

Heideherstel met vulkamin

Een beter alternatief voor dolocal?

Om de vegetatie van verzuurde heide te herstellen is plaggen, gevolgd door het toedienen van dolocal, een langdurig effectieve maatregel gebleken. Er is de afgelopen jaren ook kritiek geuit op deze maatregel. Zo zou het mangaangehalte in de vegetatie afnemen, wat ongunstig is voor de voedselkwaliteit voor bepaalde diersoorten. Om deze kritiek op waarde te kunnen schatten hebben wij de werking van deze maatregel onderzocht en een aantal alternatieven vergeleken.

Het heidelandschap heeft zich circa 4000 jaar geleden ontwikkeld op droge, kalkarme zandgronden, die na boskap in gebruik werden genomen voor de extensieve veeteelt. De vegetatie werd regelmatig gebrand en er werden plaggen gestoken voor brandstof of bouw materiaal, waardoor heidesoorten zich konden uitbreiden. Grootchalige heidelandschappen ontstonden pas toen de potstalcultuur opkwam. Door herhaaldelijk plaggen van het achterland ontstonden grote arealen van zeer mineraalarme bodems, waar alleen heidevegetaties konden gedijen of waar zich stuifzandvlakten ontwikkelden. De biodiversiteit van deze heidelandschappen is afgenomen door atmosferische zwavel- en stikstofdepositie, wat leidt tot verzuring en stikstofvermesting van de bodem (Roelofs, 1986).

Hoge aluminium- en ammoniumconcentraties zijn, bij een lage pH, toxisch voor bijzondere kruiden. (De Graaf et al., 1997; Van den Berg et al., 2005). Dit geldt niet voor struikheide (*Calluna vulgaris*) en pijpenstrootje (*Molinia caerulea*), die profiteerden van de stikstofverrijking en het heidelandschap konden gaan domineren (Roelofs, 1986).

Door optredende stikstofverzadiging in de bodem wordt soms gesuggereerd dat heide gelimiteerd raakt door fosfaat (Oheimb et al., 2010; Vogels et al., 2018). Groeiproeven bevestigen dat dit niet het geval is (Oheimb et al., 2010). De Graaf et al. (2009) kaartten al eerder aan dat deze tegenstrijdigheid voortkomt uit het

meenemen van bemeste graslanden en/of het uitsluiten van sterk verzuurde graslanden in onderzoeken.

De karakteristieke heidevegetatie heeft een van nature lage verteerbaarheid vanwege de hoge koolstof-stikstof (C:N) en koolstof-fosforratio's (C:P) die planten ontwikkelen op mineraalarme bodems. Vogels et al. (2018) suggereerden dat het toedienen van dolocal een ongewenst bijeffect kan hebben: het kan leiden tot fosfaatimmobilisatie in de bodem, waarbij het versterken van de fosfaatbinding met calcium en aluminium resulteert in een hogere stikstof-fosforratio (N:P) van de vegetatie. Ook zouden bij het oplossen van de carbonaten uit dolocal hoge concentraties calcium- (Ca^{2+}) en magnesiumionen (Mg^{2+}) vrijkomen, die bijdragen aan kationverdringing en versnelde uitspoeling van sporenelementen in de bodem, waardoor mangaangebrek zou kunnen optreden. Beide processen dragen theoretisch bij aan een ongunstige voedselkwaliteit van ongewervelden (Vogels et al., 2018). Wij hebben deze mogelijke nadelen van dolocal onderzocht. In een veldexperiment hebben wij dolocal toegepast op zowel geplagde als ongeplagde heide en de werking ervan vergeleken met die van vulkamin: een zeoliethoudend sterk alkalisch oergesteentemeel, waarvan het vermogen om zuur te neutraliseren niet berust op het snel in oplossing gaan van carbonaten. Wij verwachten dat beide stoffen de pH van de bodem in toereikende mate verhogen en zo toxische bodemcondities

steenmeel
stikstof
verzuring
klimaatbestendig
zeoliet

E.C.H.E.T. (Esther) Lucassen

Onderzoekcentrum B-ware & Radboud Universiteit Nijmegen, Toernooiveld 1, 6525 ED Nijmegen
E.Lucassen@b-ware.eu

M.I.J.T. (Michael) van Roosmalen

Stichting het Limburgs Landschap

J.G.M. (Jan) Roelofs

Onderzoekcentrum B-ware & Radboud Universiteit Nijmegen

Foto Mark van Veen. De Lange Maten, Noord-Brabant.

opheffen, wat de groei van bijzondere kruiden mogelijk maakt. Vulkamin heeft daarbij mogelijk een gunstig aanvullend effect, doordat het de mangaanbeschikbaarheid in mindere mate verlaagt en daarbij sterk in staat is om ammonium te binden.

Materiaal en methoden Veldproef

In november 2013 zijn vijf plots (10 x 20 m) aangelegd op de sterk verzuurde heide van Landgoed de Hamert (Nationaal Park de Maasduinen, Arcen). Binnen elke plot werd een deel van 2,5 x 10 m geplagd, waarbij de circa 10 cm dikke O-horizont werd verwijderd.

Er werden vijf behandelingen toegepast: toediening van 2 ton dolocal per hectare (dolocal-laag), 5 ton dolocal per hectare (dolocal-hoog), 2 ton vulkamin per hectare (vulkamin-laag), 5 ton vulkamin per hectare (vulkamin-hoog) en geen toediening van deze stoffen (controle). In de ongeplagde plots werden de organische toplaag (0-10 cm) en onderliggende minerale bodemlaag (10-20 cm) bemonsterd door een tiental stalen te nemen en deze te mengen rondom vier gemarkeerde locaties (n=4). Dit vond plaats op vier momenten: in november 2013 (nul-situatie), september 2014, augustus 2016 en april 2018. In de geplagde delen van de plots werd volstaan met één representatief mengmonster van een tiental steken. De samenstelling van de vegetatie en bedekking van de moslaag werden bepaald in november 2013 en juni 2018. In juli 2018 (vóór de zomerdroogte) werden de moslaag en de struikheide bemonsterd rondom de vier gemarkeerde locaties (n=4). Van de struikheide werden mengmonsters gemaakt door van 25 planten de jonge scheuten (10 cm lengte) te knippen. Ook werd gestart met het aanbrengen van maaisel om een indruk te krijgen van de daadwerkelijke overlevingskansen van karakteristieke kruiden op de plagplots.

Chemische analyse

Een destructie in salpeterzuur werd uitgevoerd om de totale gehalten (X-tot) te bepalen van een standaardreeks van de elementen calcium (Ca), ijzer (Fe), kalium (K), mangaan (Mn), magnesium (Mg), fosfor (P), zwavel (S), silicium (Si) en zink (Zn) in bodem en plantmateriaal. In de plantmonsters werd ook het gehalte aan micro-elementen (As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sr) gemeten, alsmede het koolstof- (C) en stikstofgehalte (N). Op de bodemmonsters werd daarbij een waterextractie (X-w) en zoutextractie (X-z) uitgevoerd om de zuurgraad (pH) en de concentratie van in het porievocht oplosbare en met het bodemcomplex uitwisselbare concentratie van de eerder genoemde standaardreeks aan elementen en nutriënten (o.a. ammonium (NH₄⁺), nitraat (NO₃⁻) en fosfaat (PO₄³⁻)) te bepalen. Tenslotte werden organischestofgehalte, vochtgehalte en bodemdichtheid bepaald en werd een Olsen-P extractie uitgevoerd om de concentratie voor planten beschikbaar fosfaat te bepalen. In totaal werden 58 bodemparameters bepaald (Lucassen et al., 2014). Er werd verschillende statistische toetsen toegepast (Mixed Model, Univariate, Tukey's post hoc) met behulp van SPSS 20.

Resultaten

Effecten van dolocal en vulkamin op ongeplagde en geplagde bodem

Het toedienen van beide doseringen **dolocal** aan de organische toplaag (0-10 cm) van de ongeplagde heide leidde tot een significant meetbare verhoging van de totale gehalten calcium (Ca-tot) en magnesium (Mg-tot) in de bodem (Ca-tot: 3,4 - 11,0 - 17,5 mmol/L en Mg-tot: 2,4 - 9,2 - 15,5 mmol/L voor de behandelingen: controle, dolocal-laag en dolocal-hoog, gemeten na vijf jaar).

Binnen één jaar namen met toenemende dosering de concentratie van met het bodemcomplex uitwisselbaar

magnesium (Mg-z) en calcium (Ca-z) toe, terwijl de concentratie van met het bodemcomplex uitwisselbaar aluminium (Al-z), mangaan (Mn-z), zink (Zn-z) en protonen/zuur (H-z) significant afnamen. Hierdoor nam de basenverzadiging toe van circa 42% (controle) tot 95% (dolocal-laag) en 98% (dolocal-hoog). Deze effecten op de bodem zwakten niet af gedurende de eerste vijf jaar. Na drie tot vier jaar waren ook effecten meetbaar in de onderliggende minerale zandlaag (10-20 cm): een significante toename van de concentratie Mg-z en Ca-z met toenemende dosering. Er werden geen significante effecten gemeten op de beschikbaarheid van andere elementen, waaronder kalium. Het toedienen van dolocal aan minerale bodem, die duidelijk minder gebufferd was dan de O-horizont, had een vergelijkbaar effect op de bodemchemie (figuur 1).

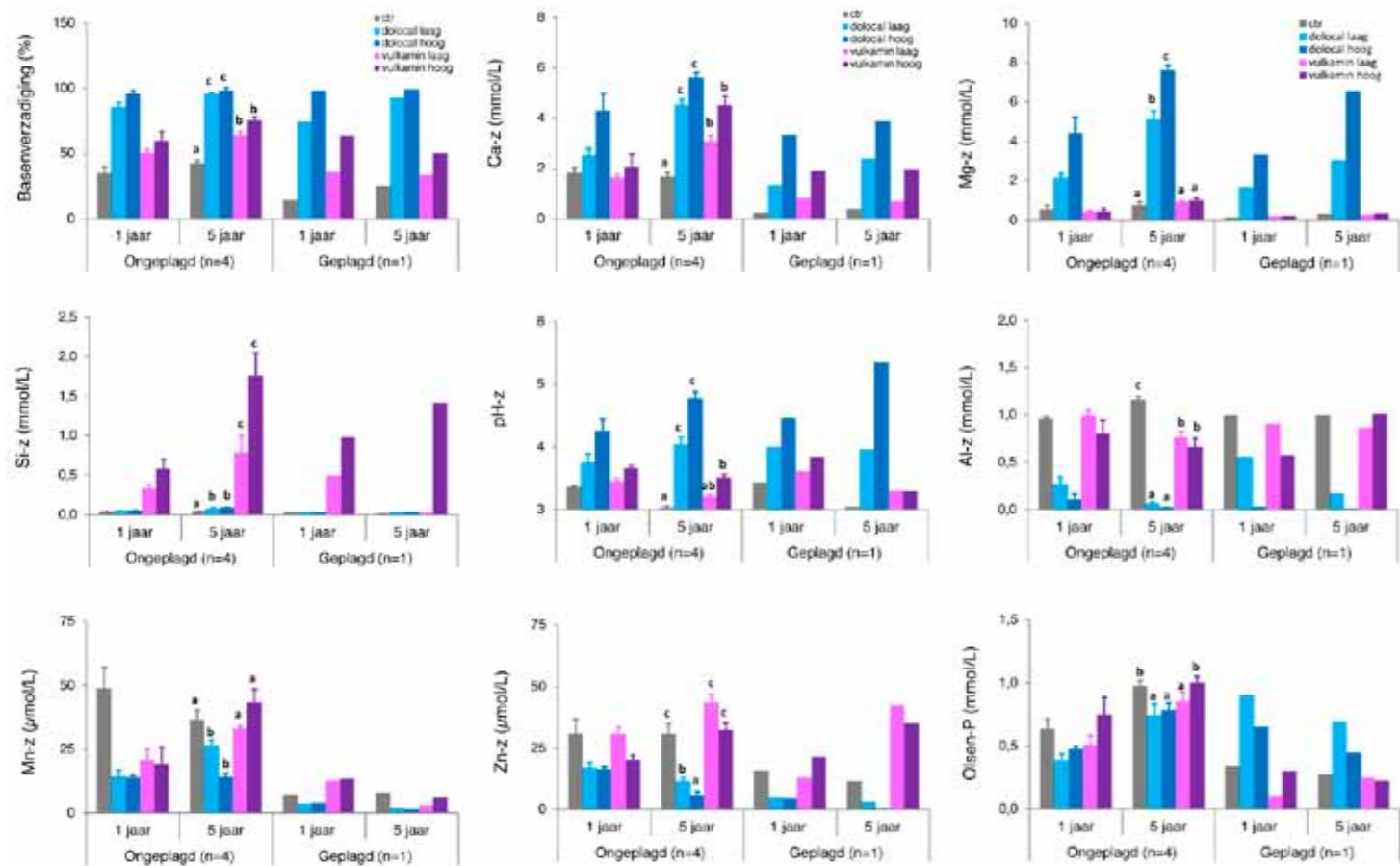
Het toedienen van **vulkamin** leidde alleen tot een significant meetbare verhoging van Ca-tot in de O-horizont. Deze toename was ongeveer de helft van de toename bij vergelijkbare doseringen dolocal (Ca-tot: 3,4 - 5,9 - 7,2 mmol/L voor de behandelingen: controle, vulkamin-laag, vulkamin-hoog, gemeten na vijf jaar). Wat opviel was dat vulkamin een meer geleidelijke werking vertoonde dan dolocal. Binnen één jaar vond er met toenemende dosering een significante afname plaats van de concentratie van aan het bodemcomplex gebonden protonen/zuur (H-z) en een significante toename van de concentratie van met het bodemcomplex uitwisselbaar silicium (Si-z). Na twee tot drie jaar vond er een significante toename plaats in de concentratie Ca-z en na vier tot vijf jaar een significante (maar beperkte) afname van Al-z. Een en ander leidde tot een toename van de basenverzadiging van de bodem tot 64% (vulkamin-laag) en 75% (vulkamin-hoog); een significante maar relatief mildere toename dan die bij vergelijkbare doseringen

dolocal. Het toedienen van vulkamin leidde, anders dan bij vergelijkbare doseringen dolocal, niet tot significante verlagingen van de beschikbaarheid van Mn-z en Zn-z in de O-horizont. Op geplagde bodem had vulkamin een vergelijkbaar effect, met het verschil dat er wel binnen één jaar een significante verhoging van de concentratie Ca-z en de basenverzadiging van de bodem optrad, terwijl het verlagende effect op de concentratie Al-z uitbleef. De concentratie Zn-z nam na vijf jaar zelfs significant toe ten opzichte van de controle-plagplot (figuur 1).

Effecten van dolocal en vulkamin op de vegetatie met moslaag

Dolocal leidde niet tot zichtbare verandering in de bedekking van struikheide en mossen op ongeplagde heide. Het leidde, afhankelijk van de dosering, wel tot een significante toename van de concentraties van diverse elementen (N, P, K, S, Mg, Ca) en micronutriënten (Fe, Cr, Cu, Mo, Ni) in de moslaag. Opvallend hierbij was de significante afname van Mn en de significante verlaging van de C:N-ratio. Dezelfde trends traden op in de struikheide. Hier leidde de toediening van dolocal, afhankelijk van de dosering, tot een significante toename van de elementen P, K, S en Mg. De Mn-gehalten namen ook significant af voor beide dolocaldoseringen. Het verhogend effect van dolocal op het N- en Ca-gehalte en de eerder genoemde micronutriënten trad wel op, maar was niet significant (figuur 2).

Op de geplagde heide leidde dolocal, afhankelijk van de dosering, tot een significante verhoging van een beperkt aantal elementen (N, S, Mg). De concentratie K nam voor beide doseringen gelijkwaardig af, met als gevolg een significant hogere N:K-ratio in de struikheide. Het Mn-gehalte in de struikheide was ook op de plagplots voor beide doseringen significant lager dan op de controle-plagplot (figuur 2).



Figuur 1 Bodemchemische parameters (0-10 cm) die significant veranderden door toediening van dolocal en/of vulkamin (2 en 5 ton per hectare) in een situatie met en zonder plaggen. Bij de geplagde plots worden gemiddelde waarden \pm SEM gegeven (n=4). Gemiddelden met eenzelfde symbool verschillen niet significant.

Figure 1 Soil parameters (0-10 cm) that significantly differed as a consequence of dolocal and/or vulkamin application (2 and 5 tonnes per hectare) in a situation with and without sod-cutting. For the sod-cut soils mean values \pm SEM are given (n=4). Means with a same letter are not significantly different.

Ook **vulkamin** leidde niet tot verandering in de bedekking van struikheide en mossen op ongeplagde heide. Er trad, afhankelijk van de dosering, in de moslaag een significant verhoging op van de gehalten N, K en de micronutriënten Si, Al en Sr. Het gehalte P en Mn in de mossen nam bij beide vulkamindoseringen significant af. Het hogere N- en lagere P-gehalte leidde in de mossen tot een significant toename van de C:P- en N:P-ratio. Op de ongeplagde heide namen de gehalten Si, Sr en B in de struikheide significant toe, terwijl de gehalten Mg en Mn significant afnamen. De afname van Mn was minder drastisch dan op de dolocalplots: de vulkaminplots hadden een significant hoger Mn-gehalte dan de dolocalplots. Alleen bij de hoogste dosering vulkamin nam in de struikheide het Mg-gehalte af en namen de C:P- en N:P-ratio significant toe (figuur 2). Op de geplagde heide leidde vulkamin tot een significant toename van de gehalten Ca en de micronutriënten Mn, Na en Sr (voor Mn alleen significant bij vulkamin-laag). Opvallend was dat bij beide vulkamindoseringen de gehalten N, P en K significant afnamen, wat resulteerde in een significant verhoging van de nutriëntenratio's C:N, C:P, N:P en N:K, vergeleken met de onbehandelde plagplot (figuur 2). Opmerkelijk was dat zich na vijf jaar in de plagplot met de lage vulkamindosering klein warkruid (*Cuscuta epithimum*) ontwikkelde. Deze parasiet haalde een totale bedekking van circa 10%. De geïnfecteerde struikheideplanten vertoonden sterk verhoogde K-gehalten die correleerden met verhoogde chloridegehalten (Cl). Het klein warkruid zelf bevatte nog hogere K-gehalten dan de planten waarop het parasiteerde. Mogelijk is dit een direct langere-termijneffect van de verwerking van K-houdend vulkamin.

Discussie

Uit de resultaten blijkt dat zowel dolocal als vulkamin een pH-verhogend effect hebben en leiden tot een gunstige Al:Ca-ratio (< 3) in (on)geplagde heidebodems. Beide stoffen zijn daarmee in theorie geschikt om de ontwikkeling van bijzondere kruiden onder geplagde, stikstofarmere condities mogelijk te maken. Gebruik van vulkamin lijkt daarbij (in ieder geval gedurende de eerste vijf jaar) een meerwaarde te hebben omdat de C:N-ratio in de vegetatie toeneemt en het niet leidt tot verlaagde Mn-gehalten in de bodem en de vegetatie.

Aluminiumtoxiciteit en mangaanbeschikbaarheid

Beide doseringen dolocal werkten snel en effectief. Binnen één jaar leidde dolocal tot een sterke toename van de pH en basenverzadiging van de bodem (respectievelijk 95% en 98%) door het oplossen van Ca- en Mg-carbonaten op verzuurde (on)geplagde heide. Het grootste deel van de fractie Al-z werd verdrongen door Ca^{2+} en Mg^{2+} -ionen die vrijkwamen bij het oplossen van de carbonaten. Aluminium spoelt daarbij uit en/of wordt onder invloed van een hogere pH geïmmobiliseerd tot Al(hydr)oxiden. Door de sterk verlaagde Al:Ca-ratio in de bodem worden de toxische condities in de bodem (hoog opgelost aluminium en ammonium bij lage pH) opgeheven, waardoor bijzondere kruiden kunnen kiemen en zich kunnen ontwikkelen (De Graaf et al., 1997; Van den Berg et al., 2005). Via hetzelfde mechanisme leidden beide dolocalbehandelingen echter ook tot een verlaagde beschikbaarheid van Mn en Zn in de bodem, waarbij het Mn-gehalte in de struikheide afnam. Beide vulkamindoseringen daarentegen leidden tot een veel subtielere verhoging van de pH en basenverzadiging, waarbij geen verlaagde Mn-gehalten optraden in de vegetatie. Vulkamin is opgebouwd

uit een brede reeks van verschillende zeolieten (8,3% CaO; 5% K₂O; 1% MgO; 0,2% P₂O₅) met voor planten belangrijke (sporen)elementen (Mn, Zn, Cu, Mo, Co, B). Negatief geladen tetraëders van Si-, Al- en O-atomen zijn aaneengeschakeld tot lange schachten in een kooiconstructie (pH 11). Door silicaatverwerking is vulkamin leverancier van belangrijke (sporen) elementen, maar kan het ook kationen (o.a. protonen en ammonium) sterk binden. Door deze verwerking nam met name de concentratie Ca-z geleidelijk toe (in sterkere mate dan die van Al-z), resulterend in een sterk verlaagde Al:Ca-ratio (circa 1,5 en 0,5 voor vulkamin-laag en -hoog). Bij de verwerking van vulkamin komt Ca langzamer in oplossing dan bij een gelijkwaardige dosering dolocal en daarbij is vulkamin leverancier van Mn en Zn. Daardoor bleven de concentratie Mn-z en Zn-z in de bodem hoog, en daarmee ook het Mn-gehalte in de vegetatie op de (on)geplagde plots. Dit kan de voedselkwaliteit van ongewervelden ten goede komen (Vogels et al., 2018).

Beschikbaarheid van nutriënten

Het is bekend dat een toename van de pH de microbiële afbraak van organische stof in een zuur milieu stimuleert. Doorgaans vindt weinig mineralisatie plaats in de stikstofrijke, verzuurde O-horizont. Door het toedienen van beide doseringen dolocal waren de gehalten aan nutriënten (N, P, K, S) in de moslaag op de ongeplagde heide dan ook significant hoger dan in de controleplot. De hoge dosering dolocal leidde tot hogere P-gehalten in de struikheide. De toename was echter alleen significant op de ongeplagde plot. Omdat het N-gehalte in het plantenmateriaal ook licht toenam (zij het niet significant) bleef de N:P-ratio van mossen en struikheide onveranderd ten opzichte van de controlecondities.

Zeer opmerkelijk waren de sterk verlaagde gehalten tot-N en tot-P van struikheide op de geplagde heide waaraan vulkamin was toegediend. Hieruit blijkt het zeer sterke adsorberende vermogen van vulkamin, dat tot uiting komt in de kwaliteit van de vegetatie op een al relatief voedselarme bodem. Vulkamin leidde tot verhoogde C:P- en N:P-ratio's in de moslaag en struikheide op de (on)geplagde heide. De C:N-ratio van de struikheide nam met vulkamin nog verder toe na pluggen van de met stikstofverrijkte bodemtoplaag. Dolocal had dit effect niet. Het is bekend dat een hogere C:N-ratio van de vegetatie het heidelandschap beter bestand maakt tegen grootschalige ongewenste (kaal)vraat door insecten, zoals het heidehaantje (*Lochmaea suturalis*) en de kleine wintervlinder (*Operophtera brumata*) (Kerslake et al., 1998).

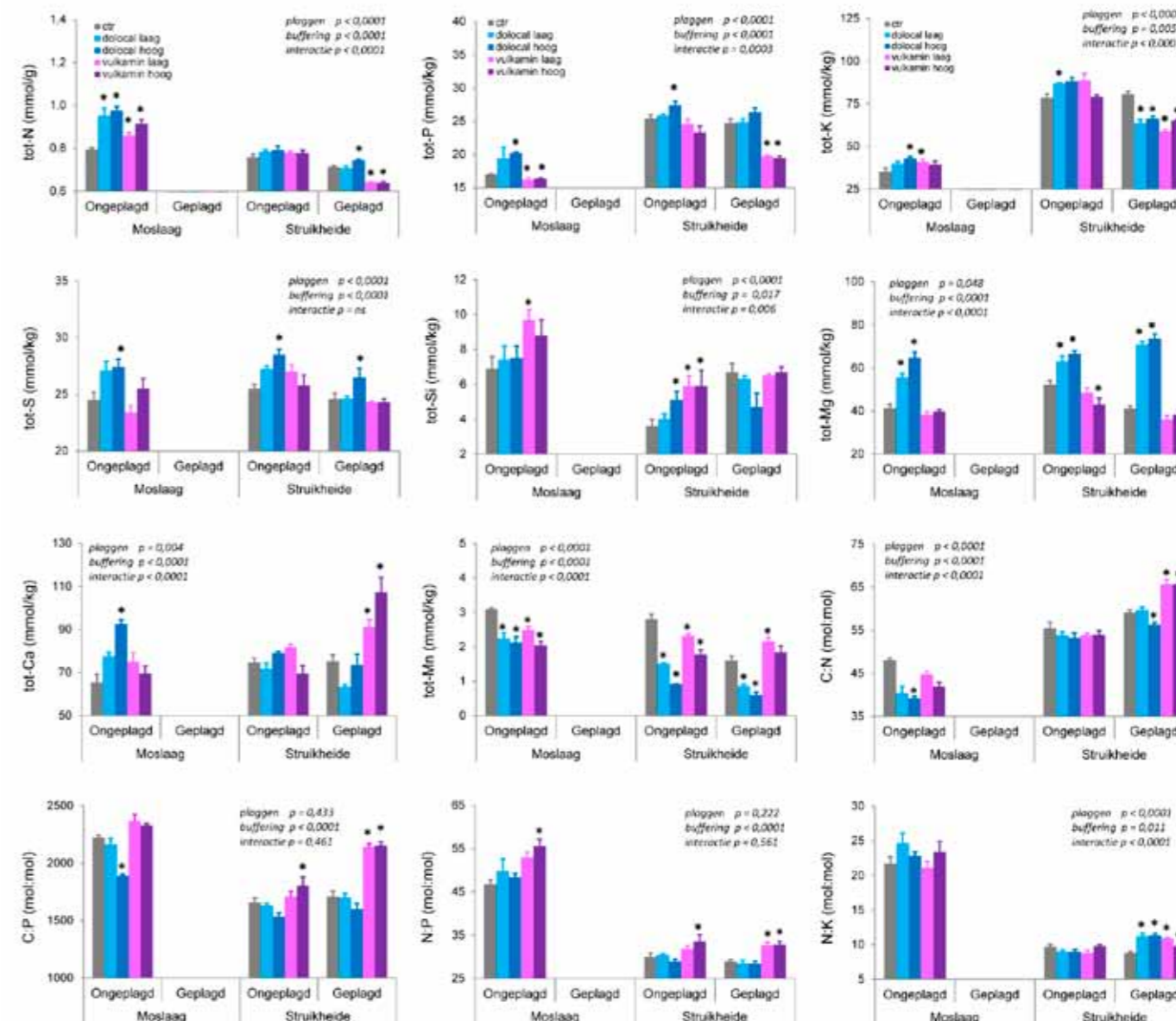
Implicaties voor herstelmaatregelen

Om de voedingswaarde van de vegetatie voor fauna te verbeteren opperden Vogels et al. (2018) dat de N:P-ratio moet afnemen door verhoging van het P-gehalte en niet, zoals bestaande herstelmaatregelen doen, door verlaging van het N-gehalte. Het toedienen van fosfaat aan de heide is wat ons betreft ongewenst, omdat karakteristieke heidesoorten, inclusief struikheide, gelimiteerd worden door N (Oheimb et al., 2010). Fosfaatverrijking leidt tot de ontwikkeling van niet-karakteristieke plantensoorten, waaronder braam (*Rubus fruticosus*), straatgras (*Poa annua*), wit struisgras (*Agrostis stolonifera*), jacobskruiskruid (*Jacobaea vulgaris*) en akkerhoornbloem (*Cerastium arvense*).

De vraag is of de fauna die op de heide voorkomt wel zo typisch is voor dit van nature voedselarme milieu, of eerder karakteristiek voor voedselrijkere schraalgraslanden. Omdat voedselarme bodems zeldzaam zijn, en het een stuk lastiger is om bodem te verschrallen dan te

Figuur 2 Concentratie nutriënten en nutriënten-ratio's die significant verschilden (*) in de moslaag en struikheide door het toedienen van dolocal en vulkamin, vergeleken met de controlesituatie.

Figure 2 Concentrations of nutrients and nutrient ratio's that significantly differed (*) in the moss layer and in *C. vulgaris* due to addition of dolocal and vulkamin as compared to the control treatment.



verrijken, is het wat ons betreft logischer om rondom bestaande heideterreinen meer rijkere schraalgraslanden te ontwikkelen uit voedselrijke landbouwgronden, dan om meststoffen toe te dienen aan heideterreinen.

De kwaliteit van bestaande, (sterk) verzuurde heideterreinen kan (plaatselijk) verhoogd worden met bestaande herstelmaatregelen, bestaande uit plaggen en het toedienen van een bufferstof (dolocal of vulkamin). Om (sterk) verzuurde heide te herstellen is het noodzakelijk om de stikstofverrijkte O-horizont te plaggen om de open ruimte te creëren die karakteristieke bijzondere kruiden nodig hebben. Deze zullen gedurende een langere periode in het jaar nectar produceren, wat gunstig is voor tal van insecten. Op geplagde bodem heeft dolocal, afgezien van het feit dat het aluminiumtoxiciteit opheft, de meerwaarde dat het nitrificatie stimuleert. Hierdoor blijft de stikstofbeschikbaarheid in de bodem duurzaam laag bij een voortschrijdende stikstofdepositie (Roelofs *et al.*, 1996; Dorland *et al.*, 2004). Toedienen van dolocal aan sterk verzuurde oudere heide (met een dikke organische bodemtoplaag) leidt tot het mobiliseren van nutriënten en is per definitie onwenselijk.

De resultaten over een periode van vijf jaar indiceren dat vulkamin meerdere positieve aanvullende werkingen heeft, in vergelijking met dolocal. De belangrijkste is dat vulkamin de C:N-ratio van de vegetatie verhoogt. Dit is

van belang voor duurzaam herstel: een hogere C:N-ratio maakt het heidelandschap meer bestendig tegen kaalvraat door insectenplagen, die zich door temperatuurstijging ten gevolge van de klimaatverandering vaker zullen voordoen. Daarbij zorgen atmosferische stikstofdepositie en hogere temperaturen juist eerder voor een verlaging van de C:N-ratio (Kerslake *et al.*, 1998).

Het is bekend dat dolocal langdurig werkzaam is (> 30 jaar). Omdat dit het eerste experiment is waarin vulkamin wordt toegepast op heidebodem, is nog onbekend hoe duurzaam de werking hiervan is. In theorie neemt het aantal bindingsplaatsen af in de tijd en kunnen elementen langzaam vrijkomen uit de kooiconstructie. De geplagde bodem is echter zeer mineraalarm en het vrijkomen van elementen is een traag proces. Wanneer de grootste zuur- en (verzurende) ammoniumvrucht uit de minerale bodem is opgenomen in de kooiconstructie, zal verwerking alleen nog optreden doordat de vegetatie op de geplagde plots organische zuren uitscheidt. We verwachten daarom dat vulkamin bij een dosering van 5 ton per hectare langdurig werkzaam zal zijn en geen tijdbom vormt op geplagde heide. Om dit te bevestigen is het van belang de plots in de toekomst te blijven monitoren. De resultaten legitimeren het uitbreiden van kleinschalige herstelexperimenten.

Summary

Heathland restoration using vulkamin; a better alternative than dolocal?

Esther Lucassen, Michael van Roosmalen & Jan Roelofs

Climate proof, rock flour, nitrogen, acidification, zeolite

Two different dosages of vulkamin and dolocal (2 and 5 tonnes per hectare) were applied to acidified monotonous *Calluna* dominated heathland in a situation with and without sod-cutting. The results after five years show that both dolocal and vulkamin failed in creating open space for development of characteristic herbs.

Both dolocal and vulkamin were successful in nullifying Al-toxicity in the soil after sod cutting, which is a prerequisite for development of characteristic herbs. Vulkamin, which is both a supplier of micro-nutrients as well as an efficient absorber of macro-nutrients, had the additional advantage to increase the C:N ratio of the vegetation following sod-cutting. It is generally known that a higher C:N ratio in *Calluna* decreases the risk of large-scale insect outbreaks causing heathland degradation. In addition, vulkamin did not lower manganese and zinc availability in the soil, but even tended to increase manganese content in the vegetation. Lowering of the manganese content, by dolocal, was mentioned to be a potential disadvantage for the quality of the food-chain.

Dolocal is known to have positive long-term effects on sod-cut heathlands. As this is the first experiment investigating the effects of vulkamin, the efficacy on the longer term still needs to be confirmed by ongoing monitoring. However, as sod-cut soils are very minerotrophic and minerals are only slowly released from vulkamin, we expect vulkamin to be a better more climate proof alternative than dolocal in long term restoration of heathlands.

Literatuur

De Graaf, M.C.C., R. Bobbink, P.J.M. Verbeek & J.G.M. Roelofs 1997. Aluminium toxicity and tolerance in three heathland species. *Water, Air and Soil Pollution* 98: 229-239.

De Graaf, M.C.C., R. Bobbink, N.A.C. Smits *et al.*, 2009. Biodiversity, vegetation gradients and key biogeochemical processes in the heathland landscape. *Biological Conservation* 142: 2191-2201.

Dorland, E., L.J.L. Berg van den, M.L. Vermeer *et al.*, 2004. The effects of sod cutting and additional liming on potential net nitrification in heathland soils. *Plant and Soil* 265: 267-277.

Friedrich, U., G. von Oheimb, C., U. Kriebitzsch *et al.*, 2011. Mechanisms of purple moor-grass (*Molinia caerulea*) encroachment in dry heathland ecosystems with chronic nitrogen inputs. *Environmental Pollution* 159: 3553-3559.

Kerslake, B.J.E., S.J. Woodin & S.E. Hartley, 1998. Effects of carbon dioxide and nitrogen enrichment on a plant-insect interaction: the quality of *Calluna vulgaris* as a host for *Operophtera brumata*. *New Phytologist* 1998: 43-53.

Lucassen, E., Van den Berg, L., Aben, R. *et al.*, 2014. Bodemverzuring en achteruitgang zomereik. *Landschap* 4: 185-193.

Oheimb von, G., S. A., K. Power, K. Falk *et al.*, 2010. N:P ratio and the nature of nutrient limitation in *Calluna*-dominated heathlands. *Ecosystems* 13: 317-327.

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

Roelofs, J.G.M., R. Bobbink, E. Brouwer & M.C.C. de Graaf, 1996. Restoration ecology of aquatic and terrestrial vegetation on non-calcareous sandy soils in The Netherlands. *Acta Botanica Neerlandica* 45: 517-541.

Van den Berg, L.J.L., E. Dorland, P. Vergeer *et al.*, 2005. Decline of acid-sensitive plant species in heathland can be attributed to ammonium toxicity in combination with low pH. *New Phytologist* 166: 551-564.

Vogels, J. M., H. Weijters, H. Bergsma *et al.*, 2018. Van bodemherstel naar herstel van fauna in een verzuurd heidelandschap. *De Levende Natuur* 119: 200-204.