



Foto 1. In Nederland heeft de langdurige overschrijding van de critical load voor stikstof in heidesystemen geleid tot een dominantie van grassen ten koste van karakteristieke heidesoorten.

foto: Roland Bobbink

Veel habitattypen blijken nóg gevoeliger voor stikstof

De stikstofdepositie vormt een van de belangrijkste bedreigingen voor de biodiversiteit in Europese natuurgebieden. Om de gevoeligheid van habitats voor stikstof te bepalen, worden elk decennium de 'critical loads' (kritische depositiewaarden) proefondervindelijk vastgesteld. In de herfst van 2022 is het nieuwste rapport verschenen. Veel habitats blijken nog gevoeliger voor stikstof te zijn dan eerder werd aangenomen. Op basis van de Europese herziening zullen nog dit voorjaar de Nederlandse kritische depositiewaarden waar nodig worden bijgesteld. De herziening benadrukt het grote belang van het verminderen van de stikstoflast voor een groot aantal habitattypen.

— Hilde Tomassen (B-WARE), Leon van den Berg (Bosgroep Zuid Nederland), Eva Remke (B-WARE), Emiel Brouwer (B-WARE) & Roland Bobbink (B-WARE)

> Critical loads voor stikstof worden sinds eind jaren 80 van de vorige eeuw vastgesteld in het kader van het Verdrag betreffende grensoverschrijdende luchtverontreiniging over lange afstand (LRTAP) van de Europese Economische Commissie van de Verenigde Naties (UNECE). Een critical load is gedefinieerd als: de hoeveelheid atmosferische depositie van een stof die een ecosysteem over langere tijd verdragen kan zonder dat er, volgens de huidige stand van kennis, significante schade optreedt aan de structuur of het functioneren van het ecosysteem. Schade door stikstof kan op diverse manieren tot uiting komen, bijvoorbeeld door een verschuiving in de soortensamenstelling of zelfs soortenverlies (foto 1), maar ook door stikstofuitspoeling naar het grondwater of een verandering in de afbraak van organische stof in de bodem.

Methoden voor vaststelling critical loads

Over het algemeen zijn er twee methoden om de critical load voor stikstof vast te stellen: met de steady-state massabalans (SSMB) en de empirische (proefondervindelijke) methode. Recent is een derde methode toegevoegd: gradiëntstudies. Met SSMB wordt modelmatig vastgesteld tot op welk niveau de aan- en afvoer van stikstof in een ecosysteem nog in balans is. Wanneer een ecosysteem in onbalans raakt door een overmaat aan stikstof, zal dit systeem de stikstof niet meer volledig kunnen opnemen en stikstof gaan lekken en wordt de critical load dus overschreden. De complexe gevolgen van stikstofdepositie kunnen voor natuurlijke en half-natuurlijke ecosystemen niet eenduidig worden beschreven met SSMB-modellen, zodat voor deze ecosystemen vooral de empirische methode wordt toegepast. Bij de empirische methode wordt de critical load grotendeels gebaseerd op aantoonbare effecten van stikstof in veldexperimenten (foto 2), waarbij de toevoer van stikstof kunstmatig is verhoogd en soms verlaagd. Het is essentieel dat bij minimaal één behandeling alleen de toevoer van stikstof varieert, en er dus geen andere nutriënten wor-

De bandbreedte van een critical load is gebaseerd op:

- De toegepaste stikstofdosering. Wanneer bij bijvoorbeeld een totale stikstofdosering van 10 kg N/ha/jaar geen significante effecten ten opzichte van de controle zijn waargenomen en bij een dosering van 20 kg N/ha/jaar wel, dan ligt de critical load tussen 10 en 20 kg N/ha/jaar.
- De onzekerheid in gegevens over de achtergronddepositie in het veld.
- De bestaande ruimtelijke variatie die aanwezig is binnen een ecosysteemtype binnen Europa. Denk daarbij aan de hoeveelheid neerslag, hoogteligging, temperatuur, et cetera.

Van ieder vastgestelde critical load wordt de betrouwbaarheid als volgt gegeven:

- Deskundigenbeoordeling: als gegevens uit experimentele en/of gradiëntstudies over de effecten van stikstof ontbreken en de bandbreedte is gebaseerd op ecologische kennis in vergelijkbare ecosystemen.
- Vrij betrouwbaar: als er beperkt experimentele gegevens (en geen gradiëntstudies) beschikbaar zijn die een significant effect bij een bepaalde bandbreedte aantonen, of als er geen experimentele gegevens beschikbaar zijn maar een relevante gradiëntstudie een significant effect binnen een bepaalde bandbreedte heeft aangetoond.
- Betrouwbaar: als meerdere experimentele en gradiëntstudies significante stikstofeffecten binnen een bepaalde bandbreedte hebben aangetoond.

Voorbeelden

Voorbeeld van een veldexperiment met toediening van stikstof

In de periode 2012-2014 zijn op het eiland Fehmarn in de Oostzee de effecten van stikstof experimenteel onderzocht in duinheide (EUNIS N19, habitattype 2150; zie foto 3 voor een Nederlandse duinheide). Zes verschillende hoeveelheden stikstof (0 (controle); 2,5; 5; 10; 20 en 50 kg N/ha/jaar) werden toegediend. De scheutgroei van de struikheide was in het eerste jaar al aantoonbaar groter bij een stikstofgift vanaf 5 kg N/ha/jaar; een duidelijke indicatie dat in deze vegetatie de stikstof beperkt was. Vanaf het tweede jaar nam vanaf een stikstofgift van 5 kg N/ha/jaar de verhouding tussen koolstof en stikstof (C:N-ratio) in het weefsel van korstmossen (Cladonia-soorten) af. In het derde jaar werd vanaf een stikstofgift van 10 kg/ha/jaar een toename in de bedekking van grasachtigen (grassen, zeggen en russen) en een afname van mossen en korstmossen waargenomen. Dit komt bij een achtergronddepositie van 9 kg N/ha/jaar neer op aantoonbare effecten vanaf een totale stikstofdepositie van 14 kg N/ha/jaar. Op basis van dit vrij kortdurende experiment is de critical load voor duinheiden verlaagd van 10-20 naar 10-15 kg/ha/jaar, waarbij de betrouwbaarheid is aangepast naar vrij betrouwbaar (tabel 1). Dit ligt in de bandbreedte van de critical load voor droge binnenlandse heiden (5-15 kg N/ha/jaar), een natuurtipe waaraan veel onderzoek is gedaan naar de effecten van stikstof.

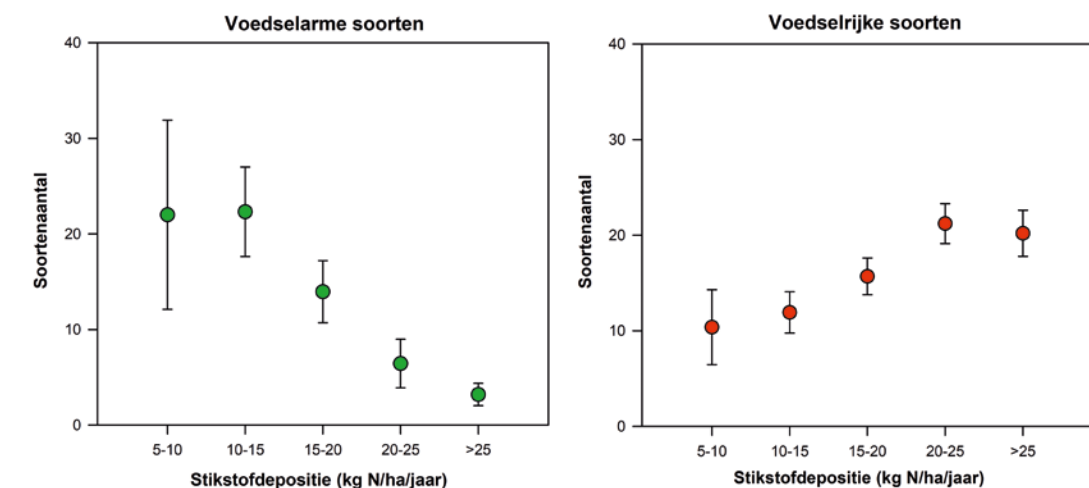
Voorbeeld van een gradiëntstudie

In Zwitserland zijn in een stikstofgradiënt (5-37 kg N/ha/jaar) de effecten van stikstof op montane graslanden (EUNIS R23; habitattype H6520) onderzocht. De critical load werd in 2011 op basis van een deskundigenbeoordeling vastgesteld op 10 à 20 kg N/ha/jaar. Uit de gradiëntstudie blijkt dat er rond een depositie van 15 kg N/ha/jaar een omslag plaatsvindt, waarbij karakteristieke voedselarme soorten worden vervangen door minder tot niet kenmerkende voedselrijke soorten (figuur 1). Mede op basis van deze gradiëntstudie is de bandbreedte van de critical load voor montane graslanden bijgesteld naar 10-15 kg/ha/jaar, waarbij de betrouwbaarheid is aangepast naar vrij betrouwbaar.



Foto 3. Het habitattype duinheiden met struikheide (EUNIS N19, habitattype 2150) in het Camperduin, onderdeel van het Natura 2000-gebied Schoorlse duinen.

foto: Eva Remke



Figuur 1. De soortenrijkdom van voedselarme (links) en voedselrijke (rechts) plantensoorten in Zwitserse bergachtige montane graslanden, over een gradiënt in stikstofdepositie van 5 tot en met 37 kg/ha/jaar. De stikstofdepositie is hierbij ingedeeld in vijf categorieën: van 5-10 kg N/ha/jaar tot en met meer dan 25 kg N/ha/jaar. De verticale lijnen geven het bereik aan waarbinnen 95% van de waarnemingen liggen. bron: Roth et al., Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013

den toegevoegd of een andere behandeling wordt uitgevoerd. Een andere belangrijke voorwaarde is dat de looptijd van het experiment voldoende is – langer dan twee jaar, maar bij voorkeur minimaal vier à vijf jaar – en dat het niveau van de behandelingen met stikstof niet extreem hoog is – maximaal 100 kg N/ha/jaar, bij voorkeur lager. Ook dient de achtergrondbelasting met stikstof bij de evaluatie van de experimenten meegenomen te worden. In de veldexperimenten gaat het er vooral om veranderingen in de vegetatiestructuur of in het functioneren van ecosystemen waar te nemen. De empirische critical loads worden niet uitgedrukt als een enkele waarde maar als een bandbreedte en van ieder critical load is de betrouwbaarheid beschreven (zie kader Bandbreedte van een critical load). De critical loads zijn opgesteld voor een groot aantal natuurlijke en half-natuurlijke ecosystemen en zijn ingedeeld volgens de meest recente Europese habitatclassificatie van het European Nature Information System (EUNIS). In gradiëntstudies wordt gekeken naar veranderingen in de soortensamenstelling, de structuur en/of het functioneren van ecosystemen over een gradiënt in stikstofdepositie. Doorgaans worden in deze studies de effecten van stikstof op een habitatype over een bepaalde periode en een relatief grote geografische schaal (bijvoorbeeld een land) bestudeerd. Deze geografische schaal bevat daarmee tevens een gradiënt in de mate van stikstofdepositie. Het grote voordeel van gradiëntstudies is dat ze informatie geven over de effecten van stikstof over een langere termijn van vaak meerdere decennia. Bovendien kunnen vaak ook effecten van zeer lage stikstofdeposities (dichtbij de oorspronkelijke achtergronddepositie) worden vastgesteld. Doordat binnen de gradiënten in stikstofdepositie ook andere belangrijke factoren voor de vegetatiestructuur en het functioneren van ecosystemen kunnen variëren zoals regenval, temperatuur, beheer en voorheen zwaveldepositie, moeten gradiëntstudies zorgvuldig worden opgezet en statistisch worden geëvalueerd.

Herziening van de critical loads

In de periode 2020-2022 heeft een team van 45 Europese stikstofdeskundigen gewerkt aan herziening van de critical loads uit 2011, op basis van wetenschappelijke studies in de periode 2010-eind 2021. Acht externe referenten hebben hun bevindingen op betrouwbaarheid en kwaliteit beoordeeld. De herziene critical loads zijn vervolgens door 37 deskundigen uit 12 landen tijdens een driedaagse UNECE-deskundigenbijeenkomst in Bern bediscussieerd. Op de slotdag zijn de herziene critical loads vastgesteld, waarna de UNECE deze in september 2022 in Genève officieel heeft vastgelegd. Een belangrijke verandering in de revisieronde is dat naast de uitkomsten van de stikstofbestingsexperimenten ook de uitkomsten van de gradiëntstudies zijn meegenomen (zie kader Voorbeelden). Vergeleken met de critical loads voor stikstof uit 2011 is circa 40 procent van de bandbreedtes herzien en vrijwel altijd naar beneden bijgesteld (zie kader Herzieningen). Voor een aantal habitattypen is voor het eerst een critical load opgesteld. In tabel 1 staan de herziene critical loads voor stikstof voor de in Nederland voorkomende EUNIS-habitattypen en de habitattypen volgens Bijlage I van de Habitatrichtlijn.

Hoe verder in de toekomst?

In Europa wordt nog uitgebreid en ook meer langlopend onderzoek naar de effecten van stikstof gedaan. Daarnaast kunnen dankzij de gradiëntstudies negatieve veranderingen in habitats al bij lagere depositieniveaus worden ontdekt. De studies zorgen hierdoor voor verdere aanscherping van de critical loads. Tegelijkertijd vergroot de toename van het aantal studies de betrouwbaarheid van de cijfers. Om de betrouwbaarheid van de critical loads verder te vergroten, vooral van de habitattypen met een deskundigenoordeel, zijn meer langlopende veldexperimenten van liefst tien jaar of langer met realistische stikstofgiften (tussen 5 en 50 kg N/ha/jaar) cruciaal in gebieden met lage achter-

Voor Nederland zijn de volgende herzieningen het meest relevant:

- Voor mariene habitats is de critical load voor de midden-lage en midden-hoge kwelders verlaagd van 20-30 naar 10-20 kg N/ha/jaar.
- In de kustduinen is voor de grijze duinen de ondergrens verlaagd van 8 naar 5 kg N/ha/jaar, voor duinheiden is de bovengrens verlaagd van 20 naar 15 kg N/ha/jaar en voor vochtige en natte duinvalleien is de critical load bijgesteld van 10-20 naar 5-15 kg N/ha/jaar.
- Voor zachtwatermeren is de ondergrens verhoogd van 3 naar 5 kg N/ha/jaar.
- Voor valleivenen, basenarme venen en overgangsvenen is de ondergrens verlaagd van 10 naar 5 kg N/ha/jaar en voor basenrijke venen is de bovengrens van de critical load verlaagd van 30 naar 25 kg N/ha/jaar.
- Voor diverse graslandtypen, waaronder kalkgraslanden, heischrale graslanden en vochtige schrale hooilanden is de boven- en/of ondergrens van de critical load naar beneden bijgesteld.
- De critical load voor zowel vochtige als droge heide is bijgesteld van 10-20 naar 5-15 kg N/ha/jaar.
- De critical load voor bladverliezende loofbossen is bijgesteld van 10-20 kg N/ha/jaar naar 10-15 kg N/ha/jaar.

gronddeposities. Gradiëntstudies zijn daarbij essentieel om de critical load op de lange termijn te verifiëren. Verder zijn er sterke aanwijzingen dat gereduceerd stikstof (NH₃) een groter effect heeft dan geoxideerd stikstof (NO_x), maar tot op heden is er onvoldoende kennis om voor beide vormen van stikstof afzonderlijk een critical load vast te stellen. Tenslotte heeft klimaatverandering waarschijnlijk invloed op de doorwerking van de stikstofdepositie in de natuur, maar kennis over deze interacties ontbreekt nog grotendeels.

Kritische depositiewaarde

In Nederland worden, gebaseerd op de Europese critical loads, kritische depositiewaarden (KDW's) opgesteld. Deze KDW's gaan niet uit van een bandbreedte maar van een enkele waarde, zodat eenduidiger bepaald kan worden of er wel of geen sprake is van een overschrijding. Met ecologische modelberekeningen zijn de KDW's voor alle stikstofgevoelige Natura 2000-habitattypen bepaald, waarbij de bandbreedtes van de empirische critical loads als randvoorwaarde zijn gebruikt. Op basis van de herziene critical loads uit 2022 worden in het voorjaar van 2023 de huidige KDW's herzien en gepubliceerd.<

h.tomassen@b-ware.eu

Voor de volledige rapportage met de herziene Europese critical loads: zie de website van het Coördinatiecentrum voor effecten (CCE): www.umweltbundesamt.de/publikationen/review-revisi-on-of-empirical-critical-loads-of

Tabel 1. Overzicht van de empirische critical loads voor stikstof (in kg/ha/jaar) voor natuurlijke en half-natuurlijke ecosystemen. Indeling habitattypen volgens zowel EUNIS-code als naar bijlage I van de Habitatrichtlijn. Critical load uit 2011 (CL 2011), herziene critical load uit 2022 (CL 2022) en de belangrijkste gevolgen, wanneer de critical load wordt overschreden. In deze tabel staan alleen in Nederland voorkomende habitattypen.

Veranderingen ten opzichte van 2011 zijn in **vet en rood** weergegeven. Betrouwbaarheid critical load: ## betrouwbaar; # vrij betrouwbaar en (#) deskundigenbeoordeling. * = voor de toepassing van de critical load voor dit habitatype gelden aanvullende voorwaarden (zie rapportage).

Type ecosysteem	EUNIS-code	Habitatype	CL 2011	CL 2022	Waargenomen verandering bij overschrijding critical load
MARIENE HABITATS (MA)					
Midden-lage en midden-hoge kwelders	MA223, MA224	1320, 1330	20-30 (#)	10-20 (#)	Toename van dominantie van grasachtigen; toename van soorten van latere successiestadia; afname van positieve indicatorsoorten
Pionier kwelders	MA225	1310	20-30 (#)	20-30 (#)	Toename van soorten van latere successiestadia; toename van de productie
KUSTDUINEN (N)					
Wandelende duinen (witte duinen)	N13, N14	2110, 2120	10-20 (#)	10-20 #	Toename van biomassa, toename van N-uitspoeling; afname wortelbiomassa
Duingraslanden (grijze duinen)	N15	2130	8-15 #	5-15 ##	Toename biomassa en bedekking grasachtigen en mesofiele kruidachtigen; afname oligotrofe soorten incl. korstmossen; toename N in weefsel; toename van N uitspoeling; bodemverzuring
Duinheiden	N18, N19	2140, 2150	10-20 (#)	10-15 #	Toename productiviteit vegetatie; toename N-uitspoeling; versnelde successie; afname C:N-ratio typische korstmossen, toename jaarlijkse groei Calluna
Vochtige en natte duinvalleien	N1H	2190	10-20 (#)	5-15 #	Toename bedekking van grasachtigen en mesofiele kruiden; afname van oligotrofe soorten; toename Ellenberg N
Open water in duinvalleien	N1H1, N1J1	2190	10-20 (#)	10-20 (#)	Toename biomassa en successiesnelheid
BINNENLANDSE WATEREN (C)*					
Zachtwater meren (en overige permanente oligotrofe wateren)	C1.1	3110, 3130	3-10 ##	5-10 ##	Verandering in de soortensamenstelling van waterplanten
Permanente dystrofe poelen en meren*	C1.4	3160	3-10 (#)	5-10 (#)	Verhoogde productiviteit van algen en verschuiving nutriëntenlimitatie fytoplankton van N naar P
HOOGVEEN, LAAGVEEN EN MOERAS (Q)					
Hoogvenen	Q1	7110	5-10 ##	5-10 ##	Toename van vaatplanten; afname van mossen; veranderde groei en soortensamenstelling van mossen; toename N in veen en veenwater
Valleivenen, basenarme venen en overgangsvenen	Q2	7140	10-15 #	5-15 ##	Toename van zeggesoorten en vaatplanten; negatieve effecten op mossen
Basenrijke venen	Q41-Q44	7230	15-30 (#)	15-25 #	Toename van hoog opgroeiende vaatplanten (vooral grasachtigen); afname van mossen
GRASLANDEN (R)					
Kalkgraslanden	R1A	6210	15-25 ##	10-20 ##	Toename van hoog opgroeiende grassen; afname van diversiteit; verandering in soortensamenstelling; versnelde mineralisatie; N-uitspoeling; verzuring toplaag
Soortenrijke heischrale graslanden	R1M	6230	10-15 ##	6-10 ##	Toename van grasachtigen; afname van typische soorten; afname van de totale soortenrijkdom
Stuifzandgraslanden	R1Q	2330	8-15 (#)	5-15 (#)	Afname van korstmossen; toename in biomassa
Laaggelegen schrale hooilanden	R22	6510	20-30 (#)	10-20 (#)	Toename van hoog opgroeiende grassen; afname van de diversiteit; afname van typische soorten
Vochtig en nat grasland met Molinia (blauwgraslanden)	R35	6410	15-25 (#)	15-25 (#)	Toename van hoge grasachtigen; afname diversiteit; afname van mossen
HEIDE, STRUIKGEWAS EN TUNDRA HABITATS (S)					
Noord-Atlantische vochtige heide met Erica tetralix*	S411	4010	10-20 (#)	5-15 ##	Overgang van heide- naar grasdominantie; afname van de heidebedekking; verschuiving in de samenstelling van de vegetatiegemeenschap
Droge Europese heide*	S42	4030, 2320	10-20 ##	5-15 ##	Overgang van heide- naar grasdominantie; afname van korstmossen; veranderingen in chemie van planten; toename gevoeligheid voor abiotische stress
BOSSEN (T)					
Bladverliezende loofbossen (niet boreaal)	T1	-	10-20 ##	10-15 ##	Veranderingen in bodemprocessen; nutriëntenonbalans; verandering samenstelling mycorrhiza en ondergroei
Beukenbossen	T17, T18	9110, 9120	10-20 (#)	10-15 (#)	Veranderingen in ondergroei en mycorrhiza; nutriëntenonbalans; veranderingen in de bodemfauna
Zure bossen met dominantie van Eik	T1B	9190, 91A0	10-15 (#)	10-15 (#)	Afname van mycorrhiza; verlies van epifytische korstmossen en mossen; verandering in de ondergroei
Meso- en eutrofe bossen met Eik, Haagbeuk, Es & Esdoorn	T1E	9160, 9170	15-20 (#)	15-20 (#)	Verandering in de ondergroei
Naaldbossen (niet boreaal)	T3	-	5-15 ##	3-15 ##	Verandering in bodemprocessen; nutriëntenonbalans; verandering samenstelling mycorrhiza en ondergroei; toename sterfte bij droogte
Grove dennenbossen	T35	-	5-15 #	5-15 #	Veranderingen in ondergroei en mycorrhiza; nutriëntenonbalans; verhoogde N ₂ O- en NO-emissies



Foto 2. Het langlopende stikstofadditie-experiment van het UK Centre for Ecology and Hydrology in Whim Bog (Schotland). Sinds 2002 worden verschillende vormen van stikstof (ammoniak, ammonium en nitraat) in verschillende doseringen toegevoegd in proefvlakken in vochtige heide op veen bij een achtergronddepositie van 8 kg N/ha/jaar.