depositie uit te sluiten. Een optie is om naast rendiermossen ook andere algemene korstmossen te testen, zodat monitoring met korstmossen niet beperkt is tot kalkarme duingraslanden (waar rendiermossen voorkomen). Hierbij is het gewenst om de respons van het stikstofgehalte in de biomassa op de gemodelleerde, maar vooral ook op de lokaal gemeten stikstofdepositie te testen.

Op dit moment heeft de nationale overheid geen plannen voor zulke biomonitoring. Wanneer hier wel voor gekozen wordt, kan dit worden uitgevoerd in samenhang met het internationale Moss Survey programma van ICP Vegetation.

At most Dutch monitoring sites in dry dune grasslands, the nitrogen content in pleurocarp mosses is high and in the range where saturation with nitrogen occurs in the biomass due to high nitrogen deposition. This is one of the reasons why nitrogen content in mosses in Dutch dune grasslands currently has no clear relationship with modelled nitrogen deposition, whereas mosses and lichens in reference areas with a lower nitrogen deposition do show this relationship. It can be concluded that the current nitrogen deposition has a major impact on the nitrogen cycle in the vast majority of Dutch dune grasslands.

Literatuur

Aggenbach, C.J.S., Kooijman, A.M., Fujita, Y., Van der Hagen, H., Van Til, M., Cooper, D. & Jones, L. (2017). Does atmospheric nitrogen deposition lead to greater nitrogen and carbon accumulation in coastal sand dunes? *Biological Conservation* 212, 416-422.

Aggenbach, C.J.S., Fujita, Y., Jones, L., Kooijman, A.M. & Nanu, A. (2020). *Effectiveness of measures to mitigate high nitrogen deposition in dry habitats*. KWR. BTO-rapport 2020.024

Aggenbach, C.J.S. & Geurts, J.J.M. (2022). *Biomonitoring van atmosferische stikstofdepositie met mossen*. KWR. Rapport 2021.121

Bähring, A., Fichtner, A., Friedrich, U., Von Oheimb, G., & Härdtle, W. (2017). Bryophytes and organic layers control uptake of airborne nitrogen in low-N environments. *Frontiers in Plant Science* 8, 2080.

Bobbink, R., Loran, C. & Tomassen, H. (2022). *Review and revision of empirical critical loads of nitrogen for Europe*. Umweltbundesamt/German Environment Agency.

EMEP (2022). *Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidification and eutrophication components*. Joint MSC-W & CCC & CEIP & CIAM Report. EMEP Status Report 1/2022.

Frontasyeva, M., Harmens, H., Uzhinskiy, A. & Chaligava, O. (2020). *Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond*. Report of the ICP Vegetation Moss Survey. Coordination Centre, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation.

Greaver, T., McDow, S., Phelan, J., Kaylor, S.D., Herrick, J.D. & Jovan, S. (2023). Synthesis of lichen response to gaseous nitrogen: Ammonia versus nitrogen dioxide. *Atmospheric Environment* 292, 119396.

Harmens, H., Norris, D.A., Cooper, D.M., Mills, G., Steinnes, E., Kubin, E., ... Zechmeister, H.G. (2011). Nitrogen concentrations in mosses indicate the spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition in Europe. *Environmental Pollution* 159, 2852-2860.

Harmens, H., Schnyder, E., Thoni, L., Cooper D.M., Mills G., Leblond S., ... Hanus-Illnar, A. (2014). Relationship between site-specific nitrogen concentrations in mosses and measured wet bulk atmospheric nitrogen deposition across Europe. *Environmental Pollution* 194, 50-59.

Hoogerbrugge, R., Braam, M., Siteur, K., Jacobs, C., Hazelhorst, S., Stefess, G., ... Van Pul, A. (2023). *Uncertainty in the determined nitrogen deposition in the Netherlands*. Status report 2023. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. RIVM-rapport 2022-008.

Kooijman, A., Van Til, M., Noordijk, E., Kalbitz, K. & Remke, E.S. (2017). Nitrogen deposition and grass encroachment in calcareous and acidic Grey dunes (H2130) in NW-Europe. *Biological Conservation* 212, 406-415. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.009>

Meyer, M., Schröder, W., Nickel S., Leblond, S., Lindroos, A.J., Mohr, K., ... Thöni, L. (2015). Relevance of canopy drip for the accumulation of nitrogen in moss used as biomonitors for atmospheric nitrogen deposition in Europe. *Science of the Total Environment* 538, 600-610.

Pakeman, R.J., Alexander, J., Brooker, R., Cummins, R., Fielding, D., Gore, S., ... Orford, K. (2016). Long-term impacts of nitrogen deposition on coastal plant communities. *Environmental Pollution* 212, 337-347.

Remke, E.S., Brouwer, E., Kooijman, A., Blindow, I., Esselink, H. & Roelofs, J.G.M. (2009). Even low to medium nitrogen deposition impacts vegetation of dry, coastal dunes around the Baltic Sea. *Environmental Pollution*, 157 (3), 792-800. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.11.0>

Sheppard, L.J., Leith, I.D., Crossley, A., van Dijk, N., Cape, J.N., Fowler, D. & Sutton, M.A. (2009). Long-term cumulative exposure exacerbates the effects of atmospheric ammonia on an ombrotrophic bog: implications for critical levels. In: Sutton, M.A., Reis, S. & Baker, S.M.H. (Red.), *Atmospheric Ammonia: Detecting Emission Changes and Environmental Impacts* (pp. 49-58). Springer Netherlands.

Sheppard, L.J., Leith, I.D., Mizunuma, T., Cape, J.N., Crossley, A., Leeson, S., ... Fowler, D.A. (2011). Dry deposition of ammonia gas drives species change faster than wet deposition of ammonium ions. Evidence from a long-term field manipulation. *Global Change Biology* 17, 3589-3607.

Smart, S., Ashmore, M. R., Hornung, M., Scott, W.A., Fowler, D.A., Dragosits, U., ... Famulari, D. (2004). Detecting the signal of atmospheric N deposition in recent national-scale vegetation change across Britain. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 4, 269-278.

Søchting, U. (1995). Lichens as monitors of nitrogen deposition. *Cryptogamic Botany* 5, 264-269.

Sutton, M.A., Van Dijk, N., Levy, P.E., Jones, M.R., Leith, I.D., Sheppard, L.J., ... Wolseley, P.A. (2020). Alkaline air: Changing perspectives on nitrogen and air pollution in an ammonia-rich world. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 378. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0315>

Tomassen, H., van den Berg, L., Remke, E.S., Brouwer, E. & Bobbink, R. (2023). Veel habitattypen blijken nóg gevoeliger voor stikstof. *Vakblad Natuur, Bos en Landschap* 194, 6-19.

Van den Berg, L.J.L., Peters, C.J.H., Ashmore, M.R. & Roelofs, J.G.M. (2008). Reduced nitrogen has greater effect than oxidised nitrogen on dry heathland vegetation. *Environmental Pollution* 154, 359-369.

Van Dobben, H.F., Bobbink, R., Bal, D. & Van Hinsberg, A. (2012). *Overzicht van kritische depositiewaarden voor stikstof, toegepast op habitattypen en leefgebieden van Natura 2000-gebieden*. Alterra. Rapport 2397.

Voortman, B.R., Bartholomeus, R.P., van Bodegom, P.M., Gooren, H., Van der Zee, S.E. & Witte, J.P.M. (2013). Unsaturated hydraulic properties of xerophilous mosses: towards implementation of moss covered soils in hydrological models. *Hydrological Processes*, 28 (26), 6251-6264.

Wamelink, W., Van Dobben, H., Van der Zee, F., Van Hinsbergen, A. & Bobbink, R. (2023). *Overzicht van kritische depositiewaarden voor stikstof, toegepast op habitattypen en leefgebieden van Natura 2000; Herziening 2023*. Wageningen Environmental Research. Rapport 3272.