

PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/179084>

Please be advised that this information was generated on 2019-12-14 and may be subject to change.



Na het zuur geen zoet?

Bodemverzuring in droog zandlandschap blijvend probleem

Dit artikel vat de huidige stand van de kennis samen over de gevolgen van hoge stikstofdepositie op de bodem van het droog zandlandschap en beschrijft mogelijke of nog te ontwikkelen herstelmaatregelen. Daarvoor worden eerst de processen van bodembuffering en -verzuring beschreven, aangezien begrip daarvan essentieel is om tot duurzaam herstel van kenmerkende biodiversiteit te komen.

In Nederland zijn veel natuurterreinen in het droog zandlandschap aangetast door verzuring en vermesing als gevolg van atmosferische depositie van stikstof (N) en voorheen zwavelverbindingen (S), met negatieve gevolgen voor de biodiversiteit, zie ook Siebel & Bobbink (dit nummer). Bij stijgende toevoer van N via depositie neemt de N-beschikbaarheid en daarmee de groei van planten in de veelal nutriëntenarme systemen zoals heide geleidelijk toe. Ook de soortensamenstelling verandert doordat concurrentiekrachtige planten gaan overheersen ten koste van laag bij de grond groeiende soorten. Vergrassing en verbraming zijn – of deels waren – dan ook schering en inslag in veel heide- en bosgebieden. Ook zijn de bossen op droge zandgronden vaak verzadigd geraakt met stikstof, wat heeft geleid tot verhoogde uitspoeling van nitraat naar het grondwater. Voor een gedetailleerd overzicht van de complexe effecten van N-depositie op natuur wordt verder verwezen naar Bobbink *et al.* (2014). Naast de vermesende effecten van N-depositie speelt de voortschrijdende bodemverzuring een doorslaggevende rol bij de achteruitgang van planten en dieren in het droog zandlandschap.

Bodembuffering en -verzuring

Er is een aantal mechanismen waarmee in bodems de toevoer van verzurende stoffen gebufferd en/of geneutraliseerd wordt. Deze buffering is afhankelijk van het uitgangsmateriaal (het type bodem) en de aanwezigheid van toestromend grondwater. In het droog zand-

landschap is het laatste niet van belang, en aangezien de droge binnenlandse zandgronden geen kalk bevatten, zijn de volgende buffermechanismen bepalend voor het verloop van verzuring.

Allereerst is dat de kationenuitwisseling door het bodemadsorptiecomplex. Dit complex bestaat uit kleimineralen en/of organische bestanddelen die aan de buitenkant negatief geladen zijn, waardoor basische kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ & Na^+) aan dit complex geadsorbeerd zijn. Wanneer er extra zuur (H^+) in de bodem komt, dan kunnen de H^+ -ionen de kationen van het complex verdringen waardoor ze vervolgens in de bodemoplossing terecht komen. Omdat de H^+ -ionen dan zelf aan het complex geadsorbeerd zijn en niet meer in oplossing, verandert de pH niet (=buffering). Kationenuitwisseling is een snelopend bufferproces, maar de capaciteit is tamelijk beperkt. De term ‘basenverzadiging’ wordt gebruikt om aan te geven hoeveel procent van het adsorptiecomplex van de bodem bezet is met basische kationen.

Een reactie die op de achtergrond verloopt is de neutralisatie van zuur door de verwerking van silicaatmineralen. Primaire silicaatmineralen worden afgebroken waarbij zich bij een pH groter dan 4,5 kleimineralen vormen (zie kader). Dit proces wordt sterk versneld door extra toevoer van zuur. Door de lage verwerkingssnelheid draagt dit mechanisme normaliter maar in geringe mate bij aan de actuele buffering in de bodem, maar het is essentieel voor het “opladen” van het adsorptiecomplex met basi-

Dr. R. (Roland) Bobbink

Onderzoekcentrum
B-WARE, Toernooiveld
1, 6525 ED Nijmegen
r.bobbink@b-ware.eu

Drs. H.L.T. (Huig) Bergsma

BodemBergsma

Dr. Ir. J. (Jan) den Ouden

Wageningen
Universiteit & Research

Drs. M.J. (Maaike) Weijters

Onderzoekcentrum
B-WARE

Foto Maaike Weijters
februari 2016, opbrengen van steenmeel in het Mastbos bij Breda in het kader van het juist gestarte OBN-onderzoek naar herstel van droge loofbossen.

sche kationen en dus voor het herstel van buffercapaciteit via kationuitwisseling.

Onder een pH van 4,5 vindt dit proces van vorming van secundaire kleimineralen (met Al) niet meer plaats maar wordt vrij Al³⁺ gevormd. Net als H⁺ kan ook Al³⁺ gebonden worden aan het bodemcomplex, maar dit proces kan de toename in Al³⁺ in de bodemoplossing niet verhinderen. Dit Al³⁺ is toxisch voor veel planten- en diersoorten. Bij zeer lage pH-waarden (<3,0) gaan ijzerverbindingen een dominerende rol spelen bij de bodembuffering en kan er (zeer) veel Fe³⁺ – toxisch voor veel planten – in oplossing komen (Bobbink et al., 2014).

Gevolgen van bodemverzuring

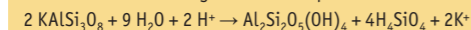
Tijdens bodemverzuring vinden allerlei omzettingen in de bodem plaats, waarbij naast afname van de buffercapaciteit en van de pH ook allerlei kationen vrij in oplos-

sing kunnen komen. Omdat in Nederland de jaarlijkse neerslag groter is dan de verdamping treedt er gemiddeld over het jaar een neerwaarts transport van water op waardoor deze kationen, en ook mobiele anionen zoals SO₄²⁻, NO₃⁻ en/of organische zuurresten, uitspoelen naar diepere lagen of naar het grondwater. Bodemverzuring kan de aard van een ecosysteem en daarmee de biodiversiteit ernstig aantasten: de pH kan flink dalen, tekorten aan basische kationen kunnen ontstaan en toxische metalen, vooral Al³⁺, komen vrij. Tevens kan door daling van de pH (< 4,5) de nitrificatie steeds meer gemerd raken, waardoor ammonium de dominante vorm van stikstof in de bodem wordt. Omdat veel planten- en diersoorten de combinatie van lage pH en hoge concentraties aan vrij Al³⁺ en NH₄⁺ niet verdragen, leidt verzuring bijna altijd tot een verlies van soorten (Bobbink et al., 2014).

Ten slotte kan ook de afbraaksnelheid van organisch

De minerale motor van de bodem

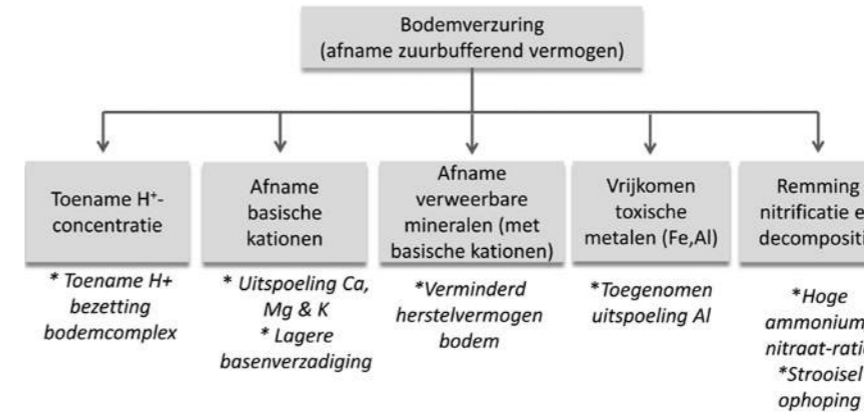
Vrijwel alle kationen in de bodem komen oorspronkelijk vrij door vertering, een proces waarbij mineralen reageren met zuur. Een voorbeeld hiervan is de vertering van kaliveldspaat tot het secundaire kleimineraal kaolien, kiezelzuur en kaliumionen:



Dit is ook het basale proces dat de zuurgraad in de bodem stabiel houdt in wisselwerking met het kationuitwisselingscomplex (de aan de humus en klei geassocieerde kationen). Vertering is een relatief langzaam proces. Het houdt geen gelijke tred met het vrijkomen van basische kationen van het complex als het aanbod van zuur te hoog is. En dan verzuurt de bodem dus. Bij sterke verzuring kan het bij vertering vrijgekomen aluminium geen nieuwe kleimineralen vormen en wordt het als Al³⁺ gebonden aan het kationuitwisselingscomplex.

Mineralen zoals kaliveldspaat, albit en muscoviet zijn de belangrijkste verweerbare mineralen met basische kationen (K, Ca, Mg en Na) in de Nederlandse zandbodems. Het zeer resistente kwarts (SiO₂) bevat geen van deze elementen, maar maakt wel 80-90% van de Nederlandse minerale zandbodem uit. Dit laat al zien waarom zandbodems gevoelig tot zeer gevoelig zijn voor verzuring.

Vertering is een proces dat van nature optreedt door koolzuur dat geproduceerd wordt in de bodem. Door de (zeer) hoge verzurende depositie van de afgelopen eeuw is de vertering ernstig versneld en dit heeft in korte tijd geleid tot een drastische afname van het aan mineralen gerelateerde vermogen om basische kationen te leveren voor kationuitwisseling (Bergsma et al., 2016). Voor veel bodems in het droog zandlandschap betekent dit dat onder de huidige N-depositie geen herstel mogelijk is zonder aanvulling van mineralen met basische kationen.



Figuur 1 overzicht van factoren die in de bodem veranderen bij voortschrijdende bodemverzuring (veranderd naar Bobbink et al., 2014).

Figure 1 scheme of the main changes in the soil during acidification (adapted after Bobbink et al., 2014).

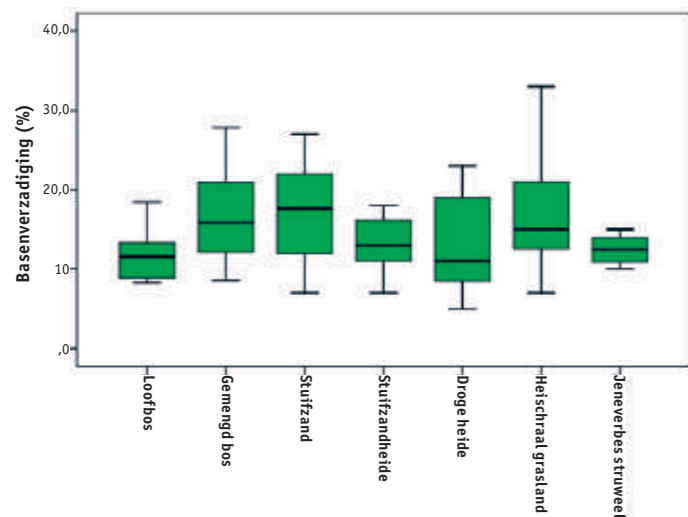
materiaal (decompositie) sterk verminderen waardoor strooiselophoping in verzuurde ecosystemen zeer algemeen is (figuur 1). Een groot deel van de bossen van het droog zandlandschap wordt gekenmerkt door boomsoorten zoals zomereik (*Quercus robur*), beuk (*Fagus sylvatica*) en grove den (*Pinus sylvestris*) met moeilijk afbreekbaar strooisel. Dit heeft geleid tot stapeling van organisch materiaal op de bodem waardoor dikke zure strooiselpakketten zijn ontstaan. De zuurproductie bij de afbraak leidt tot het verder uitspoelen van basische kationen uit de bodem. In feite worden de gesignaleerde problemen door de verzurende depositie alleen maar versterkt door de ongunstige strooiseleigenschappen van deze bomen. Dit heeft er toe geleid dat ook bodems onder bos degraderen, waarbij bijvoorbeeld oude bruine bosgronden omslaan in podzolen met typische verbleking in de bovengrond.

Achteruitgang nog niet gestopt

Uit recente gegevens blijkt dat veel kenmerkende planten- en diersoorten van het droog zandlandschap de

laatste 10-20 jaar nog steeds achteruit gaan. Dit ondanks de afname in N-depositie in de laatste decennia en herstelbeheer gericht op afvoer van overtollige N door bijvoorbeeld plaggen van droge heide. De voortschrijdende verzuring van het droog zandlandschap is door brongerichte maatregelen wel vertraagd, maar niet gestopt, zoals uit het volgende blijkt.

In 2016 zijn in het kader van OBN exact dezelfde bodemmetingen uitgevoerd in zomereikbestanden als zo'n 25 jaar eerder (1990-1992) op dezelfde locaties. De grootte van het adsorptiecomplex was niet veranderd, maar de basenverzadiging was verder gedaald. In vrijwel alle onderzochte bossen is een basenverzadiging gemeten van 5-15% in de bovenste 30 centimeter van de bodem. Vooral bossen met een basenverzadiging van 20-60% bij de eerste meting bleken nu onder de 15% uit te komen. Kortom, het verlies aan basische kationen (Ca, K en Mg) is nog niet gestopt (De Vries et al., in druk). Deze droge eikenbossen lijken, zonder ingrijpen, volledig verzuurd te raken. Hierbij bestaat de kans dat de beschikbare kationen ten slotte ook uit de diepere bodemlagen (0,5-1,5

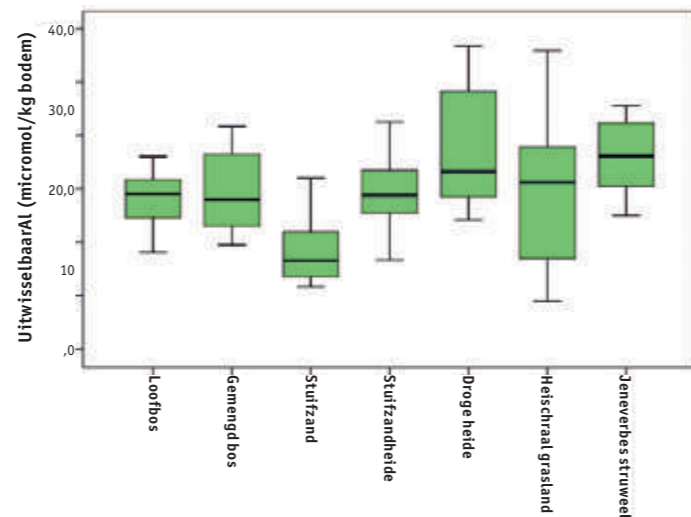


Figuur 2 basenverzadiging (% na SrCl_2 -extractie; links), en de concentratie uitwisselbaar-Al ($\mu\text{mol}/\text{kg}$ droge bodem na zout-extractie; rechts) in de bodem van kenmerkende vegetaties in het droge gedeelte van Nationaal Park De Hoge Veluwe (Weijters & Bobbink, in voorbereiding).

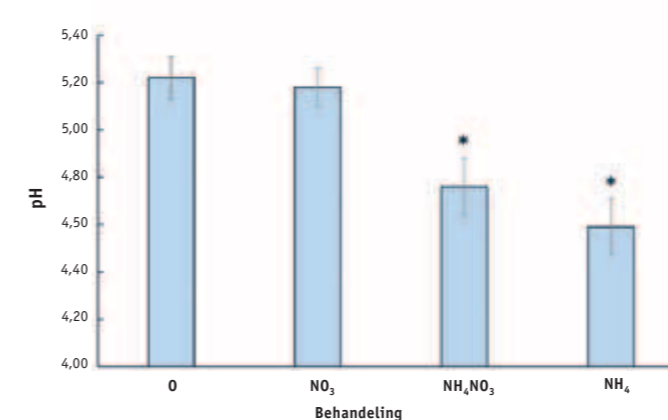
Figure 2 base saturation (% in SrCl_2 extraction; left) and the concentration of exchangeable Al ($\mu\text{mol}/\text{kg}$ dry soil in NaCl extraction; right) in the topsoil of characteristic vegetation types in the dry part of Hoge Veluwe National Park (Weijters & Bobbink, in prep.).

meter) verdwijnen en Al^{3+} gaat overheersen. De gevolgen voor het bosecosysteem en de bomen zijn groot zoals blijkt uit de verhoogde sterfte van zomereiken (Lucassen *et al.*, 2014; Oosterbaan *et al.*, 2015). De doorgaande bodemverzuring heeft ook effecten op de ondergroei. Veel typische bosplanten zoals bosanemoon (*Anemone nemorosa*) of bleeksporig bosviooltje (*Viola riviniana*) hebben een minder zure bovengrond nodig en zullen zich uiteindelijk niet kunnen handhaven. De stapeling van strooisel speelt hierbij eveneens een rol: deze persistente laag verstikt uiteindelijk soorten die op de bosbodem groeien.

Een tweede voorbeeld komt uit een recente studie in droge heischrale graslanden. De biodiversiteit van deze graslanden – kenmerkend voor meer gebufferde delen van het droog zandlandschap – is sinds de jaren zeventig van de vorige eeuw sterk achteruit gegaan (o.a. Bobbink *et al.*, 2004; Oostermeijer *et al.*, 2016). Gebleken is dat de concentratie uitwisselbaar Ca^{2+} en ook de basenverzadiging in de bodem van droge heischrale graslanden in



Nederland bijna altijd aanzienlijk lager is dan in het buitenland. Het grootste verschil is de depositie van N. In de buitenlandse heischrale graslanden is deze lager dan 12 kg/ha/jaar , de kritische depositiewaarde voor heischrale graslanden. Ook is gevonden dat het voorkomen van kenmerkende en Rode Lijstplantensoorten in Nederlandse droge heischrale graslanden zeer beperkt is, en dat deze soorten eigenlijk alleen nog daar worden aangetroffen waar de bodem door allerlei lokale oorzaken niet verzuurd is (Van der Zee *et al.*, in druk). Het derde voorbeeld komt uit recent onderzoek in het Nationale Park De Hoge Veluwe. In 2015 en 2016 is hier de basenverzadiging van de bodem en de hoeveelheid Al^{3+} aan het uitwisselingscomplex onder een aantal kenmerkende droog zandhabitattypen gemeten (figuur 2). De wat meer gebufferde plaatsen, met een bezetting tussen de 25-60%, zijn nauwelijks meer aangetroffen en opneembaar Al^{3+} is nu in hoge concentraties aanwezig (Maaïke Weijters en Roland Bobbink, persoonlijke mededeling).



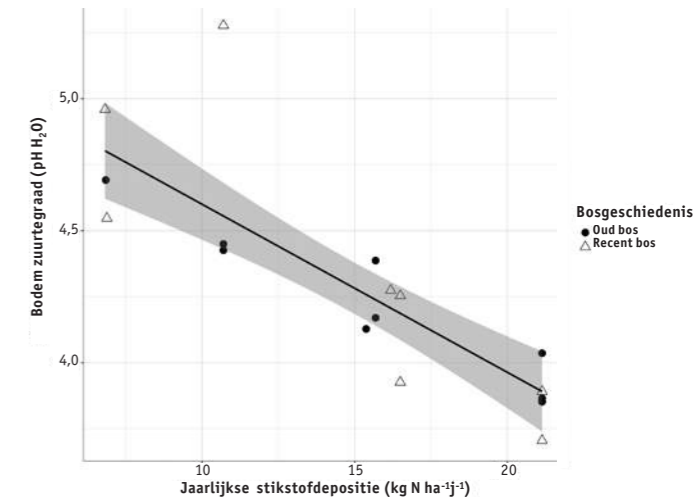
Figuur 3 de $\text{pH-H}_2\text{O}$ van de toplaag van de bodem na 7 jaar beregening met nitraat, ammoniumnitraat of ammonium (70 kg N/ha/jaar) of met schoon regenwater (0) in een heischraal grasland (*Violion caninae*) in Noorwegen (Revne) met achtergronddepositie van $4\text{-}6 \text{ kg N/ha/jaar}$. Voor details, zie Dorland *et al.* (2013).

Figure 3 topsoil $\text{pH-H}_2\text{O}$ after 7 years of N addition as nitrate, ammoniumnitrate or as ammonium (70 kg N/ha/year) or in the untreated control (0) in an acidic grassland (*Violion caninae*) in Revne, Norway with a background deposition of $4\text{-}6 \text{ kg N/ha/year}$. For experimental details, see Dorland *et al.* (2013)

N-depositie en bodemverzuring

Het is lastig om een causaal verband te leggen tussen bodemverzuring van droge zandgronden en de hoge N-depositie. De beste manier om de ecologische gevolgen van N-depositie te achterhalen is het uitvoeren van langetermijn N-additie-experimenten in gebieden waar de N-depositie nog heel weinig verhoogd is (Bobbink & Hettelingh, 2011). In zo'n experiment in Noorwegen, een regio met een zeer lage N-depositie, zijn verschillende vormen van N toegediend in een heischraal grasland. De verhoogde N-depositie zorgde in het zevende groeiseizoen voor een significante daling van de pH (figuur 3) en van de uitwisselbare kationen. Deze significante daling werd alleen gevonden als er ook gereduceerd N (NH_4^{+}) was toegediend. Gereduceerd N is al decennia lang de hoofdcomponent (> 70%) van de N-depositie in Nederland.

Ook verschillen in reactie bij een N-depositiegradiënt binnen een habitattype zijn in het laatste decennium veelvuldig onderzocht, bijvoorbeeld door Stevens *et al.*



Figuur 4 de $\text{pH-H}_2\text{O}$ van de toplaag van de bodem van oude en jonge voedselarme loofbossen, veelal met zomereik over een Europese gradiënt van N-depositie (kg N/ha/jaar). Gegevens verzameld door Haben Blondeel, Kris Verheyen en anderen in het kader van het ERC-project PASTFORWARD.

Figure 4 $\text{pH-H}_2\text{O}$ in the topsoil of oligotrophic deciduous forests (old and recent stands) with *Quercus* across an European gradient of atmospheric N deposition. Data collected by Haben Blondeel, Kris Verheyen and others in the framework of the ERC-project PASTFORWARD



Foto **Hans Dekker** heischraal grasland met valkruid bij Havelte.

(2010). Zeer recent is de relatie tussen bodem-pH en N-depositie uitgezocht in verschillende bostypen bij een N-gradiënt van minder dan 5 tot bijna 25 kg N/ha/jaar. Het betrof bossen in Noord-Frankrijk, Vlaanderen, Duitsland, Zuid-Zweden en Estland, waarbij zowel oude als recente bossen in het onderzoek zijn betrokken. Voor loofbossen op oligotrofe bodems, veelal met zomereik, werd een significante negatieve correlatie gevonden tussen N-depositie en bodem-pH: bij een N-depositie onder de 12,5 kg N/ha per jaar lag de pH altijd tussen 4,4 en 5,3 terwijl deze waarde bij N-deposities boven de 20 kg N/ha/jaar duidelijk lager was dan 4,0 (figuur 4).

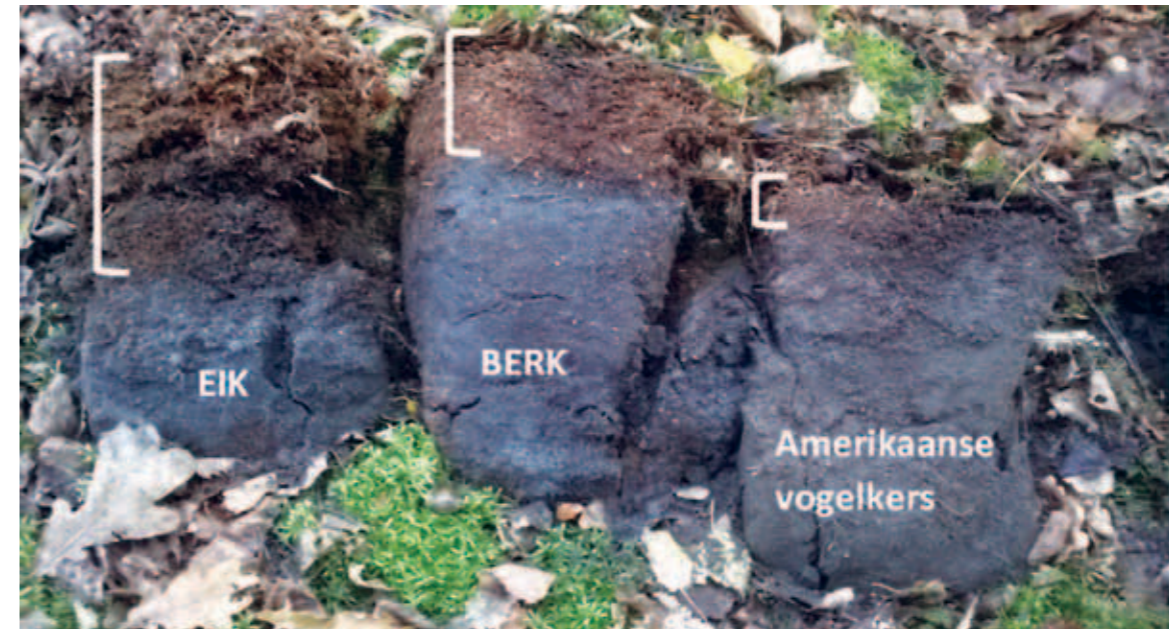
Herstelopties

De zojuist beschreven ontwikkelingen hebben een voortschrijdende nivellering van de biodiversiteit van

het droog zandlandschap tot gevolg door het steeds minder voorkomen van locaties met wat meer bodembuffering. Dit geldt niet alleen voor vegetatie, maar ook voor de fauna (Van den Burg & Vogels, dit nummer). De druk op de kenmerkende biodiversiteit geldt voor een groot aantal habitattypen van het droog zandlandschap, zoals stuifzand, droge heide, jeneverbesstruwelen, heischrale graslanden en loofbossen, en de achteruitgang van de biodiversiteit is op veel plaatsen in het droog zandlandschap nog niet gestopt.

Niet alleen de basenverzadiging van droge zandbodems is verminderd, ook de onderliggende voorraad verweerbare mineralen met basische kationen is significant aangetast (Bergsma et al., 2016). Dit betekent dat de bodem zich bij gelijkblijvende zuurlast niet kan herstellen maar juist achteruit blijft gaan. Aanvulling met gemalen silicaatmineralen (steenmeel) kan er in principe voor zorgen dat het verlies van verweerbare mineralen gecompenseerd wordt en er weer verbetering gaat optreden (Weijters et al., 2017).

Het kleinschalig plaggen met daarna bekalken is bewezen effectief voor het duurzaam herstel van droge heischrale graslanden en voorheen soortenrijke heide (Bobbink et al., 2004). Dit heeft er bijvoorbeeld voor gezorgd dat restpopulaties van valkruid (*Arnica montana*) zich lokaal weer konden uitbreiden en zich nu al 25 jaar handhaven (Van der Zee et al., in druk). Het is echter lang niet altijd wenselijk om te plaggen en te bekalken, zeker niet op veel locaties met zure droge heide (zie voor details Van den Burg & Vogels, dit nummer). Toch kan deze maatregel lokaal essentieel zijn om op korte termijn verlies van plantensoorten te voorkomen, totdat via steenmeeltoediening de minerale motor van het systeem weer draait en de basenbezetting weer in voldoende mate wordt aangevuld.



Figuur 5 drie bodemprofielen verzameld onder verschillende boomsoorten op eenzelfde bodemsubstraat vlak bij elkaar. Onder zomereik heeft zich een dikke strooisellaag opgestapeld, terwijl onder Amerikaanse vogelkers duidelijk minder strooiselophoping plaatsvindt. Foto: **Jan den Ouden**.

Figure 5 accumulation of litter and organic material under 3 tree species (*Quercus robur*, *Betula pendula* and *Prunus serotina*), growing nearby each other (within 100 m) on the same subsoil. Litter accumulation was clearly more distinct under the *Quercus* (left profile). Photo: **Jan den Ouden**.

Herstel op plekken waar de doelsoorten al verdwenen zijn is moeilijker, aangezien soorten na herstel van de abiotiek in het huidige sterk versnipperde landschap niet of nauwelijks vanzelf terug kunnen komen en vaak geen langlevende zaadvoorraad hebben (Loeb & Weijters, 2013). Er zijn goede resultaten te behalen door op geschikte of geschikt gemaakte plekken vers, soortenrijk maaisel en/of vitale zaden in te brengen. Dit is cruciaal omdat veel populaties van soorten uit voorheen gebufferde habitats zo klein zijn geworden en genetisch zo weinig divers, dat populatieversterking en herstel van het metapopulatiernetwerk onontbeerlijk is (Oostermeijer et al., 2016; Van der Zee et al., in druk). Hierbij moet niet alleen oog zijn voor herstel van de bovengrondse soortenrijkdom. Herstel van het bodemleven blijkt de kans op succes te vergroten (Van der Bij et al., in druk; Wubs et al., 2016).

Ook in bossen ligt de sleutel tot succesvol herstel waarschijnlijk in het combineren van maatregelen. Wanneer in bossen de boomlaag gedomineerd blijft worden door soorten met slecht afbreekbaar strooisel, zal de bovengrond bij de huidige depositie verder verzuren. Voor een verandering op systeemniveau kan het inbrengen van boomsoorten met gunstige strooiseleigenschappen mogelijk een oplossing bieden (Hommel et al., 2007). Door de betere afbreekbaarheid van het strooisel kan zich een rijkere bodemfauna ontwikkelen die de hogere gehalten aan basische kationen uit de bladeren in de kringloop kunnen houden. Dit kan al binnen enkele decennia leiden tot spectaculaire veranderingen in de humusvorming, met hogere pH, een betere basenbezetting en minder stapeling van organische stof op het bodemoppervlak tot gevolg. Als icoon voor dit effect heeft de linde al enige bekendheid verworven, maar ook soorten

als hazelaar (*Corylus avellana*) of esdoorn (*Acer* sp.) kunnen hier een belangrijke functie vervullen. En ook de Amerikaanse vogelkers (*Prunus serotina*) kan de humusvorming sterk verbeteren (Nyssen *et al.*, 2013; Lorenz *et al.*, 2004), zie figuur 5. Gecombineerd met het toevoegen van steenmeel in plantgaten van jonge bomen of opgebracht op de bovengrond lijkt dit een kansrijke maatregel om de verzuurde bossen op termijn duurzaam te herstellen. Sinds 2016 wordt hier onderzoek naar gedaan (Nyssen *et al.*, 2016).

In het kader van OBN, het PAS en vanuit de provincies Noord-Brabant, Drenthe en Gelderland is er sinds medio 2014 onderzoek gestart naar de mogelijkheden om de verzuurde bodems van droge of natte heide door toediening van steenmeel te herstellen (Weijters *et al.*, 2017). Daarnaast wordt deze maatregel sinds zeer recent (2016) zowel getest in droge loofbossen met zomereik

Summary

Soil acidification: a continuous threat in the dry sandy regions of the Netherlands

Roland Bobbink, Huig Bergsma, Jan den Ouden & Maaïke Weijters

Nitrogen deposition, forests, heathlands, restoration, rock powder

Many ecosystems of high conservation value, such as heathlands, acidic grasslands and deciduous woodlands are characteristic for the Pleistocene sandy areas of the Netherlands. Nowadays, most of them are restricted to nature reserves, including Natura 2000 sites. The biodiversity of these typical ecosystems has been severely affected by the impacts of atmospheric N (and formerly S) deposition since the 1970s. However, despite of the very

als in een verzuurd heischraal grasland. Verder wordt onderzocht of en hoe het areaal aan goed ontwikkelde heide en heischrale graslanden uitgebreid kan worden op voormalige landbouwgronden die niet verzuurd zijn (Loeb *et al.*, 2013; Weijters *et al.*, 2015). De rol van het bodemleven is vaak ook onderdeel van deze studies.

Bovenstaande onderzoeken geven blijk van een besef van urgentie bij zowel OBN als bij de verschillende provincies, maar om de kwaliteit van de natuur in het droog zandlandschap in de toekomst te kunnen waarborgen is een provincie-overstijgende aanpak vereist. Hierbij is het cruciaal dat er zowel aandacht wordt besteed aan het ontwikkelen van adequate herstelmaatregelen als aan het aanvullend verminderen van de nog steeds veel te hoge N-depositie in het Nederlandse zandgebied.

strong reduction in S deposition in the last 3 decades, it has become clear that the impacts of atmospheric N deposition are still evident in ecosystems on dry, sandy soils. Recent studies have demonstrated that soil acidification still continues under the present N loads, regardless of its reduction in the period 1993 to 2004. It has led to base cation depletion, high aluminium and ammonium concentrations and very low levels of silicate minerals with base cations. Restoration of these degraded ecosystems on dry soils is very urgent, and innovative measures are under study to counteract soil acidification with experimental addition of ground silicate rocks ('rock powder'). Furthermore, additional reduction of the N deposition is highly needed to prevent (re)degradation in the near future.

Literatuur

Bergsma, H., J. Vogels, M. Weijters, R. Bobbink, A. Jansen & L. Krul, 2016. Tandrot in de bodem. *Bodem* 26(1): 27-29.

Bij, A.U. van der, M.J. Weijters, R. Bobbink, J.A. Harris, M. Pawlett, K. Ritz, P. Radochová, J. Moradi, J. Frouz & R. van Diggelen, in druk. Facilitating ecosystem assembly: plant-soil interactions as a restoration tool. *Biological Conservation*.

Bobbink, R., E. Brouwer, J. ten Hoopen & E. Dorland 2004. Herstelbeheer in het heidelandschap: effectiviteit, knelpunten en duurzaamheid. In: G-J. van Duinen, R. Bobbink, C. van Dam, H. Esselink, H. Hendriks, M. Klein, A. Kooijman, J. Roelofs & H. Siebel (eds.). *Duurzaam natuurherstel voor behoud biodiversiteit: 15 jaar herstelmaatregelen in het kader van het Overlevingsplan Bos en Natuur*. Ede, Expertisecentrum LNV: 33-70.

Bobbink R. & J.P. Hettelingh (eds.), 2011. Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. Coordination Centre for Effects, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), RIVM report 680359002/2011 (244 pp).

Bobbink, R., D. Bal, H.F. van Dobben, A.J.M. Jansen, M. Nijssen, H. Siepel, J.H.J. Schaminée, N.A.C. Smits & W. de Vries, 2014. De effecten van stikstofdepositie op de structuur en het functioneren van ecosystemen. In: N.A.C. Smits & D. Bal (red.). *Herstelstrategieën stikstofgevoelige habitats*. Alterra WUR & Ministerie EZ. Deel 1, H-2: 41-110.

Burg, A. van der & J. Vogels, 2017. Zuur voor de fauna. Soorten bos en hei missen essentiële voedingsstoffen. *Landschap* 34/2: 71-79.

Dorland, E., C.J. Stevens, C. Gaudnik, E. Corcket, S. Rotthier, K. Wotherspoon, M. Jøkerud, V. Vandvik, M.B. Soons, M.M. Hefting, P. Arild Aarrestad, D. Alard, M. Diekmann, C. Duprè, N.B. Dise, D.J.G. Gowing & R. Bobbink, 2013. Differential effects of oxidised and reduced nitrogen on vegetation and soil chemistry of species-rich acidic grasslands. *Water Air and Soil Pollution* 224: 1664-1678.

Hommel, P.W.F.M., R.W. de Waal, B. Muys, J. den Ouden & T.H. Spek, 2007. Terug naar het lindewoud. Zeist. KNNV Uitgeverij.

Loeb, R., A. van der Bij, R. Bobbink, F.J. Frouz & R. van Diggelen 2013. Ontwikkeling van droge heischrale graslanden op voormalige landbouwgronden. Den Haag. Directie Agro kennis, Ministerie van Economische zaken. Rapportnummer 2013/OBN176-DZ.

Loeb, R. & M.J. Weijters, 2013. Introductie van soorten via maaisel na herinrichting: ongeduld of wijsheid? *De Levende Natuur* 114 (4): 157-159.

Lorenz, K., C. M. Preston, S. Krumrei & K.-H. Feger, 2004. Decomposition of needle/leaf litter from Scots pine, black cherry, common oak and European beech at a conurbation forest site. *European Journal of Forest Research* 123: 177-188.

Lucassen, E.C.H.E.T., L.J.L. Van den Berg, R. Aben, A.J.P. Smolders, J.G.M. Roelofs & R. Bobbink, 2014. Bodemverzuring en achteruitgang zomereik. *Landschap* 31/4: 185-193.

Nyssen, B., J. den Ouden & K. Verheyen, 2013. Amerikaanse vogelkers: Van bospest tot bosboom. Zeist. KNNV Uitgeverij.

Nyssen, B.J.M., R.F. van der Burg & E. Desie, 2016. Regime shift in bossen op zandgronden; LESA toont de kansen. *De Levende Natuur* 117 (6): 230-234.

Oosterbaan, A., R. Bobbink & M. Decuyper, 2015. Eikensterfte: een serieus en complex probleem. *Vakblad Natuur Bos en Landschap* 12 (maart): 11-14.

Oostermeijer, G., S. Luijten, M. Weijters & R. Bobbink, 2016. Rozenkransje en heischraal grasland in Drenthe. *De Levende Natuur* 117 (1): 22-27.

Siebel, H.N. & R. Bobbink, 2017. OBN en het droog zandlandschap. *Landschap* 34/2: 57-59.

Stevens, C.J., C. Duprè, E. Dorland, C. Gaudnik, D.J.G. Gowing, A. Bleeker, M. Diekmann, D. Alard, R. Bobbink, D. Fowler, E. Corcket, J.O. Mountford, V. Vandvik, P.A. Aarrestad, S. Muller & N.B. Dise, 2010. Nitrogen deposition threatens species richness of grasslands across Europe. *Environmental Pollution* 158: 2940-2945.

Vries, W. de, R. Bobbink, A. de Jong & M.J. Weijters, in druk. Herstel van droge loofbossen - OBN tussenrapport 2017. Driebergen. VBNE.

Weijters, M., A. van der Bij, R. Bobbink, R. van Diggelen, J. Harris, M. Pawlett, J. Frouz, A. Vliegthart & R. Vermeulen, 2015. Praktijkproef heideontwikkeling op voormalige landbouwgrond in het Noordenveld - Resultaten 2011-2014. Assen. Provincie Drenthe/VBNE.

Weijters, W., R. Bobbink, E. Verbaarschot, J. Vogels, H. Bergsma & H. Siepel, 2017. Herstel van heide door middel van steenmeelgift: (tussen)rapportage 2017. 's Hertogenbosch, Provincie Noord-Brabant/ Driebergen, OBN-VBNE.

Wubs, E.R.J., W.H. van der Putten, M. Bosch & T.M. Bezemer, 2016. Soil inoculation steers restoration of terrestrial ecosystems. *Nature Plants* 2: 1-5.

Zee, F. van der, R. Bobbink, R. Loeb, M. Wallis de Vries, G. Oostermeijer, S. Luijten & M. de Graaf, in druk. Naar een Actieplan Heischrale graslanden: hoe behouden en herstellen we heischrale graslanden in Nederland? Wageningen. Wageningen Environmental Research.