

# Vijf decennia te veel stikstof: de effecten op heide en bos

stikstofdepositie  
droog zandlandschap  
bodemverzuring  
ammoniumophoping

De Nederlandse natuurgebieden staan al ruim 45 jaar onder zware druk van stikstofdepositie. Deze is sinds de jaren 1990 weliswaar met 30-50% teruggebracht, maar nog steeds aanzienlijk hoger dan verzurings- en vermistingsgevoelige natuurtypen in het zandlandschap kunnen verdragen. Omdat systematische bodem- en plantmeetnetten in Nederlandse Natura 2000-gebieden zijn gestopt is het onmogelijk om de geleidelijke veranderingen in de recente decennia te laten zien. In dit artikel proberen we met de beschikbare gegevens te beschrijven wat de gevolgen zijn van verhoogde stikstofdepositie op onze gevoelige heide- en bosbodems. De resultaten stemmen niet optimistisch.

**M. (Maaike) Weijters**  
Onderzoekcentrum B-WARE,  
Toernooiveld 1, 6525 ED  
Nijmegen;  
m.weijters@b-ware.eu

**R. (Roland) Bobbink**  
Onderzoekcentrum B-WARE

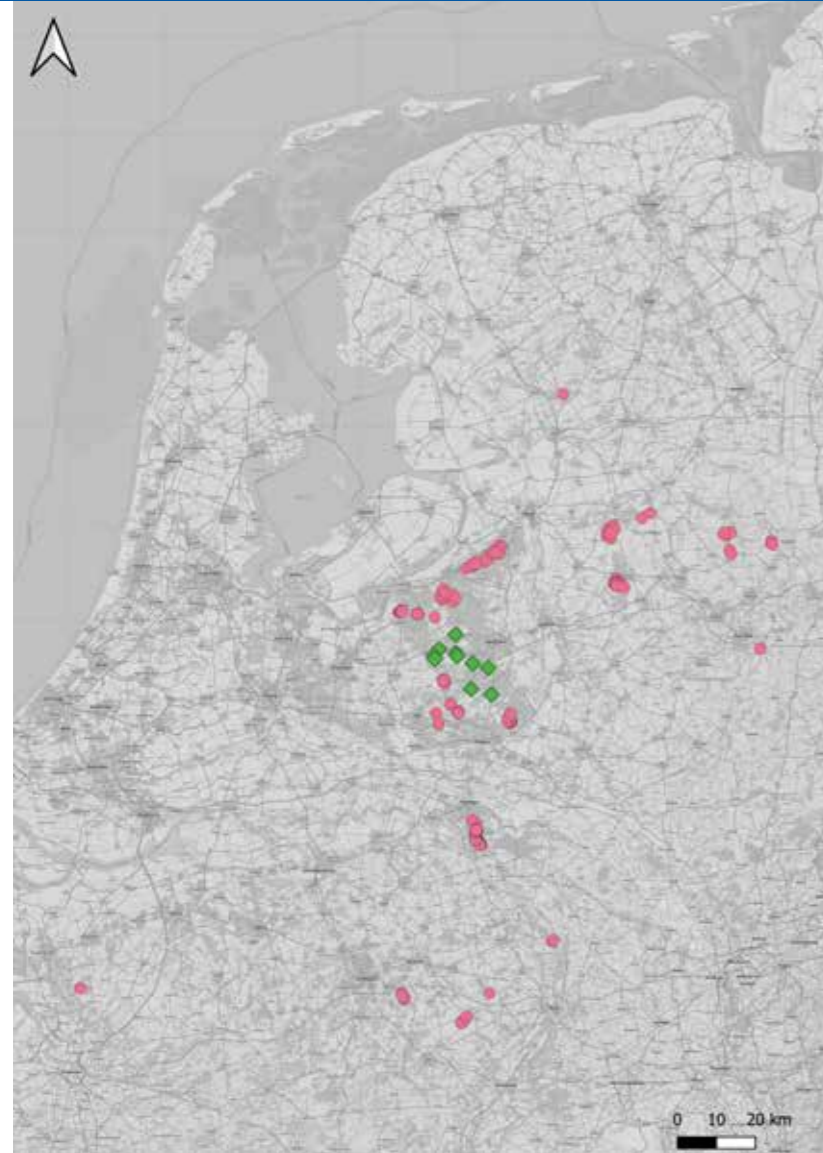
Dat een overmaat aan stikstof negatieve effecten heeft op natuur is al sinds de jaren 1980 bekend (o.a. Roelofs, 1986; Bobbink et al., 1998). Inmiddels zijn we ruim 40 jaar verder en is de uitstoot en neerslag van reactieve stikstofverbindingen ( $\text{NO}_x$  en  $\text{NH}_3$ ) weliswaar teruggedrongen, maar niet voldoende. De stikstofdepositie steeg sterk na de Tweede Wereldoorlog, tot de hoogste waarden in de jaren 1980 en begin jaren 1990. Vanaf 1993 tot het begin van deze eeuw is deze met 30-50% gedaald, maar sindsdien is de dalende trend gestagneerd (naar Noordijk, 2007 uit De Haan et al., 2008; Marra et al., 2023). In Nederland verloopt de depositiedaling van geoxideerd stikstof lineair (en zet nog altijd door), maar de depositie van gereduceerd stikstof daalt sinds 2005 niet meer en lijkt in de laatste tien tot vijftien jaar zelfs weer wat te stijgen (Marra et al., 2023). Gevolg is dat er nog steeds aanzienlijke ecologische schade optreedt. De effecten van een overmaat aan stikstof (N) zijn vijfledig (Bobbink, 2021):

1. Een verhoogde concentratie ammoniak in de lucht is al snel giftig voor organismen zoals korstmossen. De huidige ammoniakconcentraties gemeten in Ne-

derlandse Natura 2000-gebieden is voor veel korstmossen te hoog (Sutton et al., 2020).

2. De beschikbaarheid van stikstof in de bodem neemt toe, waardoor een verschuiving kan optreden in de concurrentie tussen plantensoorten. Hoog opgroeiende plantensoorten kunnen minder concurrentiekrachtige soorten overschaduwen en verdringen. Gevolg is dat er plantensoorten uit het Nederlandse zandlandschap verdwijnen en dat de structuur van de vegetatie steeds meer eenvormig wordt (Bobbink et al., 1998; Clark et al., 2007, Dise et al., 2011).
3. Bodemverzurende processen worden sterk versneld. Hierdoor kan de pH dalen, kunnen tekorten aan basische kationen zoals calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), kalium ( $\text{K}^+$ ) en magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ontstaan en kunnen giftige metalen zoals aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) vrijkomen (De Vries 2008; Bobbink et al., 2017).
4. De verhouding tussen ammonium en nitraat verandert, net als de opname van ammonium ten opzichte van nitraat door planten. Juist in het pleistocene zandlandschap van Nederland komen kenmerkende rodelijstsoorten voornamelijk voor op bodems met

Foto **Mark van Veen**.  
Weerter- en Budelerbergen  
in Limburg, een dekzand-  
rug met arme gronden  
waarop droge heide, den-  
nenbossen en stuifzanden  
aanwezig zijn.



**Figuur 1** Ligging van de 326 bemonsterde heidelocaties (H4030) (roze cirkels) en de tien bemonsterde oude eikenbossen (H9010) op de Veluwe (groene diamantjes).

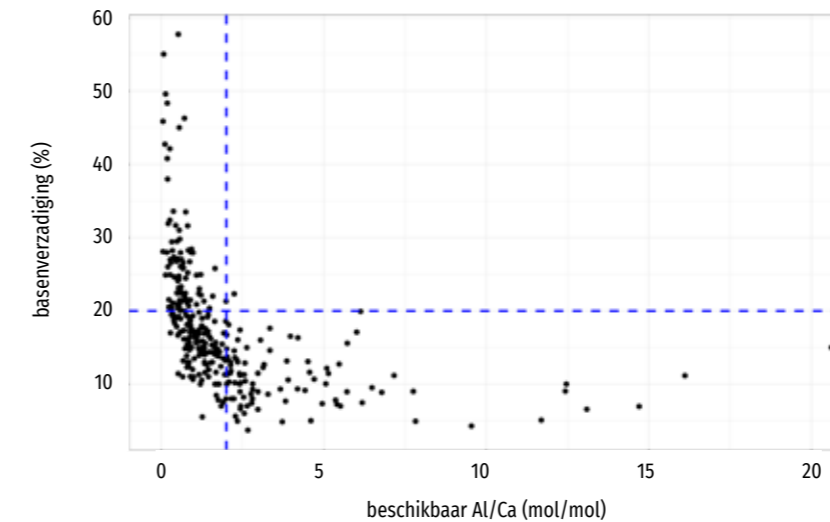
**Figure 1** Location of the 326 sampled dry heathland locations (H4030) (pink circles) and the ten sampled old oak forests (H9010) on the Veluwe (green diamonds).

met een lage ammonium-nitraatratio en/of lage ammoniumconcentraties (Kleijn et al., 2008; De Graaf et al., 2009).

- De beschikbaarheid van stikstof ten opzichte van andere voedingsstoffen, zoals fosfaat, calcium, kalium, magnesium en sporenelementen, verschuift. Naast directe gevolgen voor de vegetatie werken veranderingen in de verhoudingen van elementen ook door in het gehele voedselweb met negatieve effecten op de fauna (Vogels et al., 2023).

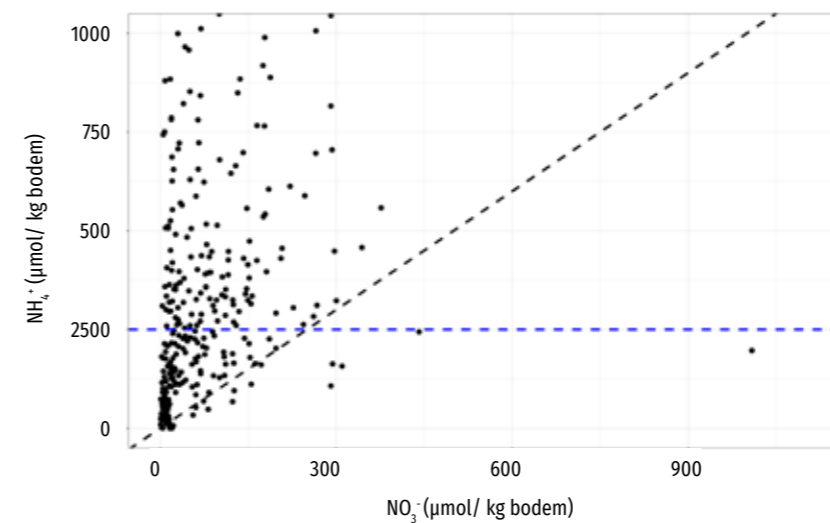
In bossen zorgt een toename van stikstofbeschikbaarheid in combinatie met bodemverzuring ervoor dat bomen meer gaan investeren in de groei van de kroon, en minder in wortels (Gao et al., 2023). In combinatie met hoge beschikbare aluminiumconcentraties zien we ook een ernstig negatief effect op de samenwerking van bomen met schimmels (ectomycorrhiza's). Deze twee factoren zorgen ervoor dat de bomen gevoeliger worden voor droogte, windval en tekorten aan andere voedingsstoffen (Braun et al., 2023). Voor de habitattypen droge heide (H4030), heischraal grasland (H6230), oude eikenbossen (H9120) en beuken-eikenbossen met hulst (H9190) gaat het om een oppervlak van ruim 19.000 ha (Bobbink et al., 2022), waarbij de droge loofbossen (LG 13), productiebossen en multifunctionele bossen nog niet eens zijn meegeteld. Langjarige monitoring van het voorkomen van kenmerkende planten en dieren laat zien dat te hoge stikstofdepositie in het heidelandschap heeft geleid tot een (sterke) afname van de kwaliteit van de Nederlandse natuur (WNE, 2020; 2023).

De hoeveelheid reactief stikstof die op een deel van onze Nederlandse natuurgebieden terecht komt is nog steeds te hoog, wat betekent dat een groot deel van de Nederlandse natuur nu al vier à vijf decennia te maken heeft met een te hoge druk van stikstofdepositie. Systematische bodem- en plantmeetnetten in Nederlandse Natura 2000-gebieden ontbreken, waardoor het niet



**Figuur 2** Gemeten Al/Ca-ratio afgezet tegen de basenverzadiging voor 326 bodemlocaties droge heide (H4030). Verticale blauwe stippellijn: Al/Ca-ratio 2 mol/mol; hierboven treedt schade op aan de vegetatie t.g.v. aluminiumtoxiciteit. Horizontale blauwe stippellijn: basenverzadiging van 20%; bij lagere percentages treedt verlies van soorten op.

**Figure 2** Measured Al/Ca ratio versus base saturation for 326 soil locations on dry heath lands (H4030). Vertical blue dotted line: Al/Ca ratio 2 mol/mol; above: damage occurs to vegetation due to aluminium toxicity. Horizontal blue dotted line: base saturation of 20%; loss of species occurs at lower percentages.



**Figuur 3** Concentratie nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ) afgezet tegen de concentratie ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) voor 326 bodemlocaties droge heide (H4030). Horizontale blauwe stippellijn: maximale concentratie  $\text{NH}_4^+$  gemeten in goed ontwikkelde droge heidevegetaties; zwarte schuine stippellijn: 1 op 1-lijn (erboven bevat de bodem meer  $\text{NH}_4^+$  dan  $\text{NO}_3^-$ ; eronder meer  $\text{NO}_3^-$  dan  $\text{NH}_4^+$ ).

**Figure 3** Concentration of nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) compared to the concentration of ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) for 326 soil locations on dry heath (H4030). Horizontal blue dotted line: maximum concentration of  $\text{NH}_4^+$ ; measured in well-developed dry heathland vegetation; black diagonal dotted line: 1 on 1 line (above the soil contains more  $\text{NH}_4^+$  than  $\text{NO}_3^-$ ; below it more  $\text{NO}_3^-$  than  $\text{NH}_4^+$ ).

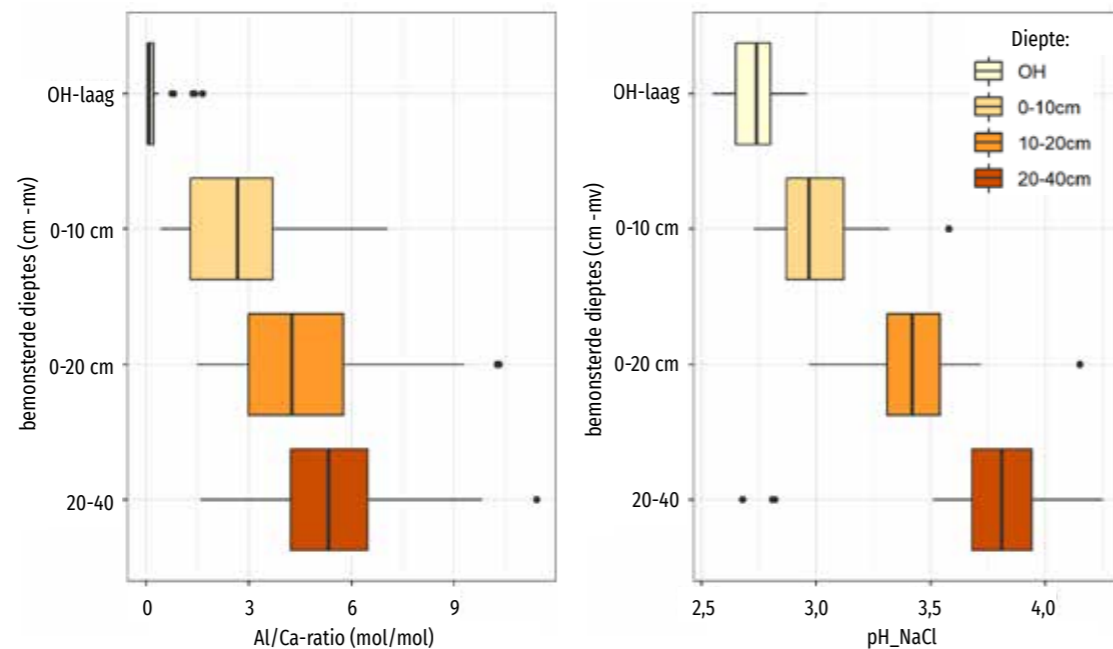
mogelijk is om geleidelijke veranderingen in de tijd te laten zien. In dit artikel proberen we met de beschikbare gegevens te beschrijven wat de gevolgen zijn van nog eens twintig jaar verhoogde stikstofdepositie op onze gevoelige heide- en bosbodems.

## Heide

Uit de database van Onderzoekcentrum B-WARE hebben we gegevens verzameld van de bodemchemie in droge, niet-vergraste heide (H4030), gemeten in de periode van 2014 tot eind 2021. Op ieder meetpunt zijn

**Figuur 4** Boxplots van de bodems verzameld in de 10 eikenboslocaties (H9190) op de Veluwe (n=30). Op de y-as de verschillende bemonsterde dieptes in cm onder maaiveld, waarbij de OH-laag (ook wel FH-laag) voor de strooisellaag staat minus het nog intacte, niet gefragmenteerde blad. De gekleurde vlakken geven het bereik aan waarin 50% van de waarnemingen valt, de verticale streep in deze vlakken geeft de mediane waarde. Links: Al/Ca-ratio gemeten in het zoutextract in mol/mol; rechts: pH gemeten in het zoutextract (0,2 M NaCl). Bron: Weijters et al., 2020.

monsters genomen van de bovenste 10 cm van de bodem (mengmonster van 3-5 steken met een bodemguts). Bodems die in het verleden agrarisch werden gebruikt of zijn geplagd of bekalkt zijn uit de selectie weggelaten. Dit leidde tot 326 heidemeetpunten verspreid over het Nederlandse zandgebied, onder meer verzameld in Nationaal Park de Hoge Veluwe (45 locaties), Strabrechtse heide (25 locaties), Harskamp (21 locaties), Veluwezoom (20 locaties) en Maasduinen (15 locaties) (figuur 1). De dataset is niet systematisch opgebouwd (het betreft geen gestandaardiseerd meetnet maar 'toevallige' metingen), maar omvat wel een groot deel van de Natura 2000-gebieden met droge heide. De gegevens werden in context geplaatst aan de hand van referentiewaarden uit de GRIP-database van B-WARE voor ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en de Al/Ca-ratio, gemeten in goed ontwikkelde droge heide (20Aa01b: *Genista anglica*-*Callunetum typicum*). De methodes van bemonstering en analyse staan



beschreven in o.a. Weijters et al., 2023.

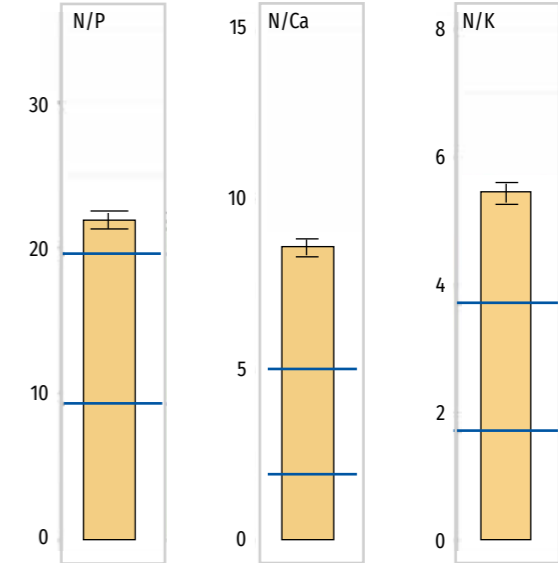
De twee belangrijkste effecten van een langdurige verhoogde stikstofdepositie op heidebodems zijn verzuring en vermesting. Een goede maat voor de mate van bodemverzuring is de verhouding tussen beschikbaar aluminium (Al) ten op zichte van beschikbaar calcium (Ca), de zogenaamde Al/Ca-ratio (figuur 2). In goed ontwikkelde droge heide is deze lager dan 2 mol/mol. In de 326 gemeten heidelocaties was deze hoger, gemiddeld 2,5, een teken dat er sprake is van uitspoeling van calcium en het in oplossing gaan van aluminium in de bodem. De variatie in de dataset was groot, met locaties met een zeer hoge Al/Ca-ratio, maar ook plekken waar deze goed op orde was.

Een tweede maat voor bodemverzuring is de mate waarin het adsorptiecomplex van bodems is bezet met basische kationen, protonen ( $\text{H}^+$ ) en aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ). Hoe hoger de bezetting met basische kationen, hoe

beter de bodem gebufferd is; zodra het adsorptiecomplex wordt opgeladen met  $\text{H}^+$  (en bij nog verdere bodemverzuring met  $\text{Al}^{3+}$ ) is dat een teken van bodemverzuring. In een heidebodem met een goed ontwikkelde vegetatie verwachten we dat minstens 20-25% van het complex bezet is door basische kationen. De gemiddelde basenverzadiging gemeten in deze dataset was met 17% aan de lage kant, en de variatie was groot (figuur 2). Toch werd in 60% van de waarnemingen een basenverzadiging lager dan 20% gemeten. Verder viel op dat de aluminium in meer dan de helft van de bemonsterde locaties meer dan 50% van de beschikbare bindingsplaatsen aan het adsorptiecomplex bezette. Dit is een duidelijk signaal dat buffering van inkomende zuren op een deel van de bodems voornamelijk verloopt via het in oplossing gaan van aluminium.

In de 326 bemonsterde locaties werd een gemiddelde nitraatconcentratie ( $\text{NO}_3^-$ ) van  $84 \mu\text{mol/kg}$  bodem gemeten, tegen een ammoniumconcentratie ( $\text{NH}_4^+$ ) van  $447 \mu\text{mol/l}$  bodem (figuur 3). Dat betekent dat ammonium veruit de dominante stikstofvorm is in de bemonsterde heidebodems. Op 70% van de bemonsterde locaties werd (veel) meer dan  $200 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{l}$  bodem gemeten. Ter vergelijking: De Graaf et al. (2009) vonden voor de periode 1985-2001 aanzienlijk lagere concentraties in droge heide (gemiddeld twee keer zo laag en in 90% van de waarnemingen lager dan  $131 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{kg}$  bodem) en in de GRIP-database van B-WARE houden we voor intacte droge heide een maximale waarde aan van  $200 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{kg}$  bodem. Vrijwel alle metingen liggen hier boven.

Op basis van deze gegevens kunnen we concluderen dat heidebodems op veel locaties in hoge mate verzuurd zijn, met hoge ammoniumconcentraties in een ongunstige verhouding ten opzichte van nitraat. Door deze combinatie van factoren kunnen veel kenmerkende heideplanten niet meer voorkomen.



**Figuur 5** N/P-ratio (links), N/Ca-ratio (midden) en N/K-ratio (rechts), alledrie in g/g drooggewicht, gemeten in eikenblad verzameld op 10 eikenboslocaties (H9190) op de Veluwe in 2020. n=30. Blauwe lijnen: onder- en bovengrens van de normale waarden gemeten in eik. (Bron: Mellert & Göttlein, 2012)

**Figure 5** N/P ratio (left), N/Ca ratio (middle) and N/K ratio (right), all three in g/g dry weight, measured in oak leaves collected at 10 oak forest locations (H9190) on the Veluwe in 2020. n=30. Blue lines: lower and upper limits of the normal values measured in oak (Source: Mellert & Göttlein, 2012)

## Eikenbossen

Oude eikenbossen zijn zeer gevoelig voor stikstofdepositie, waarbij net als in de heideverzuring en -vermesting een negatief effect hebben op de biodiversiteit. Daarbij veroorzaakt stikstofdepositie in bossen een sterke verschuiving in de verhouding tussen beschikbare voedingsstoffen (Krüger et al., 2020; Jonard et al., 2015). Oude eikenbossen komen vooral voor op de Veluwe. Sinds 2019 wordt een tiental Veluwe locaties met dit habitatype intensief gevolgd, waarbij de bodemchemie is bepaald in verschillende bodemlagen (Weijters et al., 2020). Uit deze metingen bleek dat de mediane pH-NaCl (n=33) rond de 2,8 lag in de eerste 10 cm, oplopend tot 3,8 in de laag van 20-40 cm onder maaiveld (figuur 4). De Al/Ca-ratio was hoog tot zeer hoog (figuur 4), en kwam in alle minerale bodemlagen boven de 2 mol/mol uit. Alleen in de organische FH-laag was de verhouding tussen beschikbaar aluminium en calcium niet schadelijk voor o.a. mycorrhiza-schimmels. Helaas zijn er geen

oude metingen in deze bossen van de Al/Ca-ratio, maar wel van de pH-KCl: vergeleken met de gegevens van Veluwe bossen uit de periode 1961-1972 (n=9, www.bodemdata.nl) bleek de pH gemeten in 2020 ruim 0,5 pH-eenheid lager te zijn. Niet alleen in de bovenlaag, maar ook op 20-40 cm diepte.

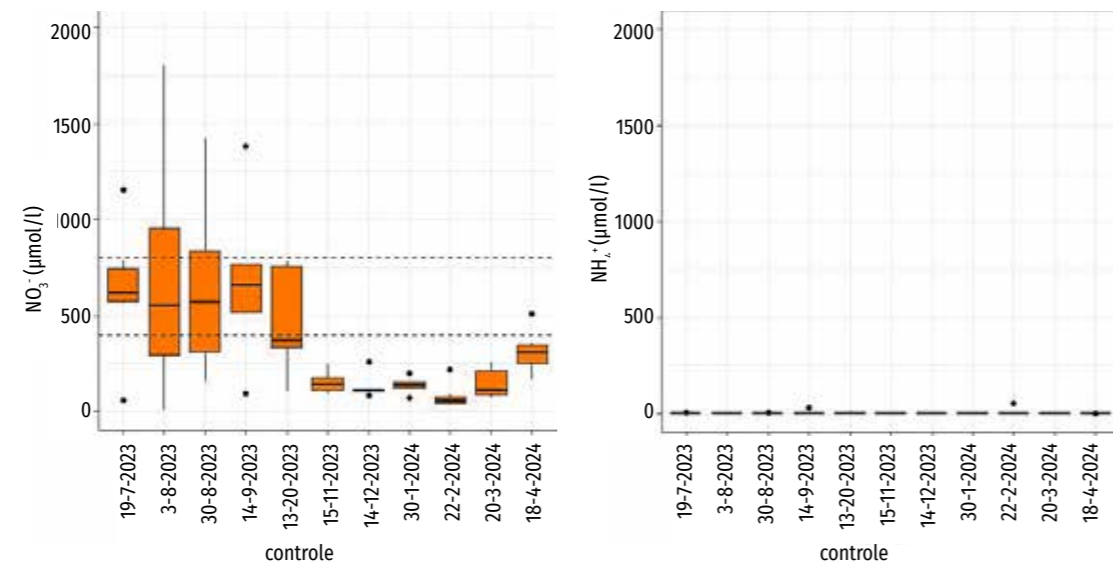
Naast bodemmonsters zijn in deze bossen in augustus 2020 ook bladeren van zomereiken verzameld (Weijters et al., 2020) en vergeleken met referentiewaarden (Mellert & Göttlein, 2012). Op vrijwel alle locaties werd in het verzamelde eikenblad een overschot gevonden aan stikstof ten opzichte van fosfor, calcium en kalium (figuur 5). Dit laat zien dat de bemonsterde eiken te maken hadden met een hoge mate van nutriëntenonbalans. In dezelfde eikenbossen (H9190) op de Veluwe wordt sinds medio 2023 de concentratie van ammonium en nitraat gemeten onder de wortelzone. In de periode van juli t/m oktober 2023 bevatte het verzamelde bodemvocht gemiddeld ongeveer 750  $\mu\text{mol NO}_3^-/\text{l}$  (figuur 6). Dit is een

ernstig signaal dat deze bossen sterk oververzadigd zijn met stikstof en in hoge mate stikstof 'lekken' naar het grondwater. Deze concentraties zijn hoger dan de streefwaarde voor nitraatconcentraties in het grondwater, maar liggen nog wel (net) onder de drinkwaternorm. Wat verder opvalt is dat er vrijwel geen ammonium in het bodemwater onder de wortelzone aanwezig is: alleen nitraat is mobiel en spoelt uit in het bodemsysteem. Hoogstwaarschijnlijk treedt er dus ondanks de ernstige verzuring toch nitrificatie op in deze bossen.

We kunnen concluderen dat er bij bosbodems sprake is van een sterk zure bodem die ook met stikstof verzadigd is. Hierdoor verdwijnen grote hoeveelheden nitraat naar het grondwater. De combinatie van een hoge stikstofbeschikbaarheid met een sterk zure bodem zorgt voor gebreksverschijnselen in de eikenbladeren. Daarnaast tonen deze gegevens aan dat de bodem ten opzichte van gegevens uit de periode 1961-1972 sterk is verzuurd.

**Figuur 6** Boxplots van de nitraatconcentratie (links) en ammoniumconcentratie (rechts) gemeten in het porievocht onder de wortelzone in zes oude eikenbossen (H9190) op de Veluwe in de periode van juni 2023 t/m april 2024. Bovenste stippellijn: drinkwaternorm van 50 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$ , onderste stippellijn: streefwaarde voor nitraat in grondwater (25 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$ ). Bron: Sitters et al., 2024.

**Figure 6** Box plots of the nitrate concentration (left) and ammonium concentration (right) measured in the pore water under the root zone in six old oak forests (H9190) on the Veluwe in the period from June 2023 to April 2024. Top dotted line: drinking water standard of 50 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$ , lower dotted line: target value for nitrate in groundwater (25 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$ ). Source: Sitters et al., 2024.



## Conclusies

Hoewel een langetermijnmeetnet van de bodem in Natura 2000-gebieden ontbreekt, geven recente meetgegevens wel een duidelijk beeld. Een groot deel van de Nederlandse heide- en bosbodems is sterk verrijkt met stikstof. In de heidebodems is de concentratie beschikbaar ammonium bijna twee keer hoger dan gemeten in goed ontwikkelde droge heide én sterk verhoogd in de laatste jaren. Onder bosbodems worden nitraatconcentraties gemeten die zelfs hoger of minimaal vergelijkbaar zijn met waarden die worden gemeten onder landbouwbodems. Daarnaast zijn er duidelijke signalen dat de bodem op veel plaatsen inkomende zuren buffert door het oplossen van aluminium. Hoge beschikbare aluminiumconcentraties in combinatie met (zeer) lage beschikbare calcium- en kaliumconcentraties zorgen voor problemen bij veel planten en dieren. De pH-metingen in de diepere bodemlagen onder bossen op de Veluwe suggereren dat bodemverzuring tot diep in de bodem effect heeft. Dit beeld is in lijn met de recent gepubliceerde hermeting in bosbodems door WEnR (De Jong et al., 2023 en De Vries et al., 2017), die ook duidelijk laten zien dat bosbodems sterk opgeladen zijn met stikstof en dat aluminium een steeds groter aandeel heeft in het bodemadsorptiecomplex vergeleken met de waarden in 1990.

Ook wordt steeds duidelijker dat het herstellen van deze verzuurde en met stikstof opgeladen bodems erg moeilijk is. Er wordt gezocht naar een balans tussen het toevoegen van bufferstoffen, het voorkomen van een versnelde afbraak van organisch materiaal (waardoor grote hoeveelheden stikstof vrij kunnen komen) en het behouden van een goede balans in de beschikbaarheid van verschillende elementen (stoichiometrie) (zie o.a. Weijters et al., 2023; Vogels et al., 2023). Daarnaast is de laatste jaren gebleken dat de grote hoeveelheden stikstof die zijn opgeslagen in organische bodemlagen als gevolg van droogte en warmte kunnen vrijkomen (Bob-



**Figuur 7** Hoog Buurlose Heide op de Veluwe. Foto: Martha de Jong-Lantink.

**Figure 7** Hoog Buurlose Heide with dry heathland. Photo: Martha de Jong-Lantink.

bink et al., 2019). De gegevens over de uitspoeling van nitraat onder heide- en bosbodems laten zien dat het stikstofprobleem zich niet beperkt tot de meest verzuringsgevoelige zandbodems: de overmaat aan nitraat spoelt uit naar het grondwater, waarna het problemen oplevert voor ons eigen drinkwater, en in natuurgebieden waar dit grondwater als kwel uittreedt.

In het kader van de bosherstelstrategie, de Natura 2000-instandhoudingsdoelstellingen en de breed gedragen zorg over het verlies aan biodiversiteit in het zandgebied varen we blind. Er zijn nauwelijks gestructureerde langetermijngegevens beschikbaar over de veranderingen die zijn opgetreden in de bodems, waardoor het niet mogelijk is om wat betreft verzuring en vermesting aan te geven of er sprake is van herstel of verslechtering (hoewel alle signalen wijzen op dat laatste). Herstelmaatregelen worden vaak gebaseerd op eenmalige

metingen. Het gebrek aan gestructureerde meetnetten maakt het daarbij ook erg moeilijk om de effecten van (herstel)maatregelen goed te monitoren en te duiden. De interactie tussen de gevolgen van stikstofdepositie in combinatie met een veranderend klimaat is zonder gestructureerde meetnetten niet te ontrafelen. De gegevens over de biodiversiteit in oude loofbossen en heides spreken boekdelen (WNF, 2023): het gaat niet goed! Het is moeilijk te begrijpen dat er de laatste twintig jaar geen gestructureerde monitoring naar

de effecten van stikstofdepositie op de bodem heeft plaatsgevonden, terwijl de effecten van een (veel) te hoge stikstofdepositie op de natuur al ruim veertig jaar bekend zijn. Uit deze gegevens van het zandlandschap blijkt dat de degradatie zeer ernstig is en dat het noodzakelijk is om de stikstofdepositie op korte termijn drastisch te verlagen. Zo niet dan zal de aantasting van bos en heidehabitats op zandbodems op korte termijn onherstelbaar zijn - op sommige plekken is dat wellicht al zo.

## Summary

### Over five decades of excess nitrogen: the effects on heathland and woodland

Maaïke Weijters & Roland Bobbink

[nitrogen deposition](#), [dry sandy landscape](#), [soil acidification](#), [ammonium accumulation](#)

Dutch nature reserves have been under severe pressure from nitrogen deposition for five decades. Although nitrogen deposition has been reduced by 30-50% since the 1990's, it is still considerably higher than acidification- and eutrophication-sensitive nature types in the sandy landscape can tolerate. This article makes clear that there are now very high

ammonium concentrations in the heathland soils, large cation deficiencies and nutrient imbalances in the trees, strong leaching of nitrate from the forest soils, and that incoming acids in the soil are increasingly buffered by dissolving aluminium. These soil changes negatively affect biodiversity in the sandy landscape.

## Literatuur

**Bobbink, R., Bergsma, H.L.T., Den Ouden, J. & Weijters, M.L. (2017).** Bodemverzuring in droog zandlandschap: na het zuur geen zoek? *Landschap* 34(2), 61-69.

**Bobbink, R. (2021).** *Effecten van stikstofdepositie nu en in 2030: een analyse.* Onderzoekcentrum B-WARE. Rapport RP-20.135.21.35.

**Bobbink, R., Loeb, R., Bijlsma R-J. & Van Delft, B. (2019).** Doet extreme droogte stikstofbom in droge heide barsten? *Vakblad Natuur Bos en Landschap* 160, 3-6.

**Bobbink, R., Van Dijk, G., Remke, E. & Tomassen, H. (2022).** *Herstelbaarheid van door stikstofdepositie aangetaste Natura 2000-habitattypen: een overzicht.* Onderzoekcentrum B-WARE. Rapport RP-21.117.21.95.

**Bobbink, R., Hornung, M. & Roelofs, J.G.M. (1998).** Essay review: The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural vegetation. *Journal of Ecology* 86, 717-738.

**Bodemdata.nl (z.d.)** Bodemprofielen. Geraadpleegd in mei 2024 via <https://bodemdata.nl/bodemprofielen>.

**Braun, S., Rihm, B., Tresch, S. & Schindler, C. (2023).** Longterm risk assessment of uprooting and stem breakage under drought conditions and at high N deposition in beech and Norway spruce. *Agricultural and Forest Meteorology* 341, 109669.

**Clark, C., Cleland, E.E., Collins, S.C., Fargione, J., Gough, L., Gross, K.L., ... Grace, J. (2007).** Environmental and plant community determinants of species loss following nitrogen enrichment. *Ecology Letters* 10, 596-607.

**De Haan, B.J., Kros, J., Bobbink, R., Van Jaarsveld, J.A., De Vries, W. & Noordijk, H. (2008).** *Ammoniak in Nederland.* Planbureau voor de leefomgeving. Rapport 500125003.

**De Vries, W. (2008).** *Verzuring: oorzaken, effecten, kritische belastingen en monitoring van de gevolgen van ingezet beleid.* Alterra. Rapport 1699.

**De Vries, W., Bolhuis, P., Van de Burg, A. & Bobbink, R. (2017).** Doorlopende verzuring van bosbodems - oorzaken en gevolgen voor het bosecosysteem. *Vakblad Natuur Bos en Landschap* 14(137), 32-35.

**Dise, N.B., Ashmore, M. & Belyazid, S. (2011).** Nitrogen as a threat to European terrestrial biodiversity. In: Sutton, M.A., Howard, C.M., Erismann, J.W. et al. (Red.), *The European Nitrogen Assessment.* Cambridge University Press.

**Gao, W., Chen, D., Hu, X., Fang, X., Li, Q., Huang, Q., ... Liu, L. (2023).** Nitrogen deposition drives the intricate changes of fine root traits. *Global Ecology and Conservation* 43, e02443.

**De Graaf, M.C.C., Bobbink, R., Smits, N.A.C., Van Diggelen R. & Roelofs, J.G.M. (2009).** Biodiversity, vegetation gradients and key biogeochemical processes in the heathland landscape. *Biological Conservation* 142(10), 2191-2201.

**De Jong, A., Van Delft, S., Hendriks, C. (2023).** *Koolstof en nutriënten in bosbodems: resultaten bemonstering 2020-2021.* Wageningen Environmentaal Research. Rapport 3265.

**Jonard, M., Fürst, A., Verstraeten, A., Thimonier, A., Timmermann, V., Potočić, N., ... Rautio, P. (2015).** Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology* 21(1), 418-430.

**Kleijn, D., Bekker, R.M., Bobbink, R., De Graaf, M.C.C. & Roelofs, J.G.M. (2008).** In search for key biochemical factors affecting plant species persistence in heathlands and acidic grasslands: a comparison of common and rare species. *Journal of Applied Ecology* 45, 680-687.

**Krüger, I., Sanders, T.G.M., Potočić, N., Ukonmaaho, L. & Rautio, P. (2020).** *Increased evidence of nutrient imbalances in forest trees across Europe* (ICP Forests Brief No. 4). Programme Co-ordinating Centre of ICP Forests, Thünen Institute of Forest Ecosystems.

**Marra, W.A., Hazelhorst, S.B., Brandt, K.M.F., Wichink Kruit, R.J., Schram, J.M. & De Jongh, L.A. (2023).** *Monitor stikstofdepositie in Natura 2000-gebieden. Monitoring van de Wet stikstofreductie en natuurverbetering.* Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). Rapport 2023-0239.

**Mellert, K.H. & Göttlein, A. (2012).** Comparison of new foliar nutrient thresholds derived from van den Burg's literature compilation with established central European references. *European Journal of Forest Research* 131, 1461-1472.

**Roelofs, J.C.M. (1986).** The effect of airborne sulphur and nitrogen deposition on aquatic and terrestrial heathland vegetation. *Experientia* 42: 372-377.

**Sitters, J., Weijters, M., Van Pul, D., Bobbink, R., Bruggink, J., Petersdorf, M., ... Scherpenisse, M. (2024).** *Steenmeeltrials voor herstel van oude eikenbossen op arme zandgronden (H9190).* Voortgangsrapportage. Onderzoekcentrum B-WARE in opdracht van de provincie Gelderland. Rapport 20.172B.24.11

**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* 378, 2183.

**Vogels, J.J., Van de Waal, D.B., WallisDeVries, M.F., Van den Burg, A.B., Nijssen, M., Bobbink, R., ... Siepel, H. (2023).** Towards a mechanistic understanding of the impacts of nitrogen deposition on producer-consumer interactions. *Biological Reviews* 98, 1712-1731.

**Weijters, M., Bohnen-Verbaarschot, E., Vogels, J., Smits, L., Van de Riet, B., Siepel, H., ... Bobbink, R. (2023).** *Herstel van vochtige heide door middel van silicaatmineralen (steenmeel).* Resultaten van negen jaar steenmeelonderzoek. Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE). Rapport OBN-2019-109-DZ

**Weijters, M., Bobbink, R. & Siepel, H. (2020).** *Selectie en uitzetten steenmeeltrials voor herstel van Oude Eikenbossen op arme zandgronden (H9190).* Onderzoekcentrum B-WARE. Rapport RP-19.167.20.56

**WNF (2020).** *Living Planet Report Nederland. Natuur en landbouw verbonden.* Wereld Natuur Fonds.

**WNF (2023).** *Living Planet Report Nederland. Kiezen voor natuurherstel.* Wereld Natuur Fonds (WWF-NL).