



Aanpak van stikstofproblematiek met zeoliet

De potentiële toepasbaarheid van zeoliet voor verschillende bodemtypes

De kwaliteit van ecosystemen op de Nederlandse zandgronden staat onder druk door de nog steeds te hoge atmosferische stikstofdepositie. Huidige herstelmaatregelen lijken niet altijd voldoende om hiervoor te compenseren. Een nieuwe, mogelijke effectieve maatregel is het aan de bodem toedienen van zeolietmineralen die zowel stikstof kunnen binden als belangrijke elementen kunnen naleveren. Hoe werken verschillende typen zeolieten en hoe effectief zijn deze om de beschikbaarheid van stikstof in de bodem te verlagen?

De kritische stikstofdepositiewaarde in de Natura 2000-gebieden wordt nog steeds overschreden, waardoor de gewenste kwaliteit niet wordt bereikt en het behalen van de Europese doelstellingen in gevaar komt. Langdurige stikstofdepositie leidt tot overbemesting en verzuring van de bodem, wat tot een verstoring van de vegetatie leidt. Dit is duidelijk zichtbaar op de Pleistocene zandgronden van Nederland: het heidelandchap verandert in een monotone, vergraste heidevegetatie waarbij typische kruiden en mossen zijn verdwenen (Dorland *et al.*, 2003). Figuur 1 laat een voorbeeld zien van goed ontwikkelde heide: de referentievegetatie. In vennen treedt vaak een verandering op van een door isoetide soorten gedomineerde gemeenschap naar een vegetatie van soorten die beter aangepast zijn aan verhoogde nutriëntenconcentraties in de bodem en de waterlaag (Smolders *et al.*, 2002). Ook is bekend dat de vitaliteit van eiken achteruitgaat, soms zelfs met sterfte tot gevolg, door de uitspoeling van basische kationen en mineraalgebrek als gevolg van verzurende depositie (Lucassen *et al.*, 2014). Deze veranderingen in bodem en vegetatie werken vervolgens door in het gehele voedselweb (Nijssen *et al.*, 2017).

In het kader van natuurherstel zijn al verschillende maatregelen getroffen om te compenseren voor de hoge input van stikstof en om bodemcondities te herstellen. Deze maatregelen lijken echter niet allemaal even ef-

fectief te zijn. Maatregelen als plaggen, maaien of begrazen, om het teveel aan voedingsstoffen af te voeren, compenseren niet altijd voldoende voor de hoeveelheid stikstof die per jaar neerslaat (Jones *et al.*, 2017). Het toedienen van kalk (o.a. dolomietenkalk; 'dolokal') is weliswaar zeer succesvol in het verlagen van de aluminium- en ammoniumstress op verzuurde bodems, maar zorgt er niet voor dat uitgespoelde elementen (met uitzondering van calcium en magnesium) weer aangevoerd worden (Vogels *et al.*, 2018). Het toedienen van steenmeel zorgt er wel voor dat belangrijke elementen, zoals kalium en allerlei micro-elementen (o.a. mangaan, kobalt en molybdeen) weer aangevuld kunnen worden in de bodem. In het kader van het netwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit (OBN) wordt hier veel onderzoek naar gedaan. Wanneer steenmeel wordt toegediend zonder te plaggen leidt dit echter niet tot een reductie van stikstof in de bodem en worden de negatieve effecten van stikstofdepositie deels teniet gedaan.

Een mogelijke alternatieve maatregel is het toedienen van zeolietmineralen aan de bodem. Deze hebben, in tegenstelling tot steenmeelmineralen, het vermogen om ionen uit te wisselen en kunnen niet alleen elementen aanvullen, maar tegelijk ook stikstof in de vorm van ammonium (NH_4^+) absorberen. Zeolietmineralen worden veelvuldig toegepast in de landbouw (ten behoeve van hygiëne in stallen) en in de afvalwaterzuive-

ammonium
ionenuitwisseling
mineralen
mitigatie
natuurbodems

J. (Jelmer) van Doorn
Onderzoekscentrum B-WARE,
Postbus 6558, 6503 GB
Nijmegen, j.vandoorn@b-
ware.eu

**E.C.H.E.T. (Esther)
Lucassen**
Onderzoekscentrum B-WARE

M. (Mats) Douma
Onderzoekscentrum B-WARE

**M.I.J.T. (Michael) van
Roosmalen**
Het Limburgs Landschap

J.G.M. (Jan) Roelofs
Onderzoekscentrum B-WARE

A.J.P. (Fons) Smolders
Onderzoekscentrum B-WARE
& Radboud Universiteit
Nijmegen

Foto: **Mark van Veen.**
Tengere pantserjuffers
leven vooral bij venige hei-
devennen.



Figuur 1 Voorbeeld van goed ontwikkelde heide: de referentievegetatie voor dit onderzoek. Foto: Liyenne Hagenberg.

Figure 1 Example of well-developed heathland: the reference vegetation for this study. Photo: Liyenne Hagenberg.

ring (Misaelides, 2011; Groot et al., 2016). Er zijn indicaties dat zeolieten de nitraatuitspoeling vanuit landbouwgronden naar het grondwater verlagen (Mullekom et al., 2019). Een eerder veldexperiment, beschreven in LANDSCHAP (Lucassen et al., 2019), toonde de potentie van zeolieten al aan om de stikstofbeschikbaarheid in natuurbodems te verlagen: vijf jaar na de toediening van vulkamin, een zeoliet, werd een verlaging van de stikstofconcentratie vastgesteld in de heidevegetatie op geplagde bodem. Onderzoek naar de toepassing van zeolieten in natuurherstel is echter nog zeer beperkt. Zo is niet bekend hoe goed zeolieten in staat zijn om ammonium op te nemen in niet-geplagde bodems of onder zure omstandigheden. Daarbij zijn er veel verschillende soorten zeolieten op de markt, waarvan verwacht wordt dat ze verschillen in de mate waarin ze ammonium kunnen absorberen. Om meer inzicht te krijgen in de effectiviteit van ammoniumabsorptie en de nalevering van kationen

op verschillende bodemtypes zijn, bij wijze van pilot, twee incubatie-experimenten uitgevoerd met verschillende zeolietmineralen: vulkamin (in poeder- en korrelvorm), actionine en optizec.

Opzet incubatie-experimenten

In het eerste incubatie-experiment werden zeolieten toegevoegd aan een ammoniumnitraatoplossing om inzicht te krijgen in de verschillen in stikstofabsorptie tussen de verschillende mineralen. In het tweede experiment werden dezelfde zeolieten toegevoegd aan verschillende kalkarme natuurbodems om inzicht te krijgen in de bodeminteractie. Te verwachten valt dat de opname van ammonium door zeolieten beïnvloed wordt door de samenstelling en condities (zoals de pH) van de bodem. In het stikstofabsorptie-experiment werd aan infuusflessen van 500 ml een lage (1 gram) of hoge (2 gram) dosering toegevoegd van de diverse typen zeolietmineralen: vulkaminpoeder, vulkaminkorrel, actionine of optizec. De flessen werden afgevuld met 1 ml ammoniumnitraat-oplossing (0,25M NH_4NO_3), overeenkomend met de jaarlijkse gemiddelde stikstofdepositie in Nederland (30 kg/ha).

Voor het bodeminteractie-experiment werden infuusflessen (500 ml) gevuld met verschillende van nature kalkarme bodemtypes, verzameld in het natuurreservaat Maasduinen: (1) overbekalkte heide (pH 7,0); (2) verzuurd eikenbos; (3) kruidenrijk grasland; (4) minerale gebufferde venbodem (ven gebufferd); (5) verzuurde organische venbodem (ven zuur). De eerste 10 cm bodem onder de strooisellaag werd verzameld en gezeefd tot een homogeen mengsel. De flessen werden gevuld met 150 gram verse bodem en met dezelfde zeolieten als in het stikstofabsorptie-experiment of met dolokal (0,6 g; overeenkomend met 4 ton per hectare), en afgevuld met demiwater. Als controlebehandeling werden ook fles-

sen gevuld met alleen bodem en demiwater of met alleen zeoliet/kalk en demiwater.

In beide experimenten werden de flessen op een schudmachine gezet in een labruimte op kamertemperatuur, waarna de pH werd gemeten en monsters werden genomen met teflon rhizons (Eijkelkamp, Agrisearch). Figuur 2 laat de opzet van de labproef zien. De monsters werden geanalyseerd op de concentratie aan stikstofverbindingen (auto-analyzer) en andere elementen (ICP-OES). In het stikstofabsorptie-experiment gebeurde dit vijf keer: na 1 uur, na 4 uur, na 1 dag, na 5 dagen en na 14 dagen. In het bodeminteractie-experiment werden alleen monsters genomen na 14 dagen. De samenstelling van de zeolieten en dolokal is bepaald met een destructie in salpeterzuur.

Resultaten

Samenstelling zeolietmineralen

De vier gebruikte typen zeolietmineralen verschillen in chemische samenstelling (tabel 1). De twee typen vulkamin bevatten veel calcium en natrium ten opzichte van actionine en optizec. De vulkaminkorrel bevat daarbij veel magnesium en zwavel, ook ten opzichte van het vulkaminpoeder. Actionine en optizec bevatten meer kalium dan de twee typen vulkamin en actionine bevat ook relatief veel ijzer. Optizec bleek relatief zeer arm aan fosfor.

Werkings ion-uitwisselingsproces

De resultaten van het stikstofabsorptie-experiment zijn een goede weergave van de werking van de verschillende zeolieten: afhankelijk van het type zeoliet worden elementen (calcium, kalium of natrium) uit het kristalrooster nageleverd en worden ammoniumionen geabsorbeerd (figuur 3).

De hoogste reducties in ammonium werden gevonden 14 dagen na de toediening van de hoge dosering van



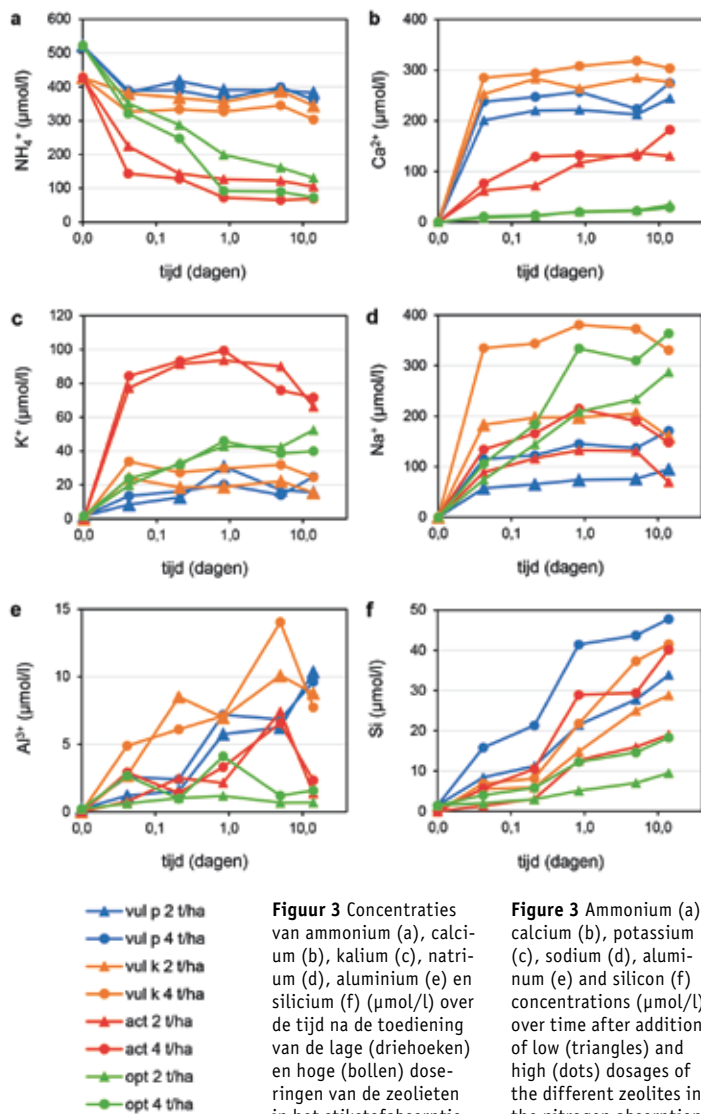
Figuur 2 Opzet van de labproef: monsterflessen nadat ze op de schudmachine hebben gestaan.

Figuur 2 Design of the lab test: sample bottles after they have been placed on the shaker.

Tabel 1 Samenstelling van de verschillende typen zeolietmineralen en dolokal (mmol/kg drooggewicht), verkregen via Het Limburgs Landschap.

Table 1 Composition of the different types of zeolite minerals and dolocal (mmol/kg dry weight), received from Het Limburgs Landschap.

	VULKAMIN POEDER	VULKAMIN KORREL	ACTIONINE	OPTIZEC	DOLOKAL
Al	2050	1435	1378	898	27
Ca	998	1760	504	330	6323
Fe	79	66	227	64	42
K	29	27	313	210	5
Mg	55	311	98	70	2226
Mn	15	13	11	2	4
Na	1833	1238	256	357	2
P	17	14	12	2	2
S	20	168	2	<0,01	15
Si	54	30	7	12	12
Zn	2	2	1	0,4	1



Figuur 3 Concentraties van ammonium (a), calcium (b), kalium (c), natrium (d), aluminium (e) en silicium (f) ($\mu\text{mol/l}$) over de tijd na de toediening van de lage (driehoeken) en hoge (bollen) doseringen van de zeolieten in het stikstofabsorptie-experiment. Afkortingen: vul p/k (vulkamin poeder/korrel), act (actionine) en opt (optizec).

Figure 3 Ammonium (a), calcium (b), potassium (c), sodium (d), aluminium (e) and silicon (f) concentrations ($\mu\text{mol/l}$) over time after addition of low (triangles) and high (dots) dosages of the different zeolites in the nitrogen absorption experiment. Abbreviations are as follows: vul p/k (vulkamin powder/grain), act (actionine) and opt (optizec).

optizec (86%) en actionine (84%). Het grootste deel van deze afname vond al plaats na één dag, maar bij optizec verliep deze meer geleidelijk dan bij actionine. Bij de behandelingen met actionine nam voornamelijk de kaliumconcentratie toe over tijd en bij optizec de natriumconcentratie. Het is dus waarschijnlijk dat deze ionen zijn uitgewisseld met ammoniumionen, waardoor de ammoniumconcentratie verlaagd is over de tijd.

Actionine staat bekend om de hoge selectiviteit voor de binding van ammoniumionen (Colella, 1996; Inglezakis, 2005), het is dus niet verwonderlijk dat juist bij dit zeoliet een hoge reductie van beschikbaar ammonium werd gevonden. De exacte samenstelling van optizec is niet bekend, maar de werking ervan komt sterk overeen met die van actionine. Veel lagere reducties in ammonium werden gevonden in beide vulkaminbehandelingen (< 30%), waarbij de ammoniumreductie na één uur na toediening niet veel verder meer afnam. Bij de vulkaminbehandelingen werd een vrij directe toename in calcium gevonden, waarschijnlijk deels uitgewisseld met de ammoniumionen in de oplossing. Bij vulkamin-korrel nam na toediening ook magnesium en zwavel sterk toe doordat deze elementen vrijkwamen uit de korrelcoating. De lage ammoniumreductie bij beide vulkaminbehandelingen heeft waarschijnlijk te maken met het hoge calciumgehalte van vulkamin. Calciumrijke zeolietmineralen bevatten vaak minder zeolietbestanddelen, waardoor de ionuitwisselingscapaciteit lager is (Zhang *et al.*, 2011). De ammoniumreductie na toediening van vulkaminpoeder was wel hoger (30%) dan bij vulkaminkorrel (20%), wat te verklaren is door het grotere oppervlak voor ionuitwisseling van poeder ten opzichte van korrels.

De geleidelijke toename van aluminium en silicium, de bouwstenen van zeolietmineralen, laat zien hoe de mi-

neralen langzaam verweren (figuur 3). Een afname van de nitraatconcentratie (NO_3^-) was nauwelijks zichtbaar, omdat natuurlijke zeolieten minder goed negatief geladen ionen kunnen absorberen.

Bodeminteractie

Uit het stikstofabsorptie-experiment blijkt dat actionine en optizec in potentie zeer goed in staat zijn om ammoniumionen te absorberen. In het tweede experiment is onderzocht wat er gebeurt als deze stoffen aan de bodem toegevoegd worden.

De hoogste reducties van beschikbaar ammonium (> 57%) in de bodemoplossingen werden gevonden in de gebufferde bodemtypes (grasland en ven gebufferd), 14 dagen na toediening van de zeolieten actionine en optizec (figuur 4). De hoge gehalten aan kalium en natrium (grasland) en calcium en natrium (ven gebufferd) bij actionine en optizec zijn waarschijnlijk vrijgekomen uit het zeoliet en het resultaat van ammoniumuitwisseling. De hoge ammoniumreducties zijn in overeenstemming met het stikstofabsorptie-experiment.

Ook de pH van een oplossing is van grote invloed: een lage (<4.0) of hoge (>8.0) pH verlaagt de ammoniumabsorptie (Zhang *et al.*, 2011). De pH van de gebufferde bodemoplossingen (controlebehandeling) was rond de 5,0, wat de relatief hoge ammoniumabsorptie door actionine en optizec kan verklaren. In de oplossingen van overbekalkte heide, verzuurd eikenbos en verzuurde organische venbodem bleken de ammoniumreducties relatief laag. Dit kan een effect zijn van de aanwezigheid van andere kationen die in plaats van ammoniumionen door het zeoliet geabsorbeerd worden, zoals calcium in de overbekalkte heide of waterstof en aluminium in de zure bodems (Zhang *et al.*, 2011). Daarbij zijn zeolietkristallen instabiel in een oplossing met een lage pH en kan het hoge organischestofgehalte van de zure bodems zor-

gen voor verstopping van de openingen van de zeolietkanalen (Murayama *et al.*, 2003).

In de zure bodemoplossingen werd na toediening van actionine en optizec, ondanks de lagere ammoniumreductie, nog steeds nalevering van kalium en natrium vastgesteld. Bij verzuurd eikenbos en de venbodems werden de hoogste ammoniumreducties gevonden na toediening van vulkaminpoeder (resp. 17% en 8%; figuur 4). Dit kan verklaard worden door het feit dat vulkaminpoeder de pH van de zure bodemoplossingen verhoogt, waardoor de condities voor de ammoniumabsorptie door zeoliet verbeteren. Dit effect werd echter niet bij toediening van vulkaminkorrel gevonden, waarschijnlijk vanwege het kleinere contactoppervlak van de korrel vergeleken met het poeder.

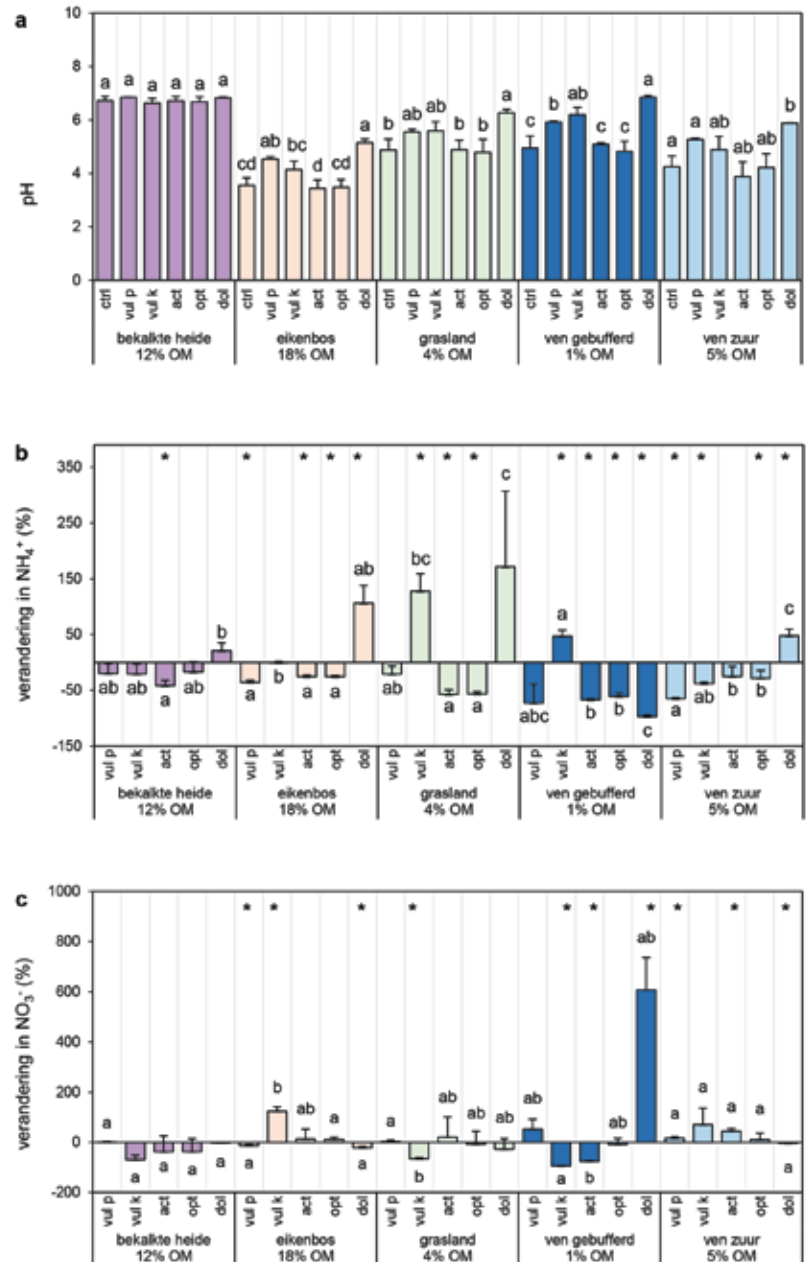
Behalve ammonium werd ook een fosfaatreductie gevonden na de toediening van beide typen vulkamin op de gebufferde bodems. Vulkaminzeolieten leveren veel calcium na, een mogelijke verklaring is daarom de vorming van calciumfosfaat. Dit werd ook gevonden in andere studies, met name onder gebufferde condities (Karapinar, 2009; Zhang *et al.*, 2011).

Invloed stikstofkringloop

Beide typen vulkamin en dolokal waren in staat de pH van de bodemoplossingen te verhogen, met uitzondering van de bekalkte heidebodem waar de pH al relatief hoog was (figuur 4). Verandering van de zuurgraad van de bodem kan verschillende bodemprocessen stimuleren, afhankelijk van de bodemcondities. Vooral in zure bodems kan door de toename van de bodem-pH de nitrificatie gestimuleerd worden, omdat de activiteit van nitrificerende bacteriën verlaagd is onder zuurdere condities (Boer & Kowalchuk, 2001). Als alleen gekeken wordt naar de afname van de ammoniumconcentratie kan een vertekend beeld ontstaan van de stikstofhuishouding in

Figuur 4 pH (a) en de percentuele verandering in ammonium- (b) en nitraatconcentratie (c) (% \pm SD) in de verschillende bodemplossingen twee weken na de toediening van de verschillende zeolieten en dolokal (n=3). Balken met verschillende letters geven significante verschillen aan per bodemgroep ($p < 0,05$; Anova met TukeyHSD of Welch's Anova met TamhaneT2). *: significante veranderingen vergeleken met de controle bodem binnen een zeoliet-/dolokalbehandeling na een log-transformatie ($p < 0,05$; (Welch) t-test). Afkortingen: vul p/k (vulkamin poeder/korrel), act (actionine), opt (optizec), dol (dolokal), OM (organisch materiaal). Absolute concentraties ammonium en nitraat in controle (0%) in beekakte heide: 139 en 2,5 $\mu\text{mol/l}$; eikenbos: 224 en 8,4 $\mu\text{mol/l}$; grasland: 105 en 43 $\mu\text{mol/l}$; ven gebufferd: 120 en 13 $\mu\text{mol/l}$; ven zuur: 33 en 2,7 $\mu\text{mol/l}$ respectievelijk.

Figure 4 pH (a) and the percentual change in ammonium (b) and nitrate (c) concentration (% \pm SD) in the soil solutions two weeks after the application of zeolite or dolocal (n=3). Values with different letters are significantly different at $p < 0.05$ within each soil treatment group (Anova with TukeyHSD or Welch's Anova with TamhaneT2). *: significant changes compared to the control within a zeolite/dolocal treatment after log-transformation ($p < 0,05$; (Welch) t-test). Abbreviations are as follows: vul p/k (vulkamin powder/grain), act (actionine), opt (optizec), dol (dolokal), OM (organic matter). Absolute concentrations ammonium and nitrate in the control (0%) in limed heathland: 139 and 2.5 $\mu\text{mol/l}$; oak forest: 224 and 8.4 $\mu\text{mol/l}$; grassland: 105 and 43 $\mu\text{mol/l}$; fen buffered: 120 and 13 $\mu\text{mol/l}$; fen acid: 33 and 2.7 $\mu\text{mol/l}$ respectively.



een bodem. Zo werd een relatief hoge ammoniumreductie gevonden in de gebufferde venbodem bij behandeling met vulkaminpoeder, terwijl ook de nitraatconcentratie sterk toenam. Het lage organischestofgehalte en de hoge ammoniumconcentratie in deze venbodem kan, in combinatie met de pH-stijging na toediening van vulkaminpoeder, de nitrificatie gestimuleerd hebben, met als resultaat een afname van ammonium, maar een toename van nitraat. Een zelfde, maar versterkt effect werd gevonden bij de dolokalbehandeling (figuur 4). Voor actionine en optizec werden geen toenames van nitraat gevonden. Dit suggereert dat de ammoniumreductie het effect is van de ammoniumabsorptie door zeoliet. In de bodemoplossing van kruidenrijk grasland werd een verhoogde ammo-

niumconcentratie gemeten 14 dagen na de toediening van vulkaminkorrel (figuur 4). De verhoging van de pH door de toediening van vulkamin kan de mineralisatie van organisch materiaal gestimuleerd hebben, met als resultaat de hogere ammoniumconcentratie. Dit zelfde effect is te zien bij de dolokalbehandeling. Het effect was ook zichtbaar in de bodemoplossing van verzuurd eikenbos behandeld met dolokal, maar niet met vulkaminkorrel omdat de pH hier redelijk laag was ($\text{pH} < 4.5$).

Implicaties en vervolgonderzoek

De experimenten geven een eerste indruk van de manier waarop zeolieten kunnen bijdragen aan het verlagen van de ammoniumbeschikbaarheid in verschillende



Figuur 5 Een paar jaar geleden is door Het Limburgs Landschap veldonderzoek naar de werking van actionine en vulkamin opgeschaald in een kruidenrijk grasland. (Foto: Het Limburgs Landschap.)

Figure 5 A few years ago, Het Limburgs Landschap scaled up field research into the effects of actionine and vulkamin in grassland. (Photo: Het Limburgs Landschap.)

typen natuurbodems en de manier waarop het toedienen van zeolieten de stikstofkringloop in de bodem beïnvloedt. Een belangrijke uitkomst is dat elk type zeoliet anders werkt door verschillen in structuur en samenstelling. Van de door ons geteste producten lijken actionine en optizec een hoge potentie te hebben voor het verlagen van het stikstofgehalte in de bodem, met name op (zwak)gebufferde bodems. Daarnaast leveren deze zeolieten ook kalium en natrium na, zelfs onder zure omstandigheden waar de ammoniumreductie gering was. Vulkamin bleek, in tegenstelling tot actionine en optizec, juist effectief in het verhogen van de pH van de bodemoplossingen, wat de afbraak van organisch materiaal of nitrificatie kan stimuleren en dus de stikstofbeschikbaarheid in de bodem juist kan verhogen. Vooral op geplagde bodems zou vulkamin dus een positief effect kunnen hebben op het verlagen van de stikstofbeschikbaarheid, zoals ook gevonden werd door Lucassen et al. (2019) op geplagde heidebodems.

Een eenmalige toepassing van zeoliet is een redelijk goedkope maatregel (optizec kost €0.29 per kg; actionine €0.37). Dat betekent niet dat zeolieten grootschalig toegepast moeten gaan worden om natuur in Nederland te herstellen, in de eerste plaats omdat dit bijdraagt aan de ontgronding van (natuur)gebieden in het buitenland, maar ook omdat er nog essentiële kennis ontbreekt. Zo

geven deze en eerder uitgevoerde experimenten met hun korte incubatietijd geen beeld van de langetermijneffecten. In theorie kunnen de geabsorbeerde ammoniumionen op termijn weer vrijkomen uit het zeoliet. Ook kan de absorptie van ammonium door zeolieten onder veldcondities anders zijn dan in de incubatie-experimenten, mede omdat niet-geplagde bodems veel organische stikstof kunnen bevatten, naast de hoeveelheid stikstof die jaarlijks neerslaat. Een hogere dosering van zeoliet zou in potentie voor nog lagere ammoniumconcentraties kunnen zorgen, maar uit eerder onderzoek is gebleken dat een te hoge dosering zorgt voor de vorming van aggregaten, wat de ammoniumabsorptie door zeolieten negatief beïnvloedt (Zhang et al., 2011). Er zal dus verder onderzocht moeten worden in welke mate zeolieten de negatieve effecten van de te hoge stikstofdepositie daadwerkelijk kunnen mitigeren. Het is hoog tijd voor experimenten in het veld, waarvan figuur 5 een voorbeeld laat zien.

Summary

Mitigating nitrogen deposition with zeolite. Potential applicability for different soil types. **Jelmer van Doorn, Esther Lucassen, Mats Douma, Michael van Roosmalen, Jan Roelofs & Fons Smolders**

Ammonium, ion exchange, minerals, mitigation, nature soils

Zeolite minerals are able to bind ammonium ions (NH_4^+) and simultaneously release cations due to their ion-exchange properties, making them promising to mitigate for the increased atmospheric nitrogen deposition. In pilot experiments, the ammonium removal of different zeolites was tested (vulkamin, actionine, optizec) when applied to an ammonium nitrate solution (based on mean annual nitrogen deposition in the Netherlands)

and to different non-calcareous nature soils. Highest ammonium removal was found two weeks after actio-nine and optizec application to the ammonium nitrate solution (> 80%) and the slightly buffered grassland and softwater lake soil solutions (> 50%). In addition, calcium, potassium and sodium cations were released, indicating ion exchange with ammonium. Reductions in ammonium were lower in the acidic (oak forest) and over-limed (heathland) soil solutions, due to higher cation concentrations (H^+ ; Ca^{2+}) which compete with ammonium ions for absorption by zeolites. Vulkamin was

less effective in ammonium removal and led to raised pH of the soil solutions, which in turn stimulated organic matter mineralization or nitrification, depending on initial soil conditions. More refined research about long-term effects and field experiments are needed to evaluate whether zeolites can be used in practice as mitigation tool for the raised nitrogen deposition.

Literatuur

Boer, W. de & G.A. Kowalchuk, 2001. Nitrification in acid soils: Micro-organisms and mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry* 33(7-8): 53-866.

Colella, C., 1996. Ion exchange equilibria in zeolite minerals. *Mineralium Deposita* (31): 554-562.

Dorland, E., L.J.L. van den Berg, R. Bobbink & J.G.M. Roelofs, 2003. Bekalking bij het herstel van gedegeneerde heiden en heischrale graslanden. *De Levende Natuur* 104(4): 144-147.

Groot, M.J., G. Kleijer-Ligtenberg, T. van Asseldonk & H. Hansma, 2016. Stalboekje melkvee 2016: handboek voor natuurlijke diergezondheidszorg met kruiden en andere natuurproducten. Wageningen. RIKILT, RIKILT-Uitgave 2016.704.

Inglezakis, V.J., 2005. The concept of "capacity" in zeolite ion-exchange systems. *Journal of Colloid and Interface Science* 281(1): 68-79.

Jones, L., C. Stevens, E.C. Rowe *et al.*, 2017. Can on-site management mitigate nitrogen deposition impacts in non-wooded habitats? *Biological Conservation* 212(B): 464-475.

Karapinar, N., 2009. Application of natural zeolite for phosphorus and ammonium removal from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials* 170(2-3): 1186-1191.

Lucassen, E.C.H.E.T., L.J.L. van den Berg, R. Aben *et al.*, 2014. Bodemverzuring en achteruitgang zomereik. *Landschap* 31(4): 184-193.

Lucassen, E.C.H.E.T., M.I.J.T. van Roomalen & J.G.M. Roelofs, 2019. Heideherstel met vulkamin. *Landschap* 36(1): 25-33.

Misaelides, P., 2011. Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review. *Microporous and Mesoporous Materials* 144(1-3): 15-18.

Mullekom, M. van, B. Vernooy, Y. Verstijnen *et al.*, 2019. Zeoliet als mogelijke oplossing voor de nitraatuitspoeling uit landbouwgronden. *Vakblad Natuur Bos Landschap* 16(4): 16-19.

Murayama, N., S. Yoshida, Y. Takami *et al.*, 2003. Simultaneous removal of NH_4^+ and PO_4^{3-} in aqueous solution and its mechanism by using zeolite synthesized from coal fly ash. *Separation Science and Technology* 38(1): 113-130.

Nijssen, M.E., M.F. WallisDeVries & H. Siepel, 2017. Pathways for the effects of increased nitrogen deposition on fauna. *Biological Conservation* 212(B): 423-431.

Smolders, A.J.P., E.C.H.E.T. Lucassen & J.G.M. Roelofs, 2002. The isoetid environment: biogeochemistry and threats. *Aquatic Botany* 73(4): 325-350.

Vogels, J.J., M.J. Weijters, H. Bergsma *et al.*, 2018. Van bodemherstel naar herstel van fauna in een verzuurd heidelandschap. *De Levende Natuur* 119(5): 200-204.

Zhang, M., H. Zhang, D. Xu *et al.*, 2011. Ammonium removal from aqueous solution by zeolites synthesized from low-calcium and high-calcium fly ashes. *Desalination* 277(1-3): 46-53.