

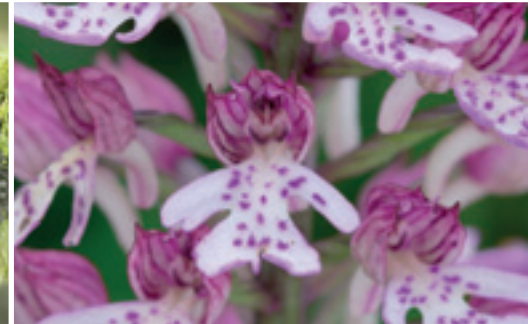
Natuur.focus

Afgiftekantoor
Antwerpen X
P209602

Toelating – gesloten verpakking

Retouradres: Natuurpunt,
Coxiestraat 11,
2800 Mechelen

VLAAMS DRIEMAANDELIJKS TIJDSCHRIFT OVER NATUURSTUDIE & -BEHEER – DECEMBER 2012 – JAARGANG 11 – NUMMER 4
VERSCHIJNT IN MAART, JUNI, SEPTEMBER EN DECEMBER



Focus op biogeochemie

De Stierkikker in Vlaanderen

Hybridisatie bij orchideeën



natuurpunt 
Studie

Inleiding bij reeks:

Focus op biogeochemie

Hoe biogeochemie de biodiversiteit stuurt

Liefhebbers van natuur en bos associëren biodiversiteit niet spontaan met biogeochemie. 'Bio' en 'geo' tot daaraan toe, maar 'chemie'? Chemie schrikt velen onder ons af en doet ons denken aan ingewikkelde formules en reacties, distilleerkolven en leraren die in codetaal spreken. Boven- en ondergrondse biodiversiteit worden echter in belangrijke mate gestuurd door het biogeochemisch functioneren van ecosystemen. Biologische, geologische en chemische processen grijpen voortdurend op elkaar in en zijn aan elkaar gekoppeld door de activiteiten van vele organismen. Om de natuur op een weldoordachte en effectieve manier te beheren en te herstellen, is het cruciaal om meer kennis te verwerven over deze interacties. Dit is het eerste artikel van een reeks waarin we de lezer wegwijs willen maken in een aantal biogeochemische processen en meer inzicht willen geven in de complexe wereld van het functioneren van terrestrische ecosystemen. In dit artikel bespreken we de gevolgen van bodemverzuring voor de biodiversiteit en lichten we toe hoe beheerders verzuring kunnen tegengaan en remediëren. Het volgende artikel zoomt meer in op de biogeochemische processen die zich afspelen in bosranden. Een derde artikel bekijkt het effect van de halfparasieten Grote ratelaar en Heidekartelblad op de biogeochemie en biodiversiteit van halfnatuurlijke graslanden. Vervolgens bekijken we de knelpunten en mogelijkheden voor natuurontwikkeling op voormalige landbouwbodems. Tenslotte gaan we dieper in op het nefaste effect van stikstof op de biogeochemie en biodiversiteit van terrestrische ecosystemen. Af en toe zal je door de zure (of basische) chemische appel heen moeten bijten, maar hou vol. We zijn ervan overtuigd dat je op het einde van deze reeks natuurbeheer nog zoveel boeiender zal vinden.



Heideherstel in het Drongengoedbos in Maldegem (foto: Vilda/Yves Adams)

Verzuring van terrestrische ecosystemen

Oorzaken, remedies en gevolgen voor biodiversiteit

An De Schrijver, Karen Wuyts, Stephanie Schelfhout, Jeroen Staelens, Gorik Verstraeten & Kris Verheyen

In de jaren tachtig van de twintigste eeuw werden bosbeheerders opgeschrikt door verhalen van massale naaldbossterfte in centraal Europa, getypeerd door de term 'Waldsterben'. Duitse wetenschappers wezen de hoge uitstoot van verzurende stoffen door de (bio)industrie en het verkeer aan als oorzaak (bv. Ulrich 1980, Schütt 1980), een hypothese die uitvoerig werd belicht in de Duitse media (zie bv. der Spiegel, *Link 1*), maar later door dezelfde wetenschappers genuanceerd werd (Ulrich 1995). In Duitsland en andere Europese landen voerde men 'de politiek van de hoge schoorstenen' in, waarbij schoorstenen van fabrieken werden verhoogd om de vervuiling hoger en verder te blazen. Dit had tot gevolg dat lokaal minder verzurende stoffen werden afgezet, maar dat de vervuiling breder werd uitgesmeerd over een grotere regio. Nu horen we vrijwel niets meer over het probleem van de verzurende regen en is de paniek over grootschalige bossterfte uitgedoofd. Maar is het verzuringsprobleem werkelijk van de baan? In Vlaanderen was geen sprake van massale naaldbossterfte, maar tussen 1950 en 2000 verzuurden de bodems van naaldbossen sterk (De Schrijver et al. 2006). Is verzuring enkel een probleem in bossen of zet het ook andere terrestrische natuur onder druk? Moeten we ons enkel zorgen maken als er bossterfte optreedt of zijn er andere, minder zichtbare gevolgen van bodemverzuring? Wat betekent dat eigenlijk, verzuring, wat zijn de oorzaken en wat zijn de gevolgen voor het functioneren van terrestrische ecosystemen en voor de biodiversiteit? Is er momenteel nog sprake van een hoge uitstoot van verzurende stoffen? Kan de natuur- en bosbeheerder bodemverzuring voorkomen of remediëren?

 [Link 1: www.spiegel.de/spiegel/print/d-14347006.html](http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-14347006.html)

Wat is bodemverzuring?

Bodemverzuring is een toename van de concentratie aan protonen (waterstofionen, H^+) in de bodem. De zuurtegraad van een bodem kan bepaald worden door de bodem-pH te meten. Hoe zuurder de bodem, hoe hoger de concentratie aan protonen en hoe lager de pH van de bodem. Wanneer protonen in een bodem terechtkomen, treden verschillende buffermechanismen in werking waarbij deze protonen vastgelegd of verwijderd worden (*Figuur 1*). Bij bodems met hoge pH (lage bodemzuurtegraad) worden inkomende protonen geneutraliseerd door een reactie met calciumcarbonaat. Wanneer al het vrij calciumcarbonaat weggereageerd is, worden protonen uitgewisseld tegen de zogenaamde basische kationen (kalium, calcium en magnesium) die zich op het uitwisselingscomplex van de bodem bevinden. Het uitwisselingscomplex van

de bodem bestaat uit negatief geladen klei- en leempartikels en het organisch materiaal waaraan de kationen gebonden zijn. Bij deze uitwisseling worden protonen vastgelegd op de plaatsen waar zich eerst kationen bevonden. De kationen komen dan in oplossing en als ze niet worden opgenomen door de vegetatie, logen ze via percolerend water uit naar het grondwater of naar diepere bodemlagen. Bij verzuring verarmt de bodem dus omdat de concentratie aan basische kationen daalt. Een verdere daling van de bodem-pH ($pH < 4,5$ à 5) veroorzaakt het in oplossing gaan van aluminium- en ijzerhydroxiden. Het in oplossing komen van aluminium is ecologisch een bijzonder nefast proces. Aluminium is immers toxisch voor talrijke soorten (zie verder).

Samenvattend kunnen we stellen dat de belangrijkste gevolgen van bodemverzuring het uitlogen van basische kationen

(verarming van de bodem) en het in oplossing gaan van het toxische aluminium zijn. Bodemverzuring leidt bovendien tot verstoorde nutriëntenverhoudingen (zie verder).

Natuurlijke oorzaken van bodemverzuring

Bodemverzuring is in gematigde streken een natuurlijk proces. Neerslagwater is van nature arm aan basische kationen en licht zuur door het opgeloste kooldioxide. In natuurlijke omstandigheden, dus zonder aanwezigheid van vervuulende stoffen in de atmosfeer, komen hierdoor protonen in ecosystemen terecht via neerslagwater. Ook plantengroei veroorzaakt bodemverzuring: wanneer planten positief geladen ionen (kationen) opnemen, scheiden wortels protonen af, wat verzuring induceert. Deze verzuring is echter pas definitief wanneer kationen ook worden verwijderd uit het ecosysteem. Dit is het geval wanneer de hoeveelheid neerslag groter is dan het waterverbruik door de vegetatie, wat in gematigde streken het geval is. Kationen worden ook verwijderd wanneer bij maai-beheer in graslanden of bij houtoogst in bossen biomassa wordt afgevoerd. Voor het verschraken van graslanden wordt een beheer van maaien en afvoeren van het maaisel toegepast, wat naast stikstof en fosfor eveneens basische kationen afvoert en dus bodemverzuring veroorzaakt. In intensief beheerde bossen veroorzaakt het oogsten van bomen bodemverzuring, zeker wanneer ook de takken, twijgen en bladeren of naalden mee verwijderd worden. In bossen zonder houtoogst komen de basische kationen, die werden opgenomen door bomen, terug vrij bij het vergaan van het dood hout en strooisel. Hierdoor kunnen de eerder afgescheiden protonen weer geneutraliseerd worden en kan de verzuring, veroorzaakt door plantengroei, plaatselijk ongedaan gemaakt worden. Stikstof-fixerende planten als Zwarte en Witte els, Robinia en Witte en Rode klaver verzuren de bodem als een gevolg van de biochemische reacties die volgen op de vastlegging van stikstofgas uit de atmosfeer.

In heidegebieden ligt jaarrond een aanzienlijke hoeveelheid strooisel op de bodem. Ook in naaldbosbossen (*Figuur 2*) en eiken- en beukenbossen ligt meestal een dik pakket strooisel, dood organisch materiaal van afgevallen naalden, bladeren, twijgen en takken in verschillende stadia van vertering. De aanwezigheid van een dik pak strooisel wijst op een trage afbraak. Bladstrooisel dat arm is aan nutriënten (zoals basische kationen, stikstof, fosfor) en rijk is aan houtstof of lignine breekt traag af. De afbraak van dit strooisel verzuurt de

bodem door de hogere productie aan organische zuren tijdens het afbraakproces en door het vastleggen van basische kationen in de opstapelende strooisellaag. Basische kationen kunnen de verzuring ongedaan maken en ecosystemen met een snelle doorstroming van basische kationen zijn bijgevolg beter gebufferd tegen verzuring. Vooral in heide- en bosgebieden speelt verzuring ten gevolge van strooiselafbraak een belangrijke rol. Struik- en Dophei, naaldboomsoorten en loofboomsoorten als eik en Beuk zijn soorten met traag afbrekend bladstrooisel. Grassen, kruiden en boomsoorten als linde, Es, populier, esdoorn en Zoete kers hebben sneller afbrekend bladstrooisel dat rijker is aan nutriënten, met een geringere productie van organische zuren en een snellere vrijstelling en circulatie van basische kationen in het ecosysteem.

Menselijke oorzaken van bodemverzuring

Natuurlijke bodemverzuring wordt in geïndustrialiseerde en dichtbevolkte regio's als Vlaanderen versterkt door de mens. De natuurlijke biogeochemische kringloop van nutriënten in natuur- en bosgebieden wordt ernstig verstoord door de overmatige aanvoer van stoffen uit de atmosfeer. Belangrijke bronnen zijn intensieve veehouderij en bemesting in de landbouw (verantwoordelijk voor de uitstoot van ammoniakgas NH_3) en de verbranding van fossiele brandstoffen in het verkeer en door de industrie (uitstoot van geoxideerd stikstof NO_x en zwaveldioxide SO_2). Vooral natuur- en bosgebieden op zandbodems (Noorderkempen, West-Vlaanderen) zijn kwetsbaar voor verzuring. Deze natuur wordt sterk belast door de emissies uit intensieve veehouderijen, geconcentreerd in deze regio's, en de bodems hebben bovendien een lage buffercapaciteit door het lage kleigehalte. Uit metingen blijkt dat zandbodems onder bos de laatste 50 jaar sterk zijn verzuurd, met verzurende depositie als een van de belangrijkste oorzaken (De Schrijver et al. 2006). Het hoge aandeel naaldbos enerzijds en de versnipperde bosstructuur die voor een hoog aandeel aan bosrand zorgt anderzijds versterken de pollutiedruk. In ons volgende artikel gaan we hier dieper op in. Hoewel de uitstoot van ammoniakgas en zwaveldioxide de voorbije decennia significant daalde (zie *Box*), zijn atmosferische deposities in Vlaanderen nog steeds een van de belangrijkste oorzaken van bodemverzuring. Ter illustratie toont *Figuur 3* de input aan protonen afkomstig van nutriëntenopname en atmosferische depositie in eikenbossen aangeplant op voormalige landbouwbodem.

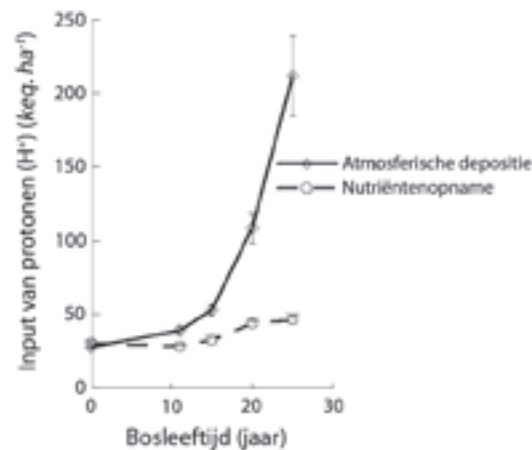
Verzurende stoffen komen in ecosystemen terecht via neerslagwater (natte depositie) of door afzetting op het blad- en naaldmateriaal, twijgen en takken van de vegetatie (droge depositie). Droge depositie is in bossen omwille van hun ruwere structuur significant hoger dan in heide en graslanden. Sinds 1994 worden de deposities opgemeten in vijf Vlaamse bossen (Zoniënwoud in Groenendaal, domeinbos De Inslag in Braschaat, domeinbos van Ravels, Aelmoeseneiebos in Gontrode en Wijnendalebos in Torhout (zie o.a. Verstraeten et al. 2012). De gemiddelde jaarlijkse stikstof- en zwaveldeposities in deze vijf Vlaamse bossen bedroeg in 2011 respectievelijk 18,5 en 9,4 kg per hectare, terwijl buiten bos gemiddeld 11,7 kg stikstof en 5,1 kg zwaveldepositie viel (Verstraeten et al. 2012). Zowel de zwavel- als de stikstofdeposities daalden significant sinds het begin van de meetcampagne in 1994 (zie *Figuur 4*) als gevolg van de maatregelen tegen de uitstoot van ammoniakgas



Figuur 1. Bij input van protonen treden verschillende buffermechanismen in werking. Wanneer bodems sterk verzuurd zijn, belanden ze in het aluminiumbufferbereik, waarbij aluminium in oplossing komt en toxisch kan werken voor allerlei soorten. (bron: Bowman et al. 2008)



Figuur 2. Bodems onder naaldbombos zijn vaak zeer zuur als gevolg van het traag afbrekend strooisel en de hogere input van verzurende stoffen. (foto: Vilda/Jeroen Mentens)



Figuur 3. De totale input van verzurende protonen in eikenbossen van verschillende leeftijd. Hieruit blijkt dat de verzuring veroorzaakt door nutriëntenopname van bomen van veel minder belang is dan deze veroorzaakt door atmosferische zuurdeposities (bron: De Schrijver et al. 2012).

en zwaveldioxide door respectievelijk de landbouwsector en de industrie. Ter vergelijking: in Scandinavische bossen in regio's met een lage industrialisatiegraad en landbouwactiviteit varieert zowel de stikstof- als de zwaveldepositie van 0,5 tot 3,5 kg per hectare per jaar. In gras- en heide-ecosystemen in Vlaanderen gebeuren momenteel geen directe metingen van verzurende deposities (maar zie de **Box** voor een beschrijving van de benaderende bepaling door de VMM).

Naaldbossen vangen meer verzurende stoffen in dan loofbossen. Een uitgebreide vergelijking van naast elkaar gelegen naald- en loofbossen toonde aan dat naaldbossen bijna dubbel zoveel atmosferische deposities invangen als loofbossen (De Schrijver et al. 2007). Dit komt doordat naaldbomen een groot 'onderscheppend' oppervlak hebben in vergelijking met loofbomen en gedurende het hele jaar droge depositie invangen door hun altijdgroene karakter. Bovendien is de fijne naaldstructuur van naaldbomen efficiënter in het invangen van droge depositie dan bladeren. De hogere input van verzurende stoffen en de tragere afbraak van het strooisel maakt dat bodems van naaldbossen dus meestal zuurder zijn dan van loofbossen. Binnen de naald- en loofbossen bestaat er echter nog een grote variatie, veroorzaakt door de aanwezige

boomsoort en het bodemtype. De naaldbossen op de slecht gebufferde zandbodems in Vlaanderen en Nederland zijn sterk verzuurd en bevatten hoge concentraties aan uitwisselbaar aluminium.

Verdroging, bijvoorbeeld door het droogtrekken van landbouwgebieden, kan eveneens verzuring van de bodem veroorzaken. Natte heischrale graslanden zijn ecosystemen waarvan de bodem zich optimaal in het kationenuitwisselingsbufferbereik bevindt (pH > 4,5). Vele soorten van deze graslanden zijn bijzonder gevoelig voor verzuring (zie verder). De bodembuffercapaciteit wordt in deze ecosystemen op peil gehouden door de invloed van zwak gebufferd grondwater dat zorgt voor de aanvoer van basische kationen. Bij verdroging zal de aanvoer van gebufferd grondwater niet meer of in mindere mate plaatsvinden. Omdat het uitwisselingscomplex dan minder wordt aangevuld met basische kationen, verzuurt de bodem. Vooral zandbodems met weinig buffercapaciteit zijn extra gevoelig voor verdrogingsgerelateerde verzuring.

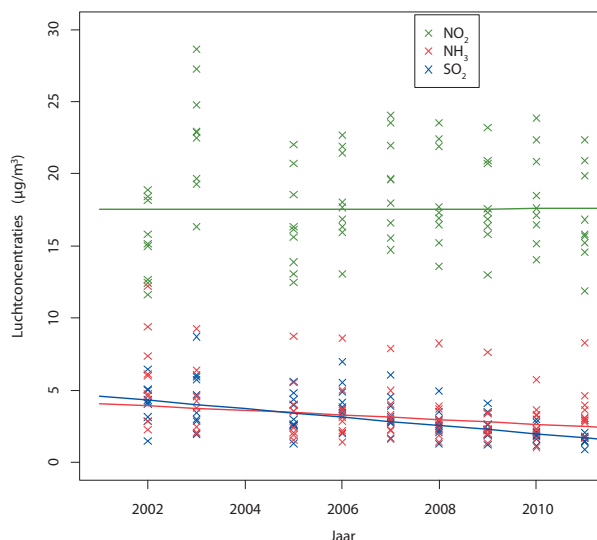
Gevolgen voor de biodiversiteit

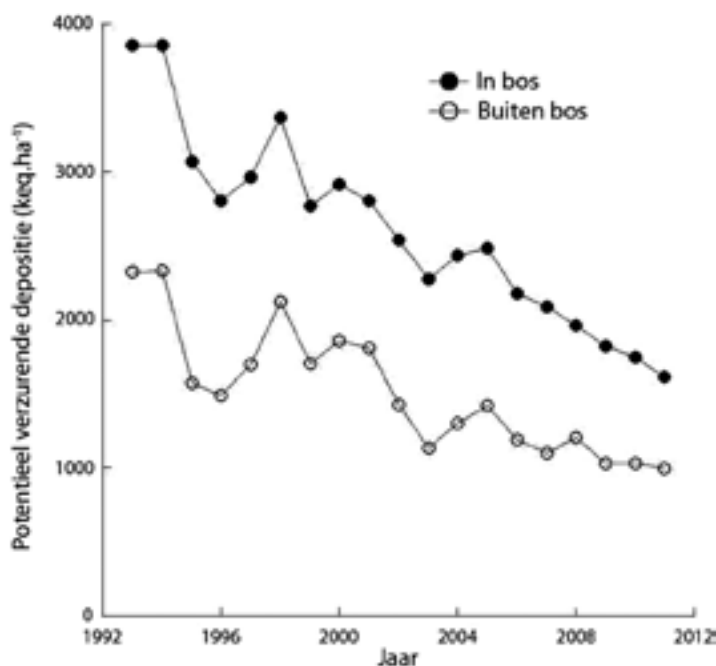
Verzuring van de bodem is nefast voor zowel boven- als ondergrondse biodiversiteit. Door overmatige deposities van

BOX: Trend in verzurende deposities

De Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) meet sinds 2002 de depositie van stikstof (N) en zwavel (S) op negen meetplaatsen in Vlaanderen. De aanvoer van N en S via regen, de zogenaamde natte depositie, wordt bepaald met neerslagcollectoren. Uit de metingen blijkt dat er in de periode 2002-2011 geen waarneembare trend is in de natte depositie van N, terwijl de natte depositie van S significant afneemt. De droge depositie van N en S wordt bepaald aan de hand van gemeten luchtconcentraties en literatuurwaarden voor de droge depositiesnelheid. De luchtconcentraties van ammoniak (NH₃) en zwaveldioxide (SO₂) dalen significant, terwijl de concentratie van stikstofdioxide (NO₂) stabiel blijft. De totale depositie (som van natte en droge depositie) van vermestende N en van potentieel verzurende N+S neemt af op zeven van de negen meetplaatsen (Staelens et al. 2012).

Tijdstrend van de jaarlijkse luchtconcentratie van NO₂, NH₃ en SO₂ voor negen meetplaatsen in Vlaanderen. De luchtconcentraties van NH₃ en SO₂ nemen significant af, terwijl de concentratie van NO₂ stabiel blijft.





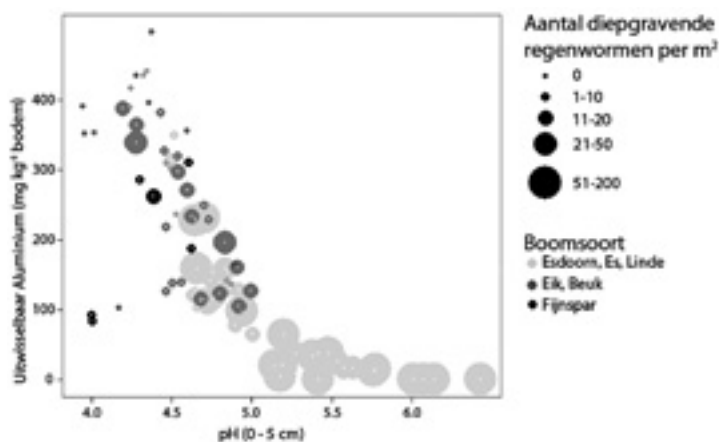
Figuur 4. Sinds 1994 worden de atmosferische deposities opgevolgd in vijf Vlaamse bossen. Zowel de stikstof- als de potentieel verzurende deposities namen significant af gedurende de meetperiode. (bron: Verstraeten et al. 2012)

stikstof en verzurende stoffen verdwijnt de kleinschalige variabiliteit in bodemcondities die vaak interessant is voor de soortendiversiteit in ecosystemen. Ook leidt dit ertoe dat de generalisten gaan overheersen en dat specialisten verdwijnen (Dumortier et al. 2005). Toenemende verzuring gaat gepaard met toename van de aluminiumconcentraties in de bodemoplossing, wat toxisch is voor vele soorten, en veroorzaakt verschuivingen in de nutriëntenverhoudingen. Atmosferische stikstofdeposities veroorzaken zowel verzuring als vermessing, welke beide een rol spelen in het verlies aan biodiversiteit, maar dikwijls moeilijk te ontrafelen zijn. In een van de volgende artikelen in deze reeks gaan we dieper in op het effect van stikstofdeposities op de biodiversiteit. Aan de effecten van verzuring op de biodiversiteit werd al ruim aandacht besteed in verschillende natuurrapporten (zie o.a. Dumortier et al. 2001, 2003, 2005). Hier geven we een aantal voorbeelden van verschuivingen in de bovengrondse en ondergrondse

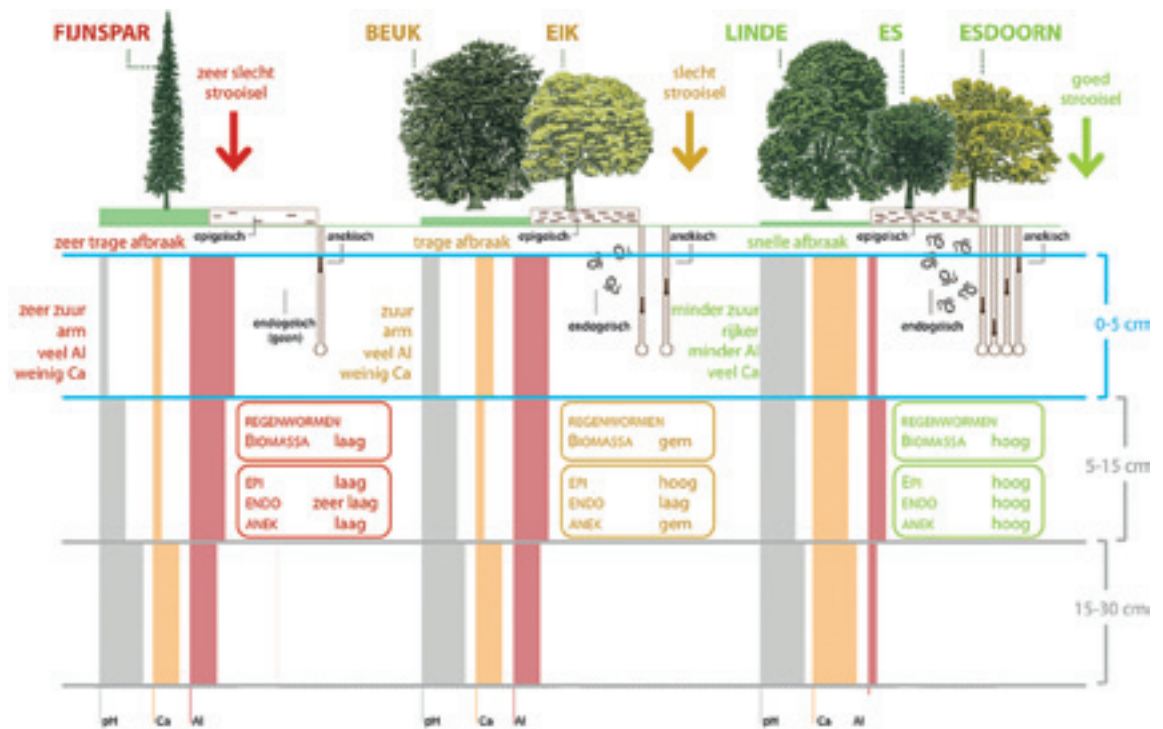
biodiversiteit ten gevolge van bodemverzuring (al dan niet gerelateerd aan het effect van vermessing) in terrestrische gematigde ecosystemen, gebaseerd op zowel grootschalige observationele als kleinschalige experimentele studies.

In het Verenigd Koninkrijk werd bij een toename van de stikstofdeposities in halfnatuurlijke graslanden een duidelijke afname vastgesteld van het aantal plantensoorten en een toegenomen dominantie van competitieve en zuurtolerante soorten (Stevens et al. 2004, 2010). Voor heidevegetaties en nutriëntenarme heischrale graslanden werd in het natuurgebied Staverden in Nederland een verband vastgesteld tussen de plantendiversiteit en de zuurtegraad van de bodem (Roem & Berendse 2000). Soorten als Klokjesgentiaan (Figuur 7), Borstelgras, Blauwe knoop, Witte snavelbies en Stekelbrem gingen sinds 1950 sterk achteruit in Nederland en werden in Staverden enkel teruggevonden op bodems met pH hoger dan 5 en met gebalanceerde nutriëntenverhoudingen. Ook in Vlaanderen werden kiemplanten van Klokjesgentiaan enkel gevonden in minder zure bodems (Vanreusel & Smets 2002). Een studie van De Graaf et al. (2009) legde de relatie tussen toenemende aluminiumconcentraties in de bodemoplossing en een afname van het aantal soorten in halfnatuurlijke heischrale graslanden. Ook in bossen werden de voorbije decennia verschuivingen in de kruidvegetatie vastgesteld. Bij heropnames van de vegetatie in o.a. Tournibus, Meerdaalwoud en de Gaume werd een significante toename vastgesteld van het aantal zuurtolerante plantensoorten (Baeten et al. 2008).

Om de effecten van verzuring op de biodiversiteit en het functioneren van ecosystemen eenduidig te kunnen vaststellen, voeren wetenschappers vaak experimenteel onderzoek uit. Door het toedienen van aluminium aan de bodemoplossing kan men nagaan wat de effecten zijn op bijvoorbeeld kieming en overleving van bepaalde soorten. De kieming van kwetsbare soorten als Blauwe knoop, Stijve ogentroost, Witte snavelbies en Klokjesgentiaan verminderde sterk in bodems waaraan aluminium werd toegediend (Roem et al. 2002). Via bekalking (toedienen van basische kationen) kan men de zuurtegraad van de bodem en de concentraties aan biobeschikbaar aluminium verlagen en de concentraties aan biobeschikbaar calcium en magnesium verhogen. Omdat slakken een hoge hoeveelheid calcium nodig hebben om te groeien en zich te vermenigvuldigen, zijn het zeer gevoelige bio-indicatoren voor calciumbeschikbaarheid, en dus ook voor bodemverzuring. In een 80-100-jarig beukenbos in Zweden stelde men in bekalakte proefvlakken een toename vast van zowel de soortenrijkdom als de dichtheid van de slakken-gemeenschap (Gardenfors 1992). De beschikbaarheid van calcium kan een effect hebben op het broedsucces van vogels. In verzuurde naaldbossen was het broedsucces van de Koolmees opvallend laag, wat veroorzaakt werd door een verminderde calciumbeschikbaarheid in het ecosysteem (Graveland et al. 1994, 1995). Om een groot aantal eieren van voldoende stevigheid te maken, hebben Koolmezen grote hoeveelheden calcium nodig, wat ze proberen te bekomen door actief op zoek te gaan naar slakkenhuizen. Een dalende slakkenpopulatie kan dus verregaande gevolgen hebben voor de hogere niveaus van het voedselweb. Een langlopend bekalkingsexperiment (het Park Grass Experiment, gestart in 1856) in halfnatuurlijke kamgraslanden in het Verenigd Koninkrijk toonde een sterke afname aan van het voorkomen van mossen wanneer de bodems zuurder werden. Bij pH-waarden lager



Figuur 5. Relatie tussen bodemzuurtegraad (pH) op de X-as en de uitwisselbare aluminiumconcentraties op de Y-as in zes bossen met zes boomsoorten (esdoorn, Es, linde, eik, Beuk, Fijnspar) in Denemarken. Vanaf een pH < 5 nemen de uitwisselbare aluminiumconcentraties significant toe, wat een invloed heeft op de populatie aan diepgravende regenwormen. De hoogste dichtheid diepgravende regenwormen werd gevonden in bestanden van Es, esdoorn en linde. (bron: Schelfhout et al. in voorbereiding)



Figuur 6. Effect van de boomsoort op de bodem op verschillende dieptes (topbodem 0-5 cm, 5-15 cm en 15-30 cm) en op de regenwormpopulatie. De verticale balkjes staan symbool voor bodempH (grijs) en uitwisselbare concentraties aan calcium (oranje) en aluminium (rood) en geven de relatieve verschillen aan tussen de soorten en bodemlagen. Samenhangend met hun levenswijze delen we regenwormen in drie groepen in: strooiselmieren, bodemwoelers en diepgravers. Fijnspar verzuurt de bodem en heeft een negatieve impact op de regenwormpopulatie, o.a. door de hoge aluminiumconcentraties. Ook in eiken- en beukenbossen is de bodem zuur en de regenwormgemeenschap niet divers. In bossen met Es, esdoorn en linde worden we significant minder bodemverzuring en goed ontwikkelde populaties van de drie groepen van regenwormen. (Bron: Schelfhout 2010)

dan 4,5 waren in dit experiment nog nauwelijks mossesoorten aanwezig (Virtanen et al. 2000).

Verstoorde verhoudingen van nitraat en ammonium in de bodemoplossing ten gevolge van vertraagde nitrificatie (omzetting van ammonium naar nitraat) kunnen eveneens nadelig zijn voor bepaalde soorten. Hoge ammoniumconcentraties in de bodemoplossing bleken verantwoordelijk voor de sterke achteruitgang van Spaanse ruiter en Valkruid in Nederland (De Graaf et al. 1998, Roelofs et al. 1996), zeldzame soorten van nutriëntenarme graslanden. De meer zuurtolerante Struikhei ondervond dan weer geen nadeel van hoge ammoniumconcentraties in de bodemoplossing.

Hoge aluminiumconcentraties zijn ook nefast voor het ondergrondse bodemleven. Arbusculaire mycorrhiza zijn schimmels die het absorberend oppervlak van het wortelstelsel vele malen kunnen vergroten, wat positief is voor de opname van nutriënten. In eikenbossen in Zweden werden minder van dit type mycorrhiza gevonden in bodems met hogere aluminiumconcentraties (Goransson et al. 2008). Vooral in nutriëntenarme bodems kan een aantasting van mycorrhiza resulteren in verminderde opname van bepaalde nutriënten (bv. fosfor). Ook regenwormen worden negatief beïnvloed door bodemverzuring. Hoewel er een aantal zuurtolerante regenwormsoorten bestaan, komen de meeste niet meer voor in zure bodems (Figuur 5). Een uitgebreide studie onder verschillende boomsoorten in Denemarken (Schelfhout 2010, zie Figuur 6) toonde een duidelijke afname aan van het aantal regenwormsoorten en de biomassa van de regenwormen onder boomsoorten die een verzurende invloed hadden op de bodem. Onder Fijnspar was de bodem zuurder en werden significant minder regenwormen aangetroffen dan onder eik en Beuk. Onder Es, esdoorn en linde was de bodemverzuring het laagst en de soortenrijkdom en biomassa aan regenwormen het hoogst.

Kan bodemverzuring voorkomen of geredieerd worden?

Zolang de uitstoot van verzurende stoffen door het verkeer, de industrie en de landbouw niet verder worden teruggedroefd, zullen bodems in natuur- en bosgebieden verzuren. Natuur- en bosbeheerders kunnen echter actie ondernemen om verzuring tegen te gaan en te remediëren. Het beheer van halfnatuurlijke graslanden en heide is meestal enkel gericht op het afvoeren



Figuur 7. De kieming van kwetsbare soorten als Klokjesgentiaan vermindert dramatisch wanneer aluminium in de bodemoplossing aanwezig is. Struikhei is meer zuurtolerant. (foto: Vidla/Jeroen Mentens)



Figuur 8. Heischrale graslanden komen voor op nutriëntenarme zand- en zandleembodems die zich in het kationenuitwisselingsbufferbereik (pH tussen 4,5 en 6) bevinden. De bodem van dit graslandje met Gevlekte orchis, Gewone margriet en Grote ratelaar in de Gulke Putten heeft een pH van 4,6 in de bovenste 10 cm. (foto: Stephanie Schelfhout)

van nutriënten door maaibeheer (verschraling). Heide komt voor op de zuurdere zandbodems die zich al in het aluminiumbufferbereik bevinden. Dikwijls gaat het hier om vrij soortenarme vegetaties die vrij goed bestand zijn tegen hoge aluminium- en ammoniumconcentraties in de bodemoplossing (De Graaf et al. 2009). Heischrale graslanden komen eveneens voor op nutriëntenarme zand- en zandleembodems die echter minder zuur zijn en zich in het kationenuitwisselingsbufferbereik (pH tussen 4,5 en 6) bevinden (Figuur 8). Soorten die door verzuring worden bedreigd hebben vaak een heel smalle ecologische amplitude (Partel et al. 2004). Voor hun herstel dient nauwkeurig aan de milieukwaliteit te worden gesleuteld (Dumortier et al. 2005). Door een eenvoudige analyse van de bodemzuurtegraad kan ingeschat worden in welk bufferbereik de bodem zich bevindt. Het beslissen om over te gaan tot effectgerichte maatregelen als plaggen (Figuur 9) of bekalken van bodems vereist echter wetenschappelijk advies en opvolging. Plaggen is een maatregel die de bovenste verzuurde bodemlaag verwijdert (Dumortier et al. 2003). Door een plagbeheer verlaagt ook het maaiveld, wat in sommige percelen de invloed van bufferend grondwater kan verhogen. Anderzijds wordt door plaggen een belangrijke hoeveelheid bodemorganisch materiaal verwijderd, wat vooral voor armere zandbodems nadelig is voor de buffercapaciteit. Een studie



Figuur 9. Kleinschalig plaggen is een effectieve vorm van beheer om de biodiversiteit van vergraste heide te doen toenemen (Hoge Veluwe). Het beslissen om over te gaan tot effectgerichte maatregelen als plaggen of bekalken van bodems vereist wetenschappelijk advies en opvolging. (foto: Vilda/Lars Soerink)

van 86 plagplekken in vochtige heiden in België toonde aan dat in 60% van de gevallen de pH lager ligt dan 4,0. Na plaggen daalt de pH meestal nog verder van 4 naar 3,7 (Sansen & Koedam 1996). Het natuurrapport van 2003 geeft verder nog aandacht aan het effect van plaggen op de kieming van Klokjesgentiaan (Dumortier et al. 2003). Vergelijkend onderzoek toonde aan dat er nauwelijks tot geen Klokjesgentiaan kiemen op plagplekken waar de bodem-pH lager is dan 4,2 (Vanreusel & Smets 2002). Alleen waar invloed is van kalkrijk, al dan niet gebiedsvreemd, water werden hogere pH's opgemeten en kiemden Klokjesgentiaan. Plaggen levert dus niet altijd het verhoopte effect op. De studie van Dorland et al. (2004) toont dat op geplagde percelen de omzetting van ammonium naar nitraat (nitrificatieproces) vertraagt (Van Breemen & Van Dijk 1988), waardoor meer ammonium dan nitraat voorkomt in de bodemoplossing, wat nadelig is voor de biodiversiteit (zie boven).

Als de bodems te zuur zijn kan men via bekalking (het toevoegen van zuurbindende stoffen als calciumcarbonaat en magnesiumcarbonaat, bv. in de vorm van dolomietkalk) het uitwisselingsbufferbereik aanvullen met basische kationen (magnesium en calcium) en daardoor het vrijkomen van aluminium tegengaan. Zandige bodems kan men best bekalken door op regelmatige basis kleinere dosissen toe te dienen. Daardoor kan het toegevoegde calcium en magnesium beter worden vastgehouden door de bodem en is de pH-stijging niet te drastisch. Bekalking is echter niet altijd zinvol en kan ook nadelig zijn. Een te grote stijging van de bodem-pH stimuleert immers de diversiteit en de abundantie van het bodemleven wat leidt tot versnelde afbraak van het organisch materiaal. Voornamelijk in arme zandbodems is de fractie organisch materiaal in de bodem bepalend voor de kationenuitwisselingscapaciteit van de bodem. Mitigerende maatregelen zoals bekalken moeten echter worden gezien als tijdelijke maatregelen met het oog op het behoud van kwetsbare soorten of vegetaties en moeten gericht zijn op het overbruggen van de periode tot de verzurende deposities dalen (Dumortier et al. 2005). De studie van Dorland et al. (2004) toont aan dat een combinatie van wetenschappelijk voorbereid bekalken (eventueel van het inzijsgebied) en plaggen kan overwogen worden om geschikte condities te creëren voor het kiemen en vestigen van kwetsbare soorten van natte en droge heide en heischraal grasland.

Voor natte heischrale graslanden kan het herstellen van de hydrologie dikwijls soelaas brengen om bodemverzuring tegen te gaan. De aanvoer van basenrijk grondwater kan verzuring tegengaan, maar de beheerder moet hierbij zekerheid hebben dat het grondwater van goede kwaliteit is en er bijvoorbeeld geen vermestende voedingsstoffen als nitraten en fosfaten aangevoerd worden. Bij het beheer van graslanden wordt dus best gestreefd naar een gecombineerde aanpak waarbij zowel verzuring als vermesting worden tegengegaan. Voor graslandtypes die van nature voorkomen op de rijkere en beter gebufferde bodems die minder gevoelig zijn voor bodemverzuring, kan het beheer voornamelijk gericht zijn op verschraling.

In bosgebieden kunnen beheerders de input van verzurende stoffen verminderen door naaldbossen om te vormen naar loofbossen. Verder speelt ook de kwaliteit van het blad- en naaldstrooisel een belangrijke rol, waarbij naaldbomen te vermijden zijn en loofboomsoorten met snel afbrekend strooisel, zoals Es, populier, linde en kers, aan te bevelen zijn. Het aanplanten van Es is momenteel wel problematisch ten gevolge van de esenziekte. Ook de aanwezigheid van een struiklaag met goede

strooiselkwaliteit (lijsterbes, Hazelaar) is een meerwaarde. In extreem verzuurde bossen kan men eveneens overwegen om te bekalken. Ook hier dient men bekalking echter voorzichtig aan te pakken. Bij te hoge dosissen leidt de forse toename van de bodemfauna tot extreem snelle afbraak van het strooiselpakket in bossen, waarbij hoge concentraties aan nitraat gevormd worden en basische kationen verloren kunnen gaan door uitspoeling naar het grondwater of diepere bodemlagen.

Conclusie

Hoewel de uitstoot van verzurende stoffen de voorbije jaren significant daalde, is het verzuringsprobleem niet van de baan. Zowel antropogene als natuurlijke factoren veroorzaken

bodemverzuring. Vooral het in oplossing gaan van aluminium en verstoorde nutriëntenverhoudingen blijken een knelpunt te zijn voor zowel de boven- als ondergrondse biodiversiteit en bijgevolg voor het functioneren van ecosystemen. Bij het beheer van graslanden en heide wordt best gestreefd naar een gecombineerde aanpak waarbij zowel verzuring (via een combinatie van milde bekalking, plagbeheer en herstel van de hydrologie) als vermesting (via verschrallingsbeheer) worden tegengegaan. In bossen kunnen beheerders door de juiste boomsoortenkeuze de verzuring milder en vertragen. Voor extreem verzuurde bosbodems kan een bekalking overwogen worden, maar dit moet omzichtig en met voldoende voorkennis uitgevoerd worden.

Summary:

DE SCHRIJVER A., WUYTS K., SCHELFHOUT S., STAELENS J., VERSTRAETEN G. & VERHEYEN K. 2012. ACIDIFICATION OF TERRESTRIC ECOSYSTEMS. CAUSES, REMEDIES AND SOLUTIONS FOR BIODIVERSITY. *NATUUR.FOCUS* 11(4): 136-143 [IN DUTCH]. Although the emissions of acidifying pollutants decreased significantly during the past decades, soil acidification is still an important problem affecting the biodiversity in nature and forest areas. We discuss that both anthropogenic and natural factors induce soil acidification. Aboveground and belowground biodiversity is affected by high aluminium concentra-

tions in the soil solution and disturbed nutrient ratios. For management of (semi-)natural grasslands, especially the *Nardus* grasslands on less buffered and poor sandy soils, nature managers can best focus on a combined approach in which acidification is counteracted by a combination of moderate liming, sod cutting and restoration of the hydrology, and nutrients are removed by a practice of mowing and removal of hay. In forests, managers can counteract soil acidification by choosing tree species with calcium-rich, fast decomposing litter. For extremely acidified forest soils, liming can be considered but this should be performed with caution and with sufficient foreknowledge on the consequences.

AUTEURS:

Kris Verheyen is professor aan het Labo voor Bos & Natuur van de Universiteit Gent. An De Schrijver is post-doctoraal onderzoeker aan hetzelfde labo. Gorik Verstraeten werkt momenteel zijn doctoraat af aan het Labo voor Bos & Natuur. Karen Wuyts en Jeroen Staelens maakten beiden een doctoraat aan hetzelfde labo, Karen is momenteel doctor assistent aan de Universiteit van Antwerpen en Jeroen is wetenschappelijk medewerker van de VMM. Stephanie Schelfhout is doctoraatsstudent aan de Hogeschool Gent/Universiteit Gent.

CONTACT:

An De Schrijver, UGent, Labo voor Bos & Natuur, Geraardsbergsesteenweg 267, 9090 Gontrode.
E-mail: An.deschrijver@UGent.be

Referenties

- Baeten L., Bauwens A., De Schrijver A., De Keersmaeker L., Van Calster H., Vandekerckhove K., Roelandt B., Beeckman H. & Verheyen K. 2008. Vegetatieveranderingen in het Meerdaalwoud (1954-2000). Hoe hebben veranderingen in beheer en toegenomen verzuring de vegetatie gewijzigd? *Natuur. Focus* 7: 4-9.
- Bowman W.D., Cleveland C.C., Halada L., Hresko J. & Baron J.S. 2008. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity. *Nature Geoscience* 1: 767-770.
- De Graaf M.C.C., Bobbink R., Roelofs J.G.M. & Verbeek P.J.M. 1998. Differential effects of ammonium and nitrate on three heathland species. *Plant Ecology* 135: 185-196.
- 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: 2191-2201.
- De Schrijver A., De Frenne P., Staelens J., Verstraeten G., Muys B., Vesterl L., Schelfhout S., Van Nevel L., De Neve S. & Verheyen K. 2012. Tree species traits cause divergence in human-induced soil acidification during four decades of post-agricultural forest development. *Global Change Biology*, 18, 1127-1140.
- De Schrijver A., Geudens G., Augusto L., Staelens J., Mertens J., Wuyts K., Gielis L. & Verheyen K. 2007. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia* 153: 663-674.
- De Schrijver A., Mertens J., Geudens G., Staelens J., Campforts E., Luysaert S., De Temmerman L., De Keersmaeker L., De Neve S. & Verheyen K. 2006. Acidification of forested podzols in North Belgium during the period 1950-2000. *Science of the Total Environment* 361: 189-195.
- Dorland E., van den Berg L.J.L., van de Berg A.J., Vermeer M.L., Roelofs J.G.M. & Bobbink R. 2004. The effects of sod cutting and additional liming on potential net nitrification in heathland soils. *Plant & Soil* 265: 267-277.
- Dumortier M., De Schrijver A., Boeye D. & Bauwens, B. 2001. #5.4 Verzuring. In: Kuijken, E., Boeye, D., De Bruyn, L., De Roo, K., Dumortier, M., Peymen, J., Schneiders, A., van Straaten, D. & Weyembergt, G. (Eds.). *Natuurrapport 2001. Toestand van de natuur in Vlaanderen: cijfers voor het beleid. Mededeling van het Instituut voor Natuurbehoud, Brussel.*
- Dumortier M., De Schrijver A., Denys L. & Van Reusel W. 2003. #20. Verzuring. In: Dumortier M., De Bruyn L., Peymen J., Schneiders A., Van Daele T., Weyembergt G., van Straaten D. & Kuijken E. (Eds.). *Natuurrapport 2003. Toestand van de natuur in Vlaanderen: cijfers voor het beleid. Mededeling van het Instituut voor Natuurbehoud, Brussel.*
- Dumortier M., Genouw G., Neiryck J., Overloop S., Van Avermaet P., De Schrijver A., Devlaeminck R. 2005. # 19. Verzuring. In: Kuyken E., Boeye D., De Bruyn L., De Roo K., Dumortier M., Peymen J., Schneiders A., van Straaten D. & Weyembergt G. (Eds.). *Natuurrapport 2005. Toestand van de natuur in Vlaanderen: cijfers voor het beleid. Mededeling van het Instituut voor Natuurbehoud, Brussel.*
- Gardenfors U. 1992. Effects of artificial liming on land snail populations. *Journal of Applied Ecology* 29: 50-54.
- Horansson P., Olsson P.A., Postma J. & Falkengren-Grerup U. 2008. Colonisation by arbuscular mycorrhizal and fine endophytic fungi in four woodland grasses – variation in relation to pH and aluminium. *Soil Biology and Biochemistry* 40: 2260-2265.
- Graveland J. 1995. The request for calcium: calcium limitation in the reproduction of forest passerines in relation to snail abundance and soil acidification. Proefschrift, Rijksuniversiteit Groningen.
- Graveland J., van der Wal R., van Balen J.H. & van Noordwijk A.J. 1994. Poor reproduction in forest passerines from decline of snail abundance on acidified soils. *Nature* 368: 446-448.
- Partel M., Helm A., Ingerpuu N., Reier U. & Tuvi E.L. 2004. Conservation of Northern European plant diversity: the correspondence with soil pH. *Biological Conservation* 120: 525-531.
- Roelofs J.G.M., Bobbink R., Brouwer E. & De Graaf M.C.C. 1996. Restoration ecology of aquatic and terrestrial vegetation on noncalcareous sandy soils in The Netherlands. *Acta Botanica Neerlandica* 45: 517-541.
- Roem W.J. & Berendse F. 2000. Soil acidity and nutrient supply ratio as possible factors determining changes in plant species diversity in grassland and heathland communities. *Biological Conservation* 92: 151-161.
- Roem W.J., Klees H. & Berendse F. 2002. Effects of nutrient addition and acidification on plant species diversity and seed germination in heathland. *Journal of applied ecology* 39: 937-948.
- Sansen U. & Koedam N. 1996. Use of sod cutting for restoration of wet heathlands: revegetation and establishment of typical species in relation to soil conditions. *Journal of Vegetation Science* 7: 483-486.
- Schelfhout S. 2010. Tree species effect on earthworm communities in Danish and Flemish forests. Master thesis, Universiteit Gent.
- Schütt, P. 1980. Das Tannensterben, ein Umweltproblem? *Holz-Zentralblatt* 106: 545-546.
- Staelens J., Wuyts K., Adriaenssens S., Van Avermaet P., Buysse H., Van den Bril B., Roekens E., Ottoy J.-P., Verheyen K., Thas O. & Deschepper E. 2012. Trends in atmospheric nitrogen and sulphur deposition in northern Belgium. *Atmospheric Environment* 49: 186-196.
- Stevens C.J., Dise N.B., Mountford J.O. & Gowing D.J. 2004. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science* 303: 1876-1879.
- Stevens C.J., Dupré C., Dorland E., Gaudnik C., Gowing D.J., Bleeker A., Diekmann M., Alard D., Bobbink R., Fowler D., Corcket E., Mountford J.O., Vandvik V., Aarrestad P.A., Müller S. & Dise N.B. 2010. Nitrogen deposition threatens species richness of grasslands across Europe. *Environmental Pollution* 158: 2940-2945.
- Ulrich B. 1995. The history and possible causes of forest decline in central Europe, with particular attention to the German situation. *Environmental Reviews* 3: 262-276.
- Ulrich B. 1980. Die Wälder in Mitteleuropa: Messergebnisse ihrer Umweltbelastung. Theorie einer Gefährdung, Prognose ihrer Entwicklung. *Allg. Forstzeitschr.* 35: 1198-1202.
- Van Breemen N., & Van Dijk HFG. 1988. Ecosystem effects of atmospheric deposition of nitrogen in The Netherlands. *Environmental Pollution* 54: 249-274.
- Vanreusel W. & Smets M. 2002. Plagbeheer niet altijd voldoende voor het herstel van zeldzame heidesoorten. *Natuurfocus* 1: 53-55.
- Verstraeten A., Sioen F., Neiryck J., Roskams P. & Hens M. 2012. Bosgezondheid in Vlaanderen. Bosvitaliteitsinventaris, meetnet Intensieve Monitoring Bosccosystemen en meetstation luchtverontreiniging. Resultaten 2010-2011. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2012 (28). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Virtanen R., Johnston A.E., Crawley M.J. & Edwards G.R. 2000. Bryophyte biomass and species richness on the Park Grass Experiment Rothamsted, UK. *Plant Ecology* 151: 129-141.