

Effecten van veranderingen in atmosferische

Enorme oppervlakten heide en heischrale graslanden zijn gedurende de twintigste eeuw verdwenen. Naast ontginning is dit voornamelijk een gevolg van wateronttrekking en de toename van de zwavel- en stikstofaanvoer uit de atmosfeer (Heil & Diemont, 1983; Roelofs, 1986; Aerts & Berendse, 1983; de Graaf et al., 1994). De atmosferische stikstofdepositie bestaat echter uit verschillende componenten. De vraag is nu, welke componenten bepalend zijn voor verschuivingen in de vegetatie en wat de gevolgen zijn van veranderingen in de stikstofdepositie voor de heidevegetatie?

Stikstofdepositie

De atmosferische depositie van zwavel en stikstof in Nederland is sterk toegenomen in de 2e helft van de twintigste eeuw als gevolg van een sterke toename in landbouwactiviteiten en een toename in verstedelijking en de daarmee gepaard gaande industrialisering en toename van verkeer. In deze periode zijn veel karakteristieke plantensoorten van de heide en het heischrale milieu, bijvoorbeeld Valkruid (*Arnica montana*) of Rozenkransje (*Antennaria dioica*), achteruitgegaan of geheel verdwenen ten koste van snel groeiende soorten zoals de grassen Bochtige smele (*Deschampsia flexuosa*) en Pijpestrootje (*Molinia caerulea*). Lange tijd schreef men deze achteruitgang en vergrassing toe aan de verzurende effecten van de zwaveldepositie. Echter, sinds het begin van de jaren 80 van vorige eeuw weten we dat ook de stikstofdepositie een zeer belangrijke sturende factor is.

De totale stikstofdepositie bestaat uit een gereduceerde vorm (NH_x) en een geoxideerde vorm (NO_y). De gereduceerde vorm in gasvorm staat bekend als ammoniak (NH_3) en in opgeloste vorm als ammonium (NH_4^+). De depositie ervan is nauw gecorreleerd met de landbouw en in gebieden met veel agrarische activiteiten is de depositie van gereduceerd stikstof zeer hoog. Atmosferische depositie van de geoxideerde vorm (NO_y) is voornamelijk gecorreleerd met verkeer en industrie. Het

Leon van den Berg & Jan Roelofs

is dus vanzelfsprekend dat de verhoudingen in stikstofdepositie tussen gereduceerd en geoxideerd stikstof regionaal en internationaal sterk kunnen verschillen. In Nederland komt, door de aanwezigheid van intensive landbouw, de stikstofdepositie voornamelijk neer in de gereduceerde (ammoniak en ammonium) vorm.

Effecten van stikstofdepositie

De sterke toename van verzurende en vermestende stoffen in de atmosfeer heeft geleid tot een drastische afname van zowel de verzuring- en vermestingsgevoelige vennen als van het heide- en heischrale areaal in Nederland. Heide en heischrale milieus inclusief de bijbehorende vennen zijn van nature stikstof beperkt. De karakteristieke plantensoorten van deze vegetatietypen hebben zich hieraan aangepast. Met de toenemende stikstofdepositie zijn deze 'voedselarme' systemen echter verschoven van stikstof beperkte systemen naar systemen met een overvloed aan stikstof. Als gevolg daarvan verdwijnen veel soorten welke zijn aangepast aan voedselarme, stikstofarme condities en worden deze vervangen door veel algemenere, snelgroeiende soorten welke zijn aangepast aan hoge stikstof hoeveelheden, zoals de hierboven beschreven grassen. Naast een toename in de hoeveelheid voedingsstoffen vinden er nog meer veranderingen plaats als gevolg van de toenemende atmosferische stikstofdepositie. Deze

zijn voornamelijk (bio)chemisch van aard maar hebben directe gevolgen voor de flora en fauna. Stikstofdepositie tast de buffering van de bodem aan. In de bodem bevindt zich een voorraad basen welke gebonden is aan organische stof en kleimineralen. Door de aanvoer van verzurende stoffen worden deze basen, zoals calcium en magnesium, geleidelijk vervangen (gebufferd) door zuur en stikstof (voornamelijk ammonium). Dit proces wordt verlaging van de basenverzadiging genoemd. Bij een lage basenverzadiging kan zuur niet meer worden vervangen door basen, waardoor er geen buffering meer plaatsvindt, en er verzuring van de bodem optreedt. Tevens kunnen door de verlaagde basenverzadiging en de daarop volgende verzuring, giftige metalen zoals aluminium in oplossing gaan (Ulrich, 1991; Lamers et al., 1997). Daarnaast kan ammonium in de bodem zowel worden omgezet in nitraat (nitrificatie) door micro-organismen als worden opgenomen door planten. Bij beide processen komt zuur vrij. Deze verzuring heeft echter ook gevolgen voor de stikstofhuishouding in de bodem. De omzetting van gereduceerd stikstof (ammonium) naar geoxideerd stikstof (nitraat, NO_3^-) verloopt pas optimaal onder gebufferde en aërobe omstandigheden. Wanneer de pH daalt tot onder de 4,5 (door verzuring) wordt deze omzetting geremd (Schuurkes et al., 1988; Dorland et al., 2004) en zal de voorraad nitraat door opname en omzettingen langzaam uitge-



Foto 1. Opzet van een deel van een groot mesocosm-experiment in een kas. De bakken werden berekend met diverse $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ verhoudingen.

Inzet: een detail opname van een bak.

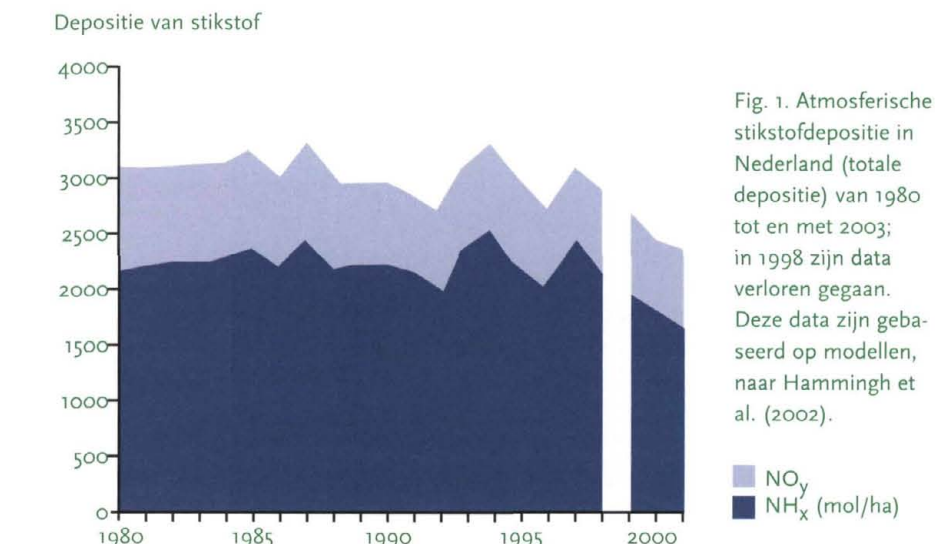
stikstofdepositie op Nederlandse heide

put raken. De voortgaande depositie van ammonium resulteert hierbij in een stijging van de ammoniumconcentraties en dus ook de ammonium/nitraat ratio (de Graaf et al., 1994).

Ammonium/nitraat verhoudingen

De verhoogde concentraties ammonium, de verhoogde ammonium/nitraat ratio, de toename van aluminium in de bodem en de verzuring van de bodem blijken nadelige gevolgen te hebben voor de groei van vele karakteristieke nitraatgebruikende soorten uit het heischrale milieu (de Graaf et al., 1994; van den Berg et al., 2003). Uit onderzoek blijkt dat ammonium in hoge concentraties giftig is voor veel doelsoorten van soortenrijke graslanden en heide, terwijl de algemene, snelgroeiende grassen juist zeer goed groeien op hoge concentraties ammonium (de Graaf et al., 1997; van den Berg et al., 2005). Daarnaast is gebleken dat de negatieve effecten van verhoogde ammoniumconcentraties op deze groei en verspreiding van de karakteristieke soorten versterkt worden in verzuurde situaties (Lucassen et al., 2003; van den Berg et al., 2005). De combinatie van hoge atmosferische depositie van gereduceerd stikstof (ammonium en ammoniak) en verzuring van de bodem blijkt dus meer negatieve gevolgen te hebben dan de atmosferische depositie van gereduceerd stikstof of verzuring alleen. Dit is een belangrijk gegeven met het oog op de herstelmaatregelen voor de Nederlandse heide.

In Nederland is de atmosferische stikstofdepositie zeer hoog. Het grootste deel daarvan is in de gereduceerde vorm. In de jaren tachtig van vorige eeuw was de totale stikstofdepositie op zijn hoogst. De laatste decennia is deze dankzij diverse maatregelen zoals het injecteren van mest gestaag aan het dalen. Echter omdat de maatregelen vooral effectief zijn toegepast in de landbouwsector is alleen de gereduceerde stikstofdepositie aan het dalen. Dit houdt in dat de verhouding van gereduceerd versus geoxideerd stikstof dat neerslaat in ons land aan het veranderen is; bestond de atmosferische stikstof depositie in de jaren tachtig nog voor bijna 90 procent uit gereduceerd stikstof, nu is dat 60 tot 70 pro-



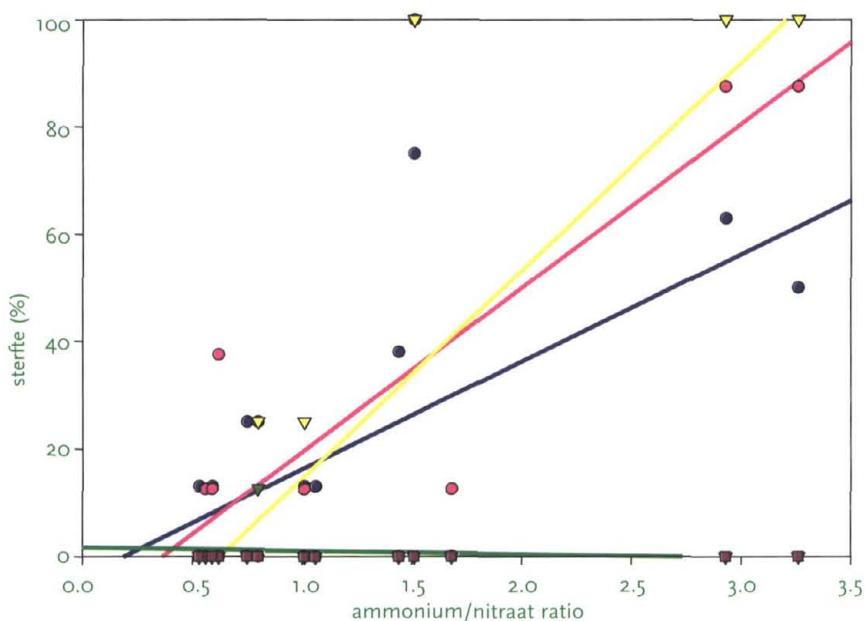
cent (fig. 1). Regionaal is de verhouding soms zelfs nog verder gedaald. Met het oog op de kansen voor herstel is dit goed nieuws! Onderzoek in kleine ecosystemen (foto 1) heeft aangetoond dat verschillende $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ verhoudingen in atmosferische depositie resulteerde in verschillende $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ verhoudingen in de bodem. Als een gevolg daarvan zijn er ook verschillen in groei en sterfte van doelsoorten en vergrassende soorten van soortenrijke heide. De resultaten laten duidelijk zien dat de sterfte van de doelsoorten Valkruid (*Arnica montana*), Rozenkransje (*Antennaria dioica*) en Klokjesgentiaan (*Gentiana pneumonanthe*) bij een toenemende $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio in de bodem omhoog gaat. Soorten als Bochtige smeile (*Deschampsia flexuosa*), Struikhei (*Calluna vulgaris*) en Borstelgras (*Nardus stricta*) vertonen geen significant effect of blijken zelfs helemaal niet dood te gaan als gevolg van verhoogde $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ verhoudingen (fig. 2).

Toekomstperspectief onder de huidige stikstofdepositie

Voornamelijk ammoniak en ammonium of een hoge $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio zijn verantwoordelijk voor de afname van doelsoorten en een toename van de vergrassing. Daar de zwaveldepositie sterk is teruggedrongen door zeer effectieve maatregelen

en de atmosferische depositie van gereduceerd stikstof nu aan het dalen is, valt een zeer sterke verzuring door atmosferische depositie nu niet meer te verwachten. Uit onderzoek is gebleken dat de pH en basenverzadiging van verzuurde heiden en vennen zeer goed te herstellen zijn door de heide of het inziggebied van de vennen te bekalken (Dorland et al., 2003). De effectiviteit van deze maatregel bleek zeer hoog en tenminste voor 15 jaar zichtbaar (Dorland et al., dit nummer). Wij verwachten dat, met de huidige atmosferische depositie verschuivingen, de duurzaamheid van een dergelijke maatregel alleen maar langer wordt en de maatregel mogelijk maar eenmalig hoeft te worden toegepast om de zuurlast uit het verleden te neutraliseren.

Andere maatregelen zoals het plaggen van de verzuurde heide hebben ook voordeel van het bekalken. In de eerste jaren na plaggen kan er een dramatische ophoping van ammonium worden waargenomen in een verzuurde heidebodem als deze niet wordt bekalkt (de Graaf et al., 1994; Dorland et al., 2003, 2004). Dit kan leiden tot een afname van het aantal doelsoorten en juist een verarming van de heide. In deze verzuurde situaties bleek een eenmalige bekalking voldoende voor het herstellen van de pH, de buffercapaciteit en de ammonium/nitraat balans in de bodem.



	r^2	F	p
● Klokjesgentiaan	0.377	7.249	0.020
● Rozenkransje	0.405	8.174	0.014
▼ Valkruid	0.614	19.291	0.001
▼ Borstelgras	0.025	0.303	0.592
■ Bochtige smeile		geen sterfte	
■ Struikhei		geen sterfte	

Fig. 2. Sterfte van Rozenkransje (*Antennaria dioica*), Klokjesgentiaan (*Gentiana pneumonanthe*), Valkruid (*Arnica montana*), Struikhei (*Calluna vulgaris*), Borstelgras (*Nardus stricta*) en Bochtige smeile (*Deschampsia flexuosa*) in relatie tot de ammonium/nitraat ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) ratio in de bodem.

Literatuur

- Aerts, R. & F. Berendse, 1988. The effect of increased nutrient availability on vegetation dynamics in wet heathlands. *Vegetatio* 76: 63 - 69.
- Berg, L.J.L. van den, P. Vergeer & J.G.M. Roelofs, 2003. Heathland restoration in The Netherlands: Effects of turf cutting depth on germination of *Arnica montana*. *Applied Vegetation Science* 6: 117 - 124.
- Berg, L.J.L. van den, E. Dorland, P. Vergeer, M.A.C. Hart, R. Bobbink & J.G.M. Roelofs, 2005. Decline of acid-sensitive species in heathlands can be attributed to ammonium toxicity in combination with low pH. *New Phytologist* 166 (2): 551 - 564.
- Dorland, E., L.J.L. van den Berg, R. Bobbink & J.G.M. Roelofs, 2003. Bekalking bij het herstel van gedegeneerde heiden en heischrale graslanden. *De Levende Natuur* 104 (4): 144 - 147.
- Dorland, E., L.J.L. van den Berg, A.J. van den Berg, M.L. Vermeer, J.G.M. Roelofs & R. Bobbink, 2004. The effects of sod cutting and additional liming on potential net nitrification in heathland soils. *Plant and Soil* 256: 267 - 277.
- Graaf, M.C.C. de, P.J.M. Verbeek, M.J.R. Cals & J.G.M. Roelofs, 1994. Effectgerichte maatregelen tegen verzuring en eutrofiëring van matig mineraalrijke heide en schraallanden. Eindrapport monitoringsprogramma eerste fase. Vakgroep Oecologie. Katholieke Universiteit Nijmegen.
- Graaf, M.C.C. de, R. Bobbink, P.J.M. Verbeek & J.G.M. Roelofs, 1997. Aluminium toxicity and tolerance in three heathland species. *Water, Air, and Soil Pollution* 98: 229 - 241.
- Hammingh, P. (ed.), J. Beck, P. van Breugel, E. Buijsman, H. Diederik, E. Noordijk,

- J. de Ruiter, J. Tromp, G. Velders & K. van Velze, 2002. Jaaroverzicht luchtkwaliteit 2001. RIVM rapport 725301009, RIVM Bilthoven.
- Heil, G.W. & W.H. Diemont, 1983. Raised nutrient levels change heathland into grassland. *Vegetatio* 53: 113 - 120.
- Lamers, L., M. de Graaf, R. Bobbink & J. Roelofs, 1997. Verzuring en eutrofiëring van blauwgraslanden. *De Levende Natuur* 98 (7): 246 - 252.
- Lucassen, E.C.H.E.T., R. Bobbink, A.J.P. Smolders, P.J.M. van der Ven, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2003. Interactive effects of low pH and high ammonium levels responsible for the decline of *Cirsium dissectum* (L.) Hill. *Plant Ecology* 165: 45 - 52.
- Roelofs, J.G.M., 1986. The effect of airborne sulphur and nitrogen deposition on aquatic and terrestrial heathland vegetation. *Experimentia* 42: 372 - 377.
- Schuurkes, J.A.A.R., J. Jansen & M. Maessen, 1988. Water acidification by addition of ammonium sulphate in sediment-water columns and in natural water. *Archiv für Hydrobiologie* 112(4): 495 - 516.
- Ulrich, B., 1991. An ecosystem approach to soil acidification. In: Ulrich, B. & M.E. Summers (eds). *Soil Acidity*: 28 - 79. Springer Verlag, Berlin.

Summary

Effects og changes in composition of the atmospheric nitrogen deposition on Dutch heathlands

One of the main threats on heathlands in The Netherlands in recent decades is the increased atmospheric deposition of nitrogen. The in-

crease in nitrogen deposition was suggested to be a strong determining factor in vegetation composition. However from recent experiments it became clear that the form of nitrogen deposited (reduced or oxidised) is of higher importance and that mainly the reduced form (NH_x) causes the decline of characteristic herbaceous species in heathlands and species-rich grasslands. Mechanisms for the effects of reduced nitrogen in the soil are discussed and related to the decline of sensitive species and the increase of more general species (mainly grasses).

Dankwoord

De auteurs willen de volgende mensen bedanken voor hun inzet tijdens het onderzoek: Roy Peters, Philippine Vergeer, Germa Verheggen en Martin Versteeg. Dit artikel komt voort uit het NWO Stimulerings Programma Biodiversiteit nr: 014.22.061.

Drs. L.J.L. van den Berg
Leerstoelgroep Aquatische Ecologie en Milieubiologie
Radboud Universiteit Nijmegen
Toernooiveld 1
6525 ED Nijmegen
e-mail: l.vandenberg@science.ru.nl

Prof.dr. J.G.M. Roelofs
Leerstoelgroep Aquatische Ecologie en Milieubiologie
Radboud Universiteit Nijmegen
Toernooiveld 1
6525 ED Nijmegen
e-mail: j.roelofs@science.ru.nl