

METHODIEKEN VOOR HERSTEL VAN VERZUURDE EN GEEUTROFIEERDE HEIDEN EN SCHRAALLANDEN

J.G.M. Roelofs, M.C.C. de Graaf, P.J.M. Verbeek & M.J.R. Cals
Werkgroep Milieubiologie, Vakgroep Oecologie,
Katholieke Universiteit Nijmegen, Toernooiveld, 6522 ED Nijmegen

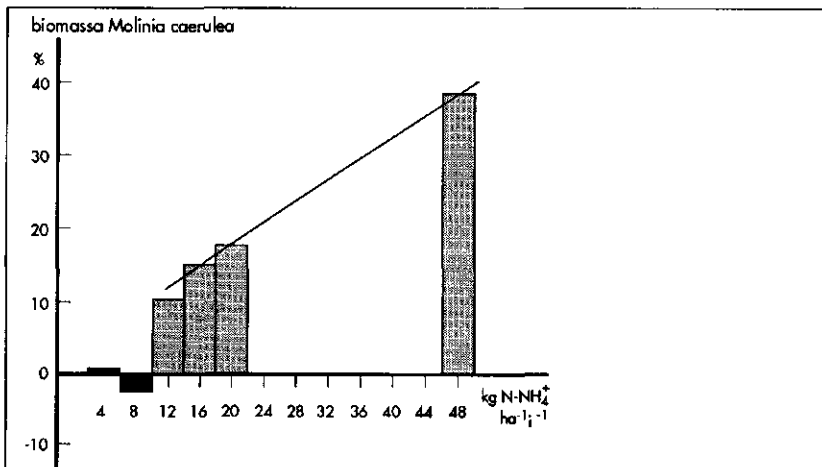
Verzuring en eutrofiëring van heiden en schraallanden

Dat eutrofiëring via atmosferische depositie een belangrijke bijdrage levert aan veranderingen die zich voltrekken in heide en schraallanden, staat wel vast. Algemeen bekend is de vergrassing van de heide. Daarnaast verdwijnen uit de iets mineraalrijkere heischrale milieus planten als gevolg van verzuring en eutrofiëring (Houdijk, 1993; Fennema, 1990; Jansen et al, dit boek).

De vergrassing van heiden wordt op zijn minst sterk versneld door atmosferische stikstofdepositie. Uit potproeven blijkt duidelijk dat bij lage depositieniveaus (8 kg N /ha/jr) Pijpestrootje (*Molinia caerulea*) zich op minerale, stikstofarme bodems niet kan handhaven. Vanaf 12 kg tot tenminste 48 kg/ha/jr is er een lineaire toename van de biomassa gedurende het eerste jaar (figuur 1).

Beheer, met als doel de vergrassing terug te dringen, moet erop gericht zijn deze eutrofiëring tegen te gaan. De beste methode in heiden is het plaggen, waarbij de organische toplaag, waarin zich het overgrote deel van de aanwezige voedingsstoffen bevindt, wordt afgevoerd. Ook maaien van de vegetatie, waarbij het maaisel wordt afgevoerd, kan leiden tot verschra-

Figuur 1
Toename van de biomassa van Pijpestrootje in relatie tot het $\text{NH}_4\text{-N}$ -depositieniveau



ling, mits het stikstofdepositieniveau niet extreem hoog is (<35 kg/ha/j; Berendse, 1988; Bobbink et al., 1992). Begrazing is een methode die vaak minder geschikt is om de eutrofiëring terug te dringen of af te remmen. Met afbranden van heiden of vergraste heiden kan weliswaar een deel van het geaccumuleerde stikstof worden afgevoerd, maar vanwege veel nadelige bijwerkingen (vernietiging fauna en zaadbank) wordt deze manier van beheer nauwelijks meer toegepast.

Wat al deze reguliere beheersmaatregelen gemeen hebben, is dat ze geen positief effect hebben op de verzuring van water en bodem. Integendeel, in natte, heischrale milieus leidt afvoer van organisch materiaal tot extra bodemverzuring. Dit komt omdat in natte, reductieve bodems veel minder van de potentieel verzurende stoffen zoals ammoniumsulfaat, worden geoxideerd tot sterke zuren. In natte, geaëreerde minerale bodems (na plaggen) gebeurt dit wel.

Verzuring en verdroging

Iets vergelijkbaars zien we bij verdroging van natte schraallanden. Door de aëring, d.w.z. de toename van de hoeveelheid zuurstof in de bodem, oxideren potentieel verzurende stoffen tot sterke zuren als salpeterzuur en zwavelzuur (van Breemen, 1975; van Dam, 1987).

In natte, reductieve bodems gebeurt het omgekeerde: zure, geoxideerde verbindingen worden gereduceerd, waarbij zuur juist geconsumeerd of buffering gegenereerd wordt.

In tabel 1 zijn de belangrijkste zuurvormende en zuurconsumerende (bufferende) biochemische processen weergegeven. Het is duidelijk, dat alle zuurvormende processen plaatsvinden onder zuurstofrijke (droge of minerale) condities en alle bufferende processen onder natte, reductieve omstandigheden.

In de praktijk betekent dit, dat na plaggen van verzuurde droge heiden en schraallanden of verdroogde natte schraallanden slechts een beperkt

Tabel 1
De belangrijkste zuurvormende (droge, oxidatieve omstandigheden) en zuurbindende (natte, reductieve omstandigheden) biochemische bodemprocessen

Zuurvormende biochemische (bodem)processen (onder aerobe, meestal droge condities)	
Sulfide oxidatie:	$H_2S + 2O_2 \Rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+$
Nitrificatie:	$NH_4^+ + 2O_2 \Rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$
Zuurconsumerende (alkaliniserende) biochemische (bodem)processen (onder anaerobe, natte condities)	
Sulfaatreductie:	$SO_4^{2-} + 2CH_2O + 2H^+ \Rightarrow H_2S + 2H_2O + 2CO_2$
Denitrificatie:	$4NO_3^- + 5CH_2O + 4H^+ \Rightarrow 2N_2 + 7H_2O + 5CO_2$

aantal zuurresistente plantesoorten in staat is zich te vestigen en te overleven. Enkele voorbeelden zijn: Struikheide (*Calluna vulgaris*) en Bochtige smele (*Deschampsia flexuosa*) in droge heiden, en Dopheide (*Erica tetralix*), Witte snavelbies (*Rhynchospora alba*), Kleine zonnedauw (*Drosera intermedia*), Knolrus (*Juncus bulbosus*) en Pijpestrootje (*Molinia caerulea*) in vochtige terreinen.

Al deze zuurresistente soorten zijn vrij algemeen tot zeer algemeen en komen niet voor op de Floron-rode-lijst van bedreigde plantesoorten. Plaggen van verzuurde heiden en schraallanden is dus weliswaar een goede beheermethode om vergrassing tegen gaan, het biedt echter weinig perspectief voor bedreigde plantesoorten. Zoals bekend is, komt een groot deel van de bedreigde plantesoorten uit onze flora voor in droge en natte heiden en schraallanden (zie V. Westhoff, dit boek). Als we nu kijken naar de pH-waarden van bodems op plaatsen waar veel van deze soorten voorkomen, dan blijken deze hoger te zijn dan die van terreinen waar deze soorten ontbreken en alleen soorten als Struikheide of Pijpestrootje voorkomen.

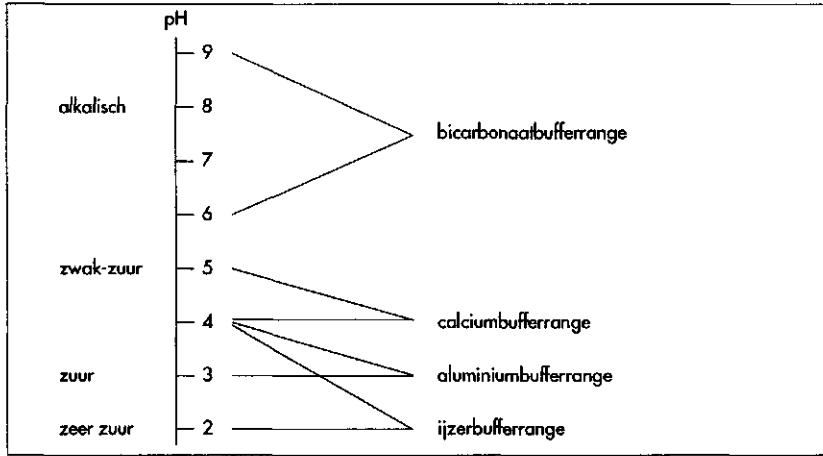
In tabel 2 is duidelijk te zien dat de gemiddelde pH-waarde van bodems waar geen bijzondere plantesoorten meer voorkomen, lager of gelijk is aan pH 4,2, terwijl in terreinen met bedreigde plantesoorten deze waarde hoger of gelijk is aan pH 4,5. Van de onderzochte soorten uit matig mineraalrijke heischrale milieus is er geen enkele die een pH-waarde heeft hoger of gelijk aan pH 5,5. Dit betekent dat al deze soorten uitsluitend worden aangetroffen in bodems die zich in de kationuitwisselings-bufferrange (of calciumbufferrange) bevinden (figuur 2).

Neutrale tot alkalische bodems bevinden zich in de carbonaatbufferrange. Hier wordt zuur geneutraliseerd doordat kalk (calciumcarbonaat) wordt omgezet in kooldioxide en calciumsulfaat (gips). Planten die voorkomen in

Tabel 2
Het voorkomen van plantesoorten uit het heischrale milieu in relatie tot de bodem pH

Soort	pH(H ₂ O)	
	gemiddeld	min-max
Verfbrem (<i>Genista tinctoria</i>)	5,5	4,1 - 7,6
Wilde tijm (<i>Thymus serpyllum</i>)	5,2	4,7 - 5,6
Heidekartelblad (<i>Pedicularis sylvatica</i>)	4,9	4,2 - 5,6
Gevlekte orchis (<i>Dactylorhiza maculata</i>)	4,8	4,4 - 5,6
Moeraswolfsklauw (<i>Lycopodium inundatum</i>)	4,7	4,4 - 5,6
Liggende vleugeltjesbloem (<i>Polygala serpyllifolia</i>)	4,6	4,1 - 5,7
Wolverlei (<i>Arnica montana</i>)	4,5	4,0 - 5,0
Klokjesgentiaan (<i>Gentiana pneumonanthe</i>)	4,4	4,0 - 5,0
Pijpestrootje (<i>Molinia caerulea</i>)	4,2	3,8 - 4,7
Struikheide (<i>Calluna vulgaris</i>)	4,1	4,0 - 4,3

Figuur 2
Belangrijke
pH-bufferranges
in bodems

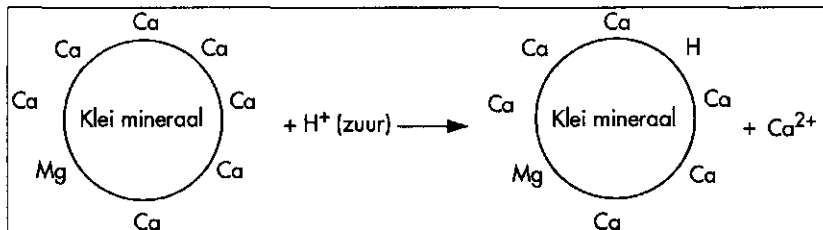


bodems in deze bufferrange kennen we o.a. uit het rivierengebied, beekdalen, kalkrijke duinen en kalkgraslanden. Ook akkeronkruiden vallen in deze categorie.

Als alle (bi-)carbonaat door zuur omgezet is in CO_2 daalt de pH tot een waarde rond pH 5,5 à 6,0. Tussen pH 6,5 en 5,5 is er in principe een buffering door verwerking van silicaten (silicaatbufferrange), maar deze verwerking verloopt zo traag, dat de pH onder de huidige omstandigheden doorschiet naar de kationuitwisselingsbufferrange. Hoe deze buffering werkt is schematisch weergegeven in figuur 3.

Kleimineralen en humusdeeltjes hebben aan het oppervlak een zwak negatieve lading. Hierdoor trekken ze positief geladen ionen zoals calcium en magnesium aan. Is dit zogenaamde bodemadsorptiecomplex geheel bezet met basische kationen als calcium en magnesium, dan spreken we van een base-verzadigd systeem. Komt er zuur in de bodem (figuur 3) dan wordt calcium of magnesium van het bodemadsorptiecomplex verdrongen en komen er zuurionen voor in de plaats. Het calcium wordt ingewisseld tegen zuur en dus werkt calcium als een zuurbuffer. Dit gaat door tot (bijna) alle basische kationen van het adsorptiecomplex zijn verdrongen. Door de pH-daling die daarop volgt gaat amorf aluminium in oplossing. Op dat moment

Figuur 3
Het mechanisme
van zuurbuffering
van bodems
in de kationuitwisselingsbufferrange



fungeert aluminium als zuurbuffer en spreken we van een bodem in de aluminiumbufferrange. Deze ligt globaal tussen pH 4,5 en pH 2,8. Na aluminium gaat tenslotte ijzer in oplossing en spreken we van de ijzerbufferrange.

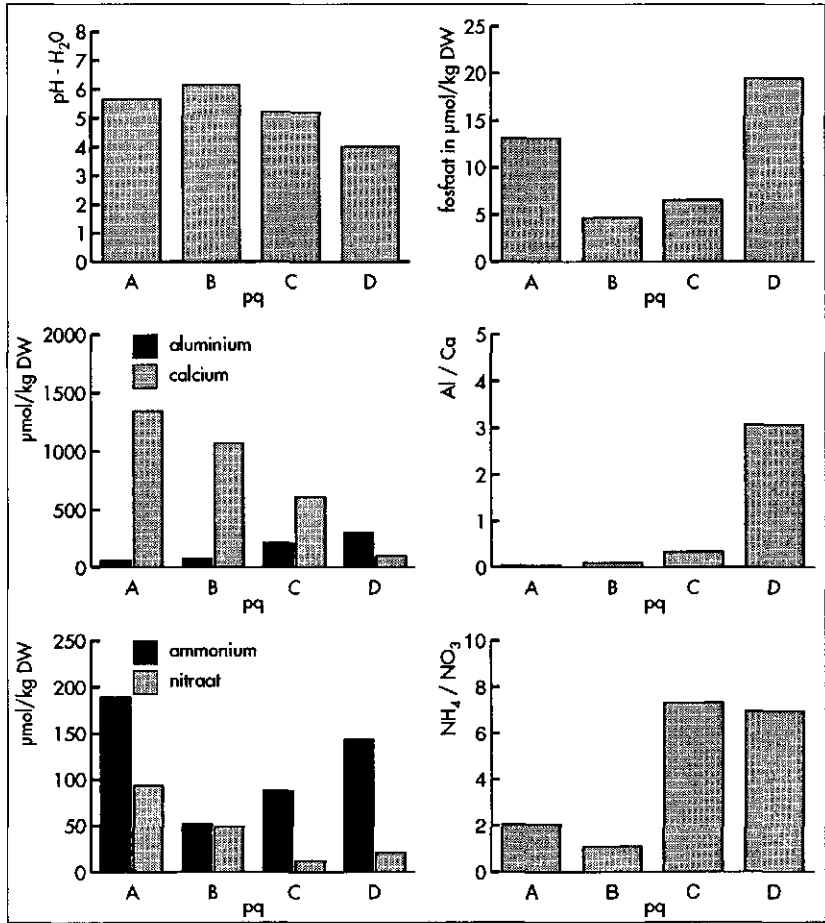
De belangrijkste overgang waarmee we te maken hebben bij verzuring van soortenrijke, natte en droge heischrale milieus is die van de kationuitwisselingsbufferrange naar de aluminiumbufferrange. Uit tabel 2 bleek al dat alle onderzochte bedreigde plantesoorten voorkomen bij pH-waarden die doorgaans worden gemeten in bodems in de kationuitwisselingsbufferrange. Uit onderzoek van Houdijk (1993) is gebleken, dat deze soorten in te delen zijn in een aantal klassen. Zo komen Wilde tijm (*Thymus serpyllum*), Verfbrem (*Genista tinctoria*), Parnassia (*Parnassia palustris*) en Gevlekte orchis (*Dactylorhiza maculata*) voor op bodems met een hoge basenverzadiging en soorten als Klokjesgentiaan (*Gentiana pneumonanthe*) en Valkruid (*Arnica montana*) bij een relatief lage basenverzadiging. Geen van deze soorten komt echter voor op bodems die zich in de aluminiumbufferrange bevinden.

Voor een adequaat beheer is het noodzakelijk te weten welke de sturende processen zijn achter zo'n verandering in vegetatie. Immers, bij verzuring daalt niet alleen de pH, ook dalen de basenverzadiging en het calciumgehalte en treden er verschuivingen op in de stikstof- en fosfaathuishouding en stijgt het aluminiumgehalte. Een goed beeld van correlaties tussen de vegetatiesamenstelling en het abiotisch, fysisch-chemisch bodemklimaat is te verkrijgen door metingen uit te voeren in transecten, waarbij sprake is van duidelijke overgangen in vegetatiesamenstelling en vegetatiestructuur. Als voorbeeld worden hier enkele transecten besproken (van laag naar hoog) in het Breklenkampseveld en Punthuizen, twee uitstekend beheerde natte schraallanden in eigendom van respectievelijk Het Overijssels Landschap en Staatsbosbeheer.

In figuur 4 zijn de fysisch-chemische parameters uitgezet in een transect van laag naar hoog, waarbij sprake is van een afnemende invloed van kalkrijk grondwater (zie ook Jansen et al.; dit boek). In zone A, het laagste deel, reikt het grondwater gemiddeld 322 dagen per jaar tot in de wortelzone. Hier ontbreken zeldzame plantesoorten en wordt de vegetatie gedomineerd door Gewone zegge (*Carex nigra*). In zone B en C reikt het grondwater gemiddeld respectievelijk 270 en 170 dagen van het jaar tot in de wortelzone, terwijl dit in zone D slechts 35 dagen per jaar het geval is.

In zone B en C komen veel bijzondere plantesoorten voor uit de klasse der Kleine zeggen (Parvocaricetea) en het Biezenknoppen-pijpestrootje verbond (Junco-Molinion), zoals Heidekartelblad (*Pedicularis sylvatica*), Kleine valeriaan (*Valeriana dioica*), Blauwe knoop (*Succisa pratensis*) en Gevlekte orchis (*Dactylorhiza maculata*).

Figuur 4
Diverse water-extraheerbare ionen in transect 4 te Breklenkamp (gemiddelde waarden over periode 1990-1992 (n=3)). De pq's werden bij het inzetten van het experiment gekarakteriseerd door de volgende soorten:
A. Gewone zegge;
B. Gevlekte orchis;
C. Gevlekte orchis;
D. Heide



In zone D ontbreken deze soorten en komen alleen Dopheide (*Erica tetralix*), Struikheide (*Calluna vulgaris*) en Pijpestrootje (*Molinia caerulea*) voor.

Er is binnen het transect duidelijk sprake van een pH-gradiënt. De pH is het hoogst in zone B (pH=6,0), wat lager in zone C (pH=5,5) en het laagst in zone D (pH=4,2). Op grond van alleen de pH-waarden zouden bijzondere soorten te verwachten zijn in zone A, B en C. In zone A, de natste zone, ontbreken deze echter, waarschijnlijk als gevolg van het reductieve karakter (een groot deel van het jaar staat het water boven het maaiveld, zodat te weinig zuurstof de bodem kan bereiken), waardoor de beschikbaarheid van fosfaat en ammonium veel te groot is.

In zone B en C is de beschikbaarheid van voedingsstoffen het kleinst. Dit is normaal voor een zwak-zure, min of meer geaëreerde bodem. Bij ster-

ke verzuring (D) neemt de beschikbaarheid van fosfaat weer sterk toe. Ook is er sprake van accumulatie van ammonium als gevolg van een verminderde nitrificatie (omzetting van ammonium en nitraat), waardoor de verhouding tussen ammonium en nitraat, de NH_4/NO_3 ratio, sterk stijgt. Ook de concentratie vrij aluminium stijgt, terwijl de concentratie calcium sterk afneemt (D); als gevolg daarvan stijgt de Al/Ca ratio sterk.

Een soortgelijke situatie treffen we aan in Punthuizen, een fraai ontwikkeld blauwgrasland (figuur 5). Omdat de overgangen van laag naar hoog hier veel geleidelijker verlopen, zijn de zones waarin een bepaald vegetatietype voorkomt, vaak veel breder. Duidelijk is ook hier dat in de hele zone waar plantesoorten voorkomen uit het Biezeknoppen-Pijpestrootjeverbond (Junco-Molinion), zoals Spaanse ruiter (*Cirsium dissectum*) en Heidekartelblad (*Pedicularis sylvatica*), de pH-waarde rond 5,0 ligt en de Al/Ca-ratio laag is. Vanaf zone I is de pH gedaald naar ca. 4,0 en is de Al/Ca-ratio duidelijk verhoogd. Ook hier ontbreken weer alle bijzondere soorten uit het Biezeknoppen-Pijpestrootjeverbond en komen alleen heide en Pijpestrootje voor. Ook hier stijgen boven zone I de ammonium- en vrij-fosfaatconcentratie sterk.

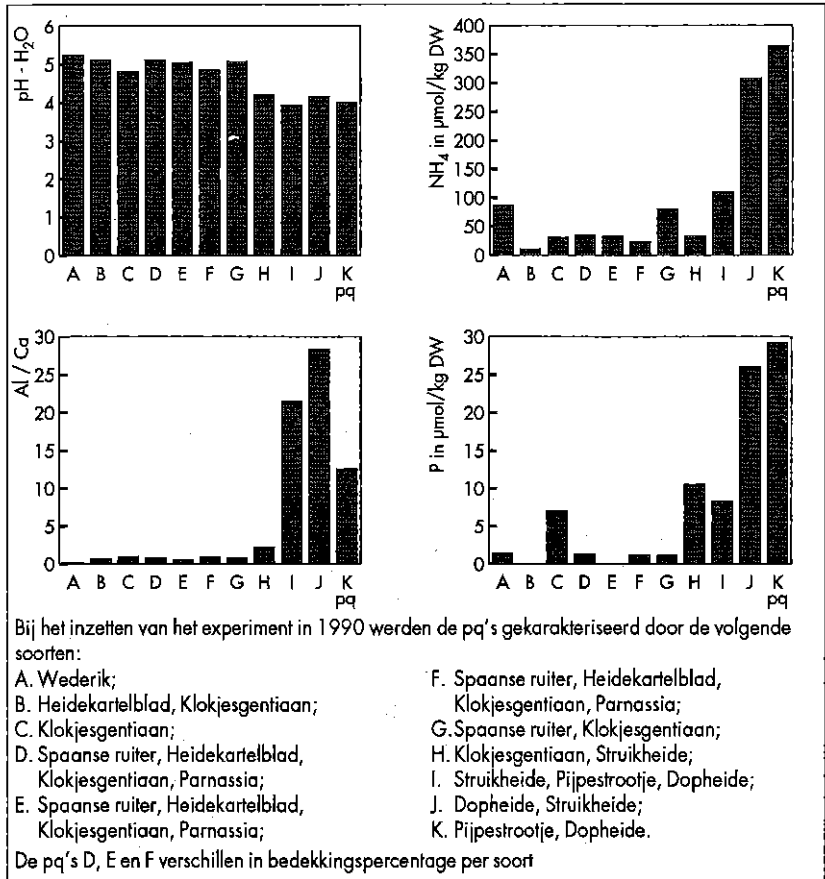
Uit het bovenstaande blijkt, dat bodemverzuring gepaard gaat met een scala aan veranderingen in het abiotisch milieu. Om compenserende maatregelen te treffen die verzuring tegengaan, is het zaak te weten welke van deze veranderde chemische parameters verantwoordelijk zijn voor de veranderingen in de vegetatie, omdat niet elke vorm van buffering dezelfde uitwerking heeft op deze bodemparameters, zoals in dit geval van buffering door kalkhoudend grondwater.

De geconstateerde eutrofiëring in de natste delen en de verzuurde drogere delen in de terreinen is, wat de beschikbaarheid van fosfaat en stikstof betreft, te bestrijden door een regulier maaibeheer en af en toe pluggen.

Deze maatregelen hebben echter geen positieve invloed op de pH, het aluminiumgehalte, de Al/Ca-ratio, ammonium en de NH_4/NO_3 -ratio. Uit figuur 4 is af te leiden, dat verhoging van de aluminiumconcentratie op zich niet nadelig hoeft te zijn, aangezien in zone C, een zone met veel bedreigde plantesoorten, de aluminiumconcentraties in het bodemvocht al fors verhoogd zijn. In deze zone is er echter nog duidelijk invloed van het calciumrijk grondwater, waardoor de calciumconcentratie hoger is dan die van aluminium en de Al/Ca-ratio dus laag.

Uit onderzoek in bossen (Ulrich, 1983; Boxman et al., 1991) was al gebleken dat calcium de plantewortels beschermt tegen het potentieel toxische aluminium. Dit blijkt ook duidelijk het geval bij kruidachtige planten uit heischrale milieus (de Graaf en Verbeek, 1993; de Graaf et al., 1993).

Figuur 5
De pH-H₂O, aluminium-calcium-ratio en de water-extraheerbare fosfaat- en ammoniumfractie in transect 5 te Punthuizen (gemiddelde waarden over periode 1990-1992 (n=3)).

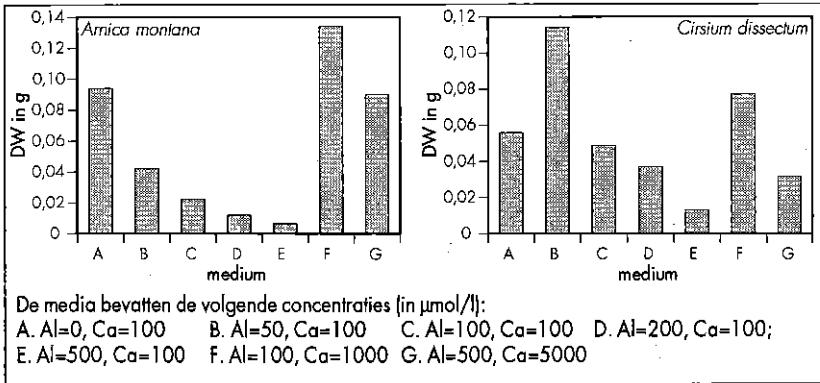


In figuur 6 is weergegeven wat het effect is van verhoogde Al/Ca-ratio's op de groei van Valkruid (*Arnica montana*) en Spaanse ruiter (*Cirsium dissectum*) in hydrocultuur.

Bij Valkruid is er een enorme afname van de biomassa met een toenemende Al/Ca-ratio. Bij een Al/Ca-ratio van 0,5 is er al een halvering van de groei ten opzichte van die bij een blanco zonder aluminium. Vanaf een ratio van 1,0 ontwikkelen de planten zich in het geheel niet meer; dit komt overeen met waarnemingen in de veldsituatie. Wordt bij een verhoging van de aluminiumconcentratie tot 100 µmol per liter de calciumconcentratie verhoogd tot 1.000 µmol per liter, dan is er weer een groei die vergelijkbaar is met de blanco situatie (vergelijk F en A). Dit betekent dus dat calcium de plant tegen het potentieel giftige aluminium beschermt, mits de absolute concentratie aluminium niet te hoog is. Voor Spaanse ruiter is het beeld vergelijkbaar, echter met dit verschil, dat deze plant bij een licht verhoogde

Figuur 6

Gemiddelde biomassa van *Arnica montana* en *Cirsium dissectum* (in gram drooggewicht (DW) per plant), opgekweekt op hydrocultuur bij verschillende aluminium- en calciumconcentraties



Al/Ca-ratio beter groeit dan op een medium zonder aluminium. Vanaf een Al/Ca-ratio van 0,5 is het beeld echter identiek aan dat van Valkruid. Uit deze experimenten kan dus geconcludeerd worden, dat niet zozeer de aluminiumconcentratie, doch veel meer de Al/Ca-verhouding bepaalt of een soort zich al dan niet kan ontwikkelen.

Over de rol van aluminium in de achteruitgang van Valkruid in het veld bestaat enige discussie. De hierboven beschreven hydrocultuurexperimenten duiden op een duidelijk toxisch effect van aluminium op Valkruidplanten. Ook correlatieve veldstudies wijzen op een verband tussen een toename van de aluminiumconcentratie in de bodem en een afname van de vitaliteit van Valkruidplanten (Fennema, 1990; Houdijk, 1993). Andere onderzoekers (Pegtel, 1987; Van Dobben, 1991) vinden in hydrocultuurexperimenten met Valkruid echter minder effect van aluminium op de ontwikkeling van de planten. Mogelijk kan dit verschil verklaard worden door het aangeboden voedingsmedium aan de planten: Pegtel gebruikte in zijn experiment een medium met zeer hoge nutriëntenconcentraties. De Graaf en Verbeek daarentegen, maakten gebruik van een nutriëntarm-medium, dat veel overeenkomst vertoont met de samenstelling van het bodemvocht in natuurlijke Valkruid-populaties. Aluminium beïnvloedt de wortelgroei van Valkruid; zowel Pegtel als De Graaf & Verbeek vonden dat planten die op aluminium waren opgekweekt een verstoorde wortelgroei vertoonden. In nutriëntrijke media hebben planten echter slechts een klein wortelstelsel nodig om de spruit van voedsel te voorzien en groei daarvan te consolideren. Waarschijnlijk is het door Pegtel gebruikte medium rijk genoeg aan voedingsstoffen om de plant, ondanks de aantasting van het wortelstelsel, door te laten groeien. In het experiment van De Graaf en Verbeek is dit niet het geval.

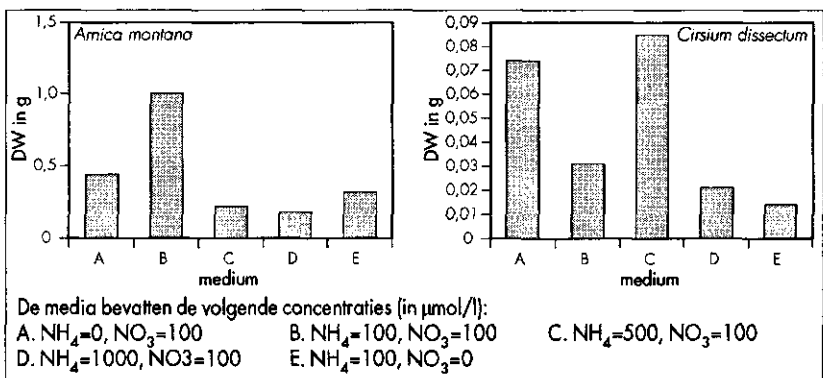
Door bodemverzuring neemt, zoals eerder vermeld, de nitrificatie af. Als gevolg van stikstofmineralisatie en hoge ammoniumdepositie stijgt niet alleen

de ammoniumconcentratie, maar vanwege de lagere nitrificatie daalt ook de nitraatconcentratie. Het gevolg is dat de NH_4/NO_3 -ratio sterk stijgt.

Uit onderzoek van Houdijk (1993) en de Graaf et al. (1993) blijkt, dat bedreigde planten uit heischrale milieus aangepast zijn aan nitraatvoeding of een gebalanceerde nitraat/ammonium-voeding. Bij een verhoging van de NH_4/NO_3 -ratio neemt de groei af of sterven de planten af (figuur 7). Dit geldt voor soorten als Valkruid, Spaanse ruiter en Wilde tijm uit natte en droge schraallanden, maar ook voor amfibische planten als Oeverkruid (*Littorella uniflora*) (Roelofs et al., 1984).

Ook bij bomen is ditzelfde fenomeen waargenomen (Boxman et al., 1991). Het blijkt dat ammonium-geadapteerde planten zoals heide, Knolrus en zuurtolerante grassoorten bij opname van ammonium geen problemen krijgen met de opname van andere nutriënten zoals kalium. Nitraat geadapteerde planten daarentegen verliezen in een ammoniumrijk milieu het vermogen om nitraat op te nemen. Nitraat geadapteerde planten bezitten namelijk een enzym, nitraatreductase, zodat in de plant het stikstof gereduceerd kan worden, een noodzakelijke stap voor de vorming van aminozuren. Ammonium daarentegen hoeft niet gereduceerd te worden, waardoor in een ammoniumrijk milieu het enzym nitraatreductase geïnactiveerd wordt en ook de aanmaak van nieuw enzym afgeremd wordt. Nitraatopname is echter essentieel voor deze planten omdat de opname van nitraat, een ion met een negatieve lading, gecompenseerd wordt door opname van positief geladen voedingsstoffen als kalium (K^+). Ammoniumopname (NH_4^+) gaat gepaard met afgifte van positief geladen ionen als kalium, of op zijn minst met een vermindering van de opname door een competitieve remming, d.w.z. dat ammonium concurreert met kalium om opname. De plantewortels kunnen geen verschil maken tussen ammonium en kalium, hetgeen betekent dat een toename van de verhouding tussen ammonium en kalium in het bodemvocht zal leiden tot een verhoogde opname van

Figuur 7
Gemiddelde biomassa van *Arnica montana* en *Cirsium dissectum* (in gram drooggewicht (DW) per plant), opgekweekt op hydrocultuur bij verschillende ammonium- en nitraatconcentraties

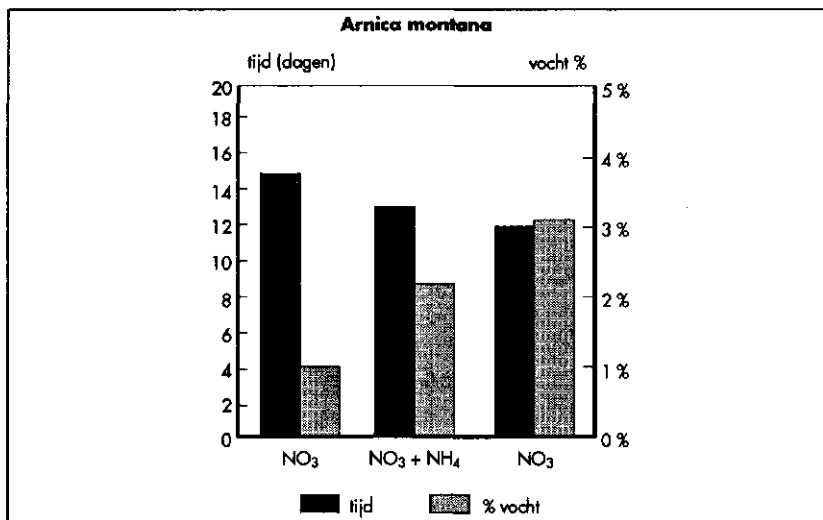


ammonium in verhouding tot de opname van kalium (Boxman et al., 1986). De nitraat geadapteerde planten krijgen in een ammoniumrijk milieu dan ook last van o.a. kalium- en magnesiumgebrek, in tegenstelling tot de ammonium-geadapteerde planten. Uit dezelfde onderzoeken bleek dat de planten uit heischrale milieus wel kunnen overleven in sterk verzuurde bodems, mits de Al/Ca- en de NH_4/NO_3 -ratio's niet verstoord zijn.

Combinatiestress

Uit de experimenten met aluminium en ammonium is gebleken dat er, naast het effect op de scheut, belangrijke effecten zijn op de wortels. Deze worden bij verhoging van de Al/Ca-verhouding en de NH_4/NO_3 -verhouding niet alleen aangetast, maar ze worden ook aanzienlijk minder lang (oppervlakkige worteling) en minder omvangrijk, met als gevolg dat de planten in de toch al verdrogende en verzurende natuurterreinen nog eens extra gevoelig worden voor droogte. Dit blijkt duidelijk uit een verdrogingsexperiment (potproeven) met Valkruid, waarbij onderzocht is na hoeveel dagen en bij welk vochtgehalte van de bodem de planten verwelken (figuur 8). De in bodems met nitraatvoeding opgekweekte planten blijken pas te verwelken na vijftien dagen droogte en een vochtgehalte in de bodem van slechts 1%. Planten, gekweekt in een bodem die is behandeld met ammonium plus nitraat, nemen een intermediaire positie in, terwijl planten, gekweekt met uitsluitend ammonium als stikstofbron, het eerst verwelken, nl. na 12 dagen bij een vochtgehalte van meer dan 3% (Verbakel, 1993).

Figuur 8
Het verschil in tijd en vochtpercentage waarbij Valkruid verwelkte, afhankelijk van het voedingsmedium waarbij de planten zijn opgekweekt: nitraat (NO_3), nitraat en ammonium ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4$) of alleen ammonium (NH_4)



Samenvatting

Naast eutrofiëring spelen de aan verzuring gekoppelde uitspoeling van calcium en het oplossen van aluminium, en de daardoor verhoogde Al/Ca-ratio in de bodem, een belangrijke rol bij het verdwijnen van bedreigde plantesoorten uit heischrale milieus, evenals de sterk verhoogde NH_4/NO_3 -ratio als gevolg van de geremde nitrificatie, verhoogde stikstofmineralisatie en atmosferische ammoniumdepositie.

Maatregelen tegen verzuring en eutrofiëring in heide en schraallanden

Het zal duidelijk zijn dat maatregelen waardoor alleen de eutrofiëring wordt bestreden niet altijd voldoende zijn. In de praktijk blijkt dan ook dat plagen in sterk verzuurde en vergraste heidemilieus weliswaar de ontwikkeling van heide stimuleert, doch dat de verdwenen bedreigde plantesoorten niet terugkomen.

Naast de eutrofiëring moet in veel gevallen ook de verzuring bestreden worden. Het verdient de voorkeur om dit op een zo natuurlijk mogelijke manier te doen, bijvoorbeeld door in verdroogde situaties de oude hydrologische condities te herstellen. In van nature droge, voorheen soortenrijke, heischrale milieus is dit echter niet mogelijk en is de enige mogelijkheid om de verzuring te bestrijden het toedienen van kalkhoudend materiaal.

Op grond van de bovenstaande gegevens kan een aantal typen terreinen worden onderscheiden, die alle geëutrofiëerd zijn:

1. Verdroogde en verzuurde, voorheen soortenrijke, natte heischrale milieus;
2. Verzuurde, voorheen soortenrijke, droge heischrale milieus;
3. Niet verzuurde, voorheen soortenrijke, heischrale milieus;
4. Zure, vergraste, voorheen reeds soortenarme, heischrale milieus.

Hieronder volgt een bespreking van beheersmaatregelen in de verschillende terreintypen.

1. Verdroogde en verzuurde, voorheen soortenrijke, natte heischrale milieus

Of maatregelen in bepaalde terreinen kansrijk zijn, is vaak af te leiden uit de aanwezigheid van indicator-plantesoorten.

Kansrijk zijn ontwaterde heischrale milieus waar in greppels, poelen en ontwateringssloten planten voorkomen die (licht) kalkhoudend grondwater indiceren, bijvoorbeeld:

- Duizendknoopfonteinkruid (*Potamogeton polygonifolius*)
- Drijvende waterweegbree (*Luronium natans*)
- Vlottende waterbies (*Scirpus fluitans*)
- Grote waterranonkel (*Ranunculus peltatus*)
- Egelboterbloem (*Ranunculus flammula*)

Een voorwaarde is echter, dat zodanige hydrologische aanpassingen mogelijk zijn, dat tenminste in een deel van het terrein dit grondwater voor kortere of langere termijn stijgt tot aan het maaiveld.

Ook is het, vanwege ophopingen van organisch materiaal, in de meeste gevallen gevallen nodig om vóór het ingrijpen in de hydrologie het terrein of terreindelen te plaggen.

Kansarm zijn ontwaterde systemen met in greppels en poelen uitsluitend kalkarm, zuur grondwater indicerende soorten, bijvoorbeeld:

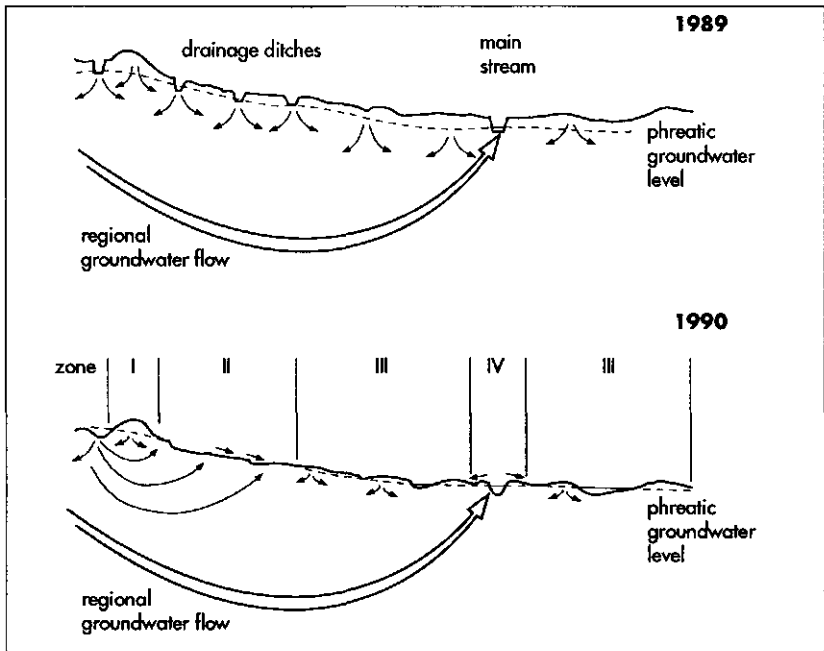
- Waterveenmos (*Sphagnum cuspidatum*)
- Knolrus (*Juncus bulbosus*)

Een voorbeeld van een kansrijk project is het E.G.M.-object 'Het verbrande bos' in de gemeente Staverden, in eigendom en beheer van Het Gelders Landschap. Dit voormalige, natte heideschraalland is in het verleden door het graven van vele ontwateringsgreppels en sloten ontwaterd om zodoende bosbouw mogelijk te maken. De bomen ontwikkelden zich op de verzuurde bodem echter zeer slecht en Pijpestrootje was vóór de uitvoering van het project de allesoverheersende plantesoort. Alleen op de diepere oevers van de hoofdsloot kwamen enkele bijzondere soorten voor, zoals Fraai hertshooi (*Hypericum pulchrum*), Liggende vleugeltjesbloem (*Polygala serpyllifolia*) en Beenbreek (*Narthecium ossifragum*). In het water van de afvoersloot kwam veelvuldig Duizendknoopfonteinkruid voor.

Ook ingrijpen in de hydrologie, d.w.z. het ongedaan maken van de verdroging, is hier eenvoudig mogelijk. Op grond van de eerdere indeling kunnen we dus spreken van een potentieel kansrijk object, temeer daar het grenst aan een zeer soortenrijk, nat heischraal terrein van de gemeente Ermelo.

In figuur 9 is de hydrologische situatie weergegeven zoals die was vóór uitvoering van de maatregelen. Door de vele ontwateringsgreppels en verbindende afvoersloten reikte het grondwater nergens meer tot aan het maaiveld en het hele terrein was dan ook sterk verzuurd, met slechts een

Figuur 9
 De hydrologische situatie voor (1989) en na (1990) uitvoering van EGM in het natuurgebied 'Het Verbrande Bos' te Staverden.
 I. Inzিজzone;
 II. Kwelzone van relatief kalkrijk, lokaal grondwater;
 III. Inzিজ- en inundatiezone;
 IV. Zone met inundatie van slootwater



kleine variatie in pH. Alleen het water in de diep gelegen hoofdafvoersloot had, zoals op grond van de aanwezige vegetatie al viel te verwachten, een hogere pH.

In 1989 is het terrein geplagd en zijn de ontwateringsgreppels grotendeels dichtgegooid. In de hoofdafvoersloot zijn een tweetal stuwen met schotbalken geplaatst. Al binnen enkele weken na uitvoering van de maatregelen kwelde lokaal grondwater op in zone II (figuur 9).

Zone III wordt deels beïnvloed door grondwater. De diepe hoofdsloot (zone IV) wordt deels gevoed door lokaal, deels door regionaal grondwater. Wat meteen opvalt, is het effect op de zuurgraad. In de hoogste terreindelen (inzিজzone) is de bodem overal zuur, terwijl in de grondwater-gevoede zone II en in de lager gelegen delen van de inundatiezone de zuurgraad veel meer variatie vertoont. Er zijn vele gradiënten in het terrein met pH-waarden van relatief hoog en bijna neutraal tot zuur. De voorwaarden voor een gunstige ontwikkeling lijken dus aanwezig. In 1991, anderhalf jaar na uitvoering van de maatregelen, werden reeds 118 plantesoorten aangetroffen, waaronder een tiental Floron-rodelijst-soorten:

- Stijve moerasweegbree (*Echinodorus ranunculoides*)
- Fraai hertshooi (*Hypericum pulchrum*)
- Wijdbloeiende rus (*Juncus tenageia*)

- Moeraswolfsklauw (*Lycopodium inundatum*)
- Beenbreek (*Narthecium ossifragum*)
- Parnassia (*Parnassia palustris*)
- Liggende vleugeltjesbloem (*Polygala serpyllifolia*)
- Eenarig wollegras (*Eriophorum vaginatum*)
- Vlottende waterbies (*Scirpus fluitans*)
- Duizendknoopfonteinkruid (*Potamogeton polygonifolius*)

Het is te verwachten dat zowel het totale aantal soorten als het aantal bedreigde soorten zich in dit terrein in de komende jaren nog sterk zal uitbreiden.

2. Verzuurde, voorheen soortenrijke, droge heischrale milieus

Het betreft in de soortenrijke fase vooral vegetaties behorend tot het borstelgrasverbond (*Violion caninae*) met soorten als Valkruid (*Arnica montana*), Rozenkransje (*Antennaria dioica*), Liggende vleugeltjesbloem (*Polygala serpyllifolia*) en vegetaties welke gerekend worden tot de zandblauwtjes-orde (*Festuco-Sedetalia*), met onder andere Wilde tijm (*Thymus serpyllum*).

Het uitsluitend terugdringen van de eutrofiëring door middel van maaien en afvoeren of plaggen is geen afdoende maatregel omdat de bijzondere plantesoorten niet resistent zijn tegen hoge aluminiumconcentraties en/of verhoogde ammoniumconcentraties als gevolg van de bodemverzuring. De enige methode om de verzuring terug te dringen in deze droge milieus is het toedienen van bufferstoffen zoals kalk. Omdat het hier gaat om vervanging van door verzuring uitgespoelde kalk, is er in principe geen sprake van aanvoer van systeemvreemd materiaal. Het is echter zaak om zoveel kalk toe te dienen dat de bodem in de voor de bedreigde planten noodzakelijke bufferrange komt. Wordt er teveel kalk toegevoegd dan komt de bodem in de carbonaatbufferrange en stijgt de pH te sterk.

In verschillende terreinen is ervaring opgedaan met toediening van verschillende bufferstoffen. Het blijkt dat met poedervormig dolomietenkalk (dolokal) en mergel goede resultaten behaald kunnen worden. Op grond van de pH_{KCl} (maat voor de zuurvoorraad in de bodem) kan berekend worden hoeveel kalk nodig is. In de praktijk blijkt een hoeveelheid van 500 - 1000 kg per ha. meestal voldoende om de bodem in de oorspronkelijke staat te brengen. De pH stijgt daarbij slechts licht (<0,5 pH eenheid). Voorwaarde voor een succesvolle bekalking is wel dat het terrein voordien geplagd wordt.

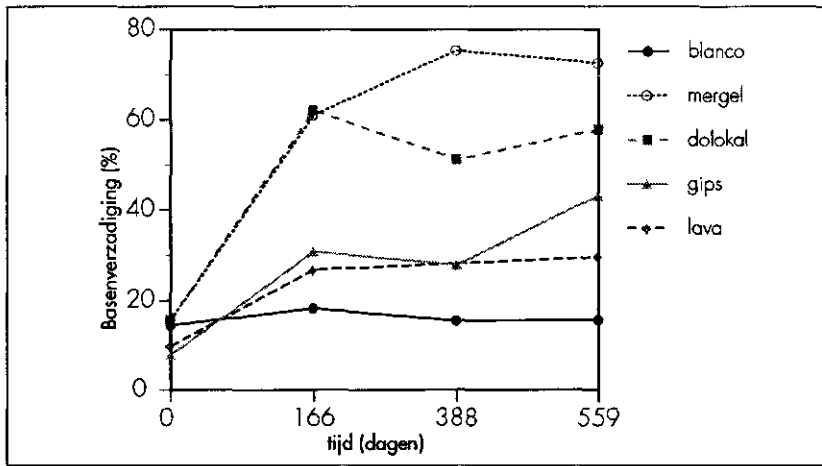
Kansrijk zijn die droge heischrale milieus waar nog restpopulaties van de te beschermen bedreigde plantesoorten voorkomen. Dit hangt samen met het feit dat veel zeldzame soorten uit droge schraallanden zaad hebben dat maar één of hooguit enkele jaren kiemkrachtig is. Daar komt nog bij, dat bij plaggen de populatie nitrificerende bacteriën wordt afgevoerd (mondelinge mededeling W. de Boer). Daardoor is er altijd sprake van accumulatie van ammonium na het plaggen. Bij deze hoge ammoniumwaarde kunnen de eventueel aanwezige kiemplanten niet tot ontwikkeling komen. Pas na een periode van tenminste een half à een jaar komt de nitrificatie weer op een zodanig niveau dat de ammoniumwaarden in het bodemvocht weer dalen en de omstandigheden weer dusdanig zijn dat kiemplanten zich kunnen ontwikkelen. Het is daarom wenselijk dat in het terrein nog restpopulaties aanwezig zijn die een aantal jaren zaad kunnen produceren. Het plaggen dient dan ook altijd kleinschalig te geschieden, waarbij stroken met restpopulaties ongemoeid worden gelaten. Voorbeeld van een kansrijk object is het gebied Schaopedobbe, een heischraal terrein met enkele plassen in zuid-oost Friesland in eigendom en beheer bij It Fryske Gea. Hier zijn in een aantal proefvelden verschillende experimenten uitgevoerd met verschillende mineralen. Gebruikt zijn mergel, dolomietenkalk (dolokal), gips en lavameel.

In figuur 10 is de basenverzadiging uitgezet in de blanco en na toediening van resp. 600 kg mergel, dolokal, gips en 1200 kg lavameel. Alle mineralen geven een duidelijke stijging van de basenverzadiging en deze blijft gedurende twee jaar na toediening vrij constant. De basenverzadiging stijgt het minst bij lavameel. Dit is niet vreemd, aangezien het kalkgehalte van lavameel minder dan 20% is. Een verder nadeel van lavameel is dat het vrij veel fosfaat, kalium en andere plantevoedingsstoffen bevat waardoor het eutrofiërend werkt. Dit leidde in de proefplots tot een vrij snelle vervilting van de bodem door massale mos- en algenontwikkeling.

Gips (CaSO_4) geeft een redelijke verbetering van de basenverzadiging, maar heeft als nadeel dat het vlak na toediening een zuurshock veroorzaakt. Dit komt omdat het calcium de zuurionen van het adsorptiecomplex drukt. Bij kalk (CaCO_3) gebeurt dit ook, maar het carbonaat buffert deze zuurionen waardoor zo'n zuurstoot achterwege blijft. De beste resultaten worden verkregen met dolokal en mergel. De basenverzadiging stijgt van zo'n 20% naar ca. 80% en de Al/Ca-ratio daalt van ca. 4 naar een waarde beneden 0,2.

De eerste 200 dagen accumuleert ammonium tot 2.000 à 2.500 μmol per kg bodem; dit is een gevolg van het plaggen. Na die tijd neemt dit weer geleidelijk af terwijl de nitraatconcentratie stijgt. Na ca. 400 dagen is de ver-

Figuur 10
 Het verloop van de basenverzadiging in de bodem na behandeling met mergel, dolokol, gips of lavameel



houding tussen NH_4^+ en NO_3^- op een voor bedreigde planten wenselijk niveau. Alle belangrijke stuurvariabelen zijn nu op een wenselijk niveau. Dit geldt zowel voor de proefplots grenzend aan schraalgrasland met restpopulaties bedreigde plantesoorten als voor de proefplots grenzend aan soortenarme heide. Twee jaar na uitvoering van de maatregelen hebben zich al enkele bijzondere plantesoorten gevestigd in het terreindeel grenzend aan het soortenrijke schraalland, waaronder Kruiptrem (*Genista pilosa*) en Liggende vleugeltjesbloem (*Polygala serpyllifolia*). In de geplagde proefstroken grenzend aan soortenarme heide hebben zich in de twee jaar na uitvoering nog nauwelijks bijzondere planten gevestigd.

Weinig kansrijk zijn de terreinen waar (bijna) alle bijzondere plantesoorten al enkele jaren verdwenen zijn. Voorbeelden zijn: 'Het Borkelderveld' in de gemeente Rijssen, een terrein in eigendom en beheer van Staatsbosbeheer. Hier zijn bekalkingsexperimenten uitgevoerd die vergelijkbaar zijn met die bij 'De schaopedobbe', op plaatsen waar zo'n 10 à 15 jaar geleden Valkruid, Rozenkransje, Wilde tijm en dergelijke plantesoorten verdwenen zijn als gevolg van bodemverzuring. Bekalking gaf hier voor het abiotisch milieu vergelijkbare resultaten als in 'De Schaopedobbe', d.w.z. dat de basenverzadiging steeg van ca. 10% naar 40 à 60% en de Al/Ca-ratio daalde van ca. 5 naar ca. 1. Ook hier was er gedurende het eerste jaar na het plagen sprake van een sterke accumulatie van ammonium. Tot op heden heeft zich geen enkele van de verdwenen bedreigde plantesoorten opnieuw gevestigd. Dit komt waarschijnlijk door de afwezigheid van kiemkrachtig zaad.

Herintroductie van soorten

Op locaties waar alle bedreigde plantesoorten verdwenen zijn, heeft het in de oorspronkelijke staat terugbrengen van sterk verzuurde bodems weinig zin als deze maatregelen niet gekoppeld worden aan herintroductie van soorten door middel van zaaien. Uit zaaiproeven in proefplots is gebleken, dat het terugdringen van de verzuring een zeer gunstig effect heeft op de vestiging van Valkruid. Er zullen nog heel wat discussies gevoerd worden over de vraag of herintroductie van soorten wenselijk is. Als men kiest voor herintroductie via zaaien is het zaak om zaad te gebruiken van genetisch verwante populaties uit de regio (Den Hartog, 1993).

3. Niet verzuurde, voorheen soortenrijke, heischrale milieus

Deze treffen we vaak aan in terreindelen waar bijvoorbeeld leem aan de oppervlakte komt of waar vroeger graafwerkzaamheden zijn verricht, paden van kalkhoudend leem zijn aangelegd of vliegvelden van keileem (Tweede Wereldoorlog). Ook kan er tijdens hoge grondwaterstanden kalkhoudend water aan de oppervlakte komen. Plaggen is in deze, vaak vergraste terreindelen de beste beheermaatregel.

Kansrijk zijn de terreindelen in het heischrale milieu waar regelmatig plantesoorten voorkomen die indiceren dat de bodem niet verzuurd is. Dit zijn o.a.:

- Composieten (b.v. Biggekruid (*Hypochaeris radicata*), Muizeoortje (*Hieracium pilosella*))
- Gewone zegge (*Carex nigra*)
- Lage zegge (*Carex oederi*)
- Struisgras (*Agrostis*, div. spec.)

Het meest belangrijk zijn terreindelen waar nog restpopulaties van bijzondere plantesoorten voorkomen. In nattere terreindelen is dit minder essentieel omdat hier vaak sprake is van een beter geconserveerde zaadvoorraad in de bodem. In 1990 en 1991 zijn in zeven gebieden in terreindelen die aan bovengenoemde beschrijving voldeden experimentele plagplaatsen ingericht in grootte variërend van enkele vierkante meters tot enkele duizenden vierkante meters. Na twee jaar werden achttien Floron-rodelijst-soorten aangetroffen waaronder tien soorten die zich nieuw hadden gevestigd, waarschijnlijk vanuit de aanwezige zaadbank (zie tabel 3). Men kan dit gerust een bijzonder gunstig resultaat noemen, gezien het snelle herstel na uitvoering van de maatregelen. Enkele van deze soorten zijn uitermate zeldzaam of zelfs pas weer voor het eerst herontdekt in Nederland na EGM-maatregelen.

Tabel 3

Enkele Floron-
rode lijst-soorten
die werden aan-
getroffen na uit-
voering van
EGM in
geëutrofiëerde,
voorheen soor-
tenrijke, heis-
chrale milieus
(type 3).

Soort	Aantal lokaties
Dwergrus (<i>Juncus pygmaeus</i>)	1
Waterlepelje (<i>Ludwigia palustris</i>)	1
Wijdbloeiende rus (<i>Juncus tenageia</i>)	2
Echt duizendguldenkruid (<i>Centaurium erythraea</i>)	2
Moerashertshooi (<i>Hypericum elodes</i>)	1
Grondsterretje (<i>Illecebrum verticillatum</i>)	1
Moeraswolfsklauw (<i>Lycopodium inundatum</i>)	1
Heidekartelblad (<i>Pedicularis sylvatica</i>)	2
Liggende vleugeltjesbloem (<i>Polygala serpyllifolia</i>)	3
Wilde tijm (<i>Thymus serpyllum</i>)	3
Gestreepte klaver (<i>Trifolium striatum</i>)	1

4. Zure, vergraste, voorheen reeds soortenarme, heischrale milieus

Het grootste deel van het Nederlandse heide-areaal behoort tot deze categorie. EGM-maatregelen in deze terreinen zijn weinig zinvol omdat na uitvoering van maatregelen geen vestiging van door verzuring en eutrofiëring bedreigde plantesoorten zal plaatsvinden. Men bereikt maximaal (na plaggen of begrazen) dat de vergrassing en verbossing wordt teruggedrongen ten gunste van het heidelandschap.

Conclusies

In verdroogde en verzuurde, voorheen soortenrijke, natte, heischrale milieus zijn zeer goede resultaten te verkrijgen door plaggen en afvoeren van de eutrofe toplaag in combinatie met vernatting, mits het grondwater relatief basenrijk is.

In verzuurde, voorheen soortenrijke, droge heischrale milieus zijn goede resultaten te behalen via kleinschalig plaggen gevolgd door een lichte bekalving (500 - 1.000 kg per ha) in terreindelen waar nog restpopulaties bedreigde plantesoorten voorkomen. Zijn alle bedreigde plantesoorten reeds verdwenen vóór uitvoering van de maatregelen, dan is succes waarschijnlijk alleen te behalen via herintroductie van soorten.

In niet verzuurde, voorheen soortenrijke, heischrale milieus zijn goede resultaten te behalen via kleinschalig plaggen.

Effectgerichte maatregelen zijn in vergraste, voorheen reeds soortenarme, heischrale milieus weinig zinvol als het gaat om het behoud van bedreigde plantesoorten. Het zou zeker zinvol zijn om een deel van de reguliere plag- en begrazingsactiviteiten over te plaatsen naar terreindelen behorend tot groep 3.

Literatuur

- Berendse, F., 1988. De nutriëntenbalans van droge zandgrondvegetaties in verband met eutrofiëring via de lucht. Rapport CABO, Wageningen.
- Bobbink, R., A. Boxman, E. Fremdstad, G. Heil, A. Houdijk & J. Roelofs, 1992. Critical loads for nitrogen eutrophication of terrestrial and wetland ecosystems based upon changes in vegetation and fauna. In: P. Grennfelt & E. Thömelöf (Eds.), Critical loads for nitrogen. p. 111-161. ISBN 92 9120 1219.
- Boxman, A.W., R.J. Sinke and J.G.M. Roelofs, 1986. Effects of NH_4^+ on the growth and $\text{K}^*86(\text{Rb})$ uptake of various ectomycorrhizal fungi in pure culture. *Water, Air and Soil Pollut.* 31: 517-522.
- Boxman, A.W., H. Krabbendam, M.J.S. Bellemakers & J.G.M. Roelofs, 1991. Effects of ammonium and aluminium on the development and nutrition of *Pinus nigra* in hydroculture. *Environ. Pollut.* 73: 119-136.
- Breemen, N. van, 1975. Acidification and deacidification of coastal plain soils as a result of periodic flooding. *Soil Sc. Soc. Am Proc.* 39: 1152-1157.
- Dam, H. van, 1987. Acidification of moorland pools: a process in time. Proefschrift LUW, 175 pp.
- Dobben, H. van, 1991. Integrated effects (low vegetation). In: G. J. Hey & T. Schneider (Eds.), Acidification research in the Netherlands. Final report of the Dutch priority programme on acidification. Elsevier, Amsterdam. p. 465-523.
- Graaf, M.C.C. de and P.J.M. Verbeek, 1993. The effect of aluminium and calcium, on the development and vitality of *Arnica montana* and *Cirsium dissectum* in hydroculture. In prep.
- Graaf, M.M.C. de, P.J.M. Verbeek, M.J.R. Cals & J.G.M. Roelofs, 1993. Effectgerichte maatregelen in matig mineraalrijke heide en schraallanden. Eindrapportage monitoring EGM 1e fase. K.U.N. – in opdracht van N.B.L.F., Ministerie L.N. en V.
- Hartog, C. den, 1993. Voorwaarden die inacht genoemen moeten worden bij de herintroductie van plantesoorten. Aangeboden aan Stratiotes.
- Houdijk, A.L.F.M., 1993. Atmospheric ammonium deposition and the nutritional balance of terrestrial ecosystems. Proefschrift K.U.N., 127 pp.
- Pegtel, D. M., 1987. Effect of ionic Al in culture solutions on the growth of *Arnica montana* (L.) and *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin. *Plant and soil* 102: 85-92.
- Roelofs, J.G.M., J.A.A.R. Schuurkes & A.J.M. Smits, 1984. Impact of acidification and eutrophication on macrophyte communities in soft waters. II. Experimental studies. *Aquat. Bot.* 18: 389-411.
- Ulrich, B., 1983. Soil acidity and its relation to acid deposition. In: Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems, B. Ulrich & J. Pankrath (Eds.). Dordrecht, D. Reidel Publ. Comp. p. 127-146.
- Verbakel, P., 1993. De invloed van bodemverdichting en verdroging op vestiging en ontwikkeling van *Arnica montana* en *Cirsium dissectum*. Doctoraalverslag vakgroep Oecologie, K.U.N. (In druk.)