



IJzerrijk drinkwaterslib en verschraling landbouwgronden

Proof of principle

Bij de inrichting van het Natuurnetwerk Nederland en van Natura 2000-gebieden worden op grote schaal landbouwgronden heringericht als soortenrijke natuur. Om op korte termijn fosfaatarme bodemcondities te krijgen wordt op locaties waar de bodem te rijk is om dit via maai-beheer en/of uitmijnen te bereiken, vaak gekozen voor verwijdering van de fosfaatrijke bodemlaag. Een mogelijk alternatief voor ontgronden is het toedienen van ijzerslib. Dit restproduct van de drinkwaterwinning verbetert de fosfaatbinding van de bodem.

Fosfaat wordt onder droge condities zeer goed gebonden aan ijzer en calcium. Hierdoor bevindt het fosfaatoverschot (cumulatieve gift minus de cumulatieve oogst) bij P-gelimiteerde bodems zich in de toplaag. Op voormalige landbouwgronden is geen sprake van nutriëntlimitatie. Omdat de totale hoeveelheid P hoog is komt een aanzienlijke fractie voor in het bodemvocht. Een beperkt aantal snelgroeiende soorten profiteert hiervan. Zonder iets te ondernemen tegen de hoge fosfaatbeschikbaarheid in de bodem zullen zich op voormalige landbouwgronden ongewenste ruigtevegetaties ontwikkelen (Wassen et al., 2005; Smolders et al., 2008). De mate van verzuuring hangt af van het bodemtype en de vochtgraad. Bodems die zeer rijk zijn aan ijzer, zoals veenweidebodems en kleibodems, kunnen grote hoeveelheden fosfaat binden. Maar in (ver)natte bodems komt fosfaat vrij. Vernatting leidt tot een sterke afname van de toevoer van zuurstof en bij gebrek aan zuurstof gaan micro-organismen bij de verbranding van organische stoffen over op de reductie van NO_3^- , Fe^{3+} en SO_4^{2-} en op de vorming van methaan. Gereduceerde ijzerverbindingen zijn relatief goed oplosbaar en het aan de ijzer(hydr)oxides gebonden fosfor komt hierbij vrij in het poriewater. Belangrijk voor een voorspelling van de fosfaatmobilisatie bij vernatting is niet alleen de grootte van de ijzergebonden fractie, maar ook de bezetting van het beschikbare ijzer met fosfaat (Lamers et al.

2005; Loeb et al., 2008; Chardon et al., 2014). Bij een hoge fosfaatconcentratie en -bezetting, zoals bij vrijwel alle voormalige landbouwgronden, is het zo goed als zeker dat er problemen zullen optreden met verzuuring. Onder droge tot vochtige condities blijft de verzuuring meestal beperkt tot dominantie van gestreepte witbol (*Holcus lanatus*). Onder natte omstandigheden, waarbij de toplaag van de bodem zuurstofloos wordt, treedt vaak massale ontwikkeling op van pitrus (*Juncus effusus*) of liesgras (*Glyceria maxima*). Op locaties met inundatie kan dit gepaard gaan met algenbloei of kroosontwikkeling. Om natuurontwikkeling mogelijk te maken moet eerst de fosfaatbeschikbaarheid verlaagd worden. Maatregelen als het afgraven van de P-verrijkte toplaag en/of uitmijnen worden vaak toegepast (Chardon et al., 2009; Van Mullekom et al., 2013). Afgraven is een snelle doeltreffende maatregel, maar kan ook nadelen hebben waaronder verstoring van het reliëf (archeologische en cultuurhistorische waarden), negatieve effecten op de lokale waterhuishouding en de soms hoge kosten van het afvoeren van de grond. Uitmijnen, waarbij de vegetatie wordt gemaaid en afgevoerd heeft als nadeel dat het onmogelijk is om een zeer hoge P-beschikbaarheid binnen afzienbare termijn (15-20 jaar) te verlagen (Chardon, 2009).

Zoals eerder beschreven hangt de beschikbaarheid van P niet af van de totale concentratie maar van de Fe:P-

ESTHER LUCASSEN,
WIM CHARDON, EDU
DORLAND, MILAN VAN
DER SLUYS, MONI
POELEN EN ALFONS
SMOLDERS

- ijzerhoudend drinkwaterslib
- fosfaatimmobilisatie
- natuurontwikkeling
- voormalige landbouwgrond
- waterpeil

Dr. E.C.H.E.T. Lucassen
Onderzoekcentrum B-ware,
Toernooiveld 1 Nijmegen,
E.Lucassen@b-ware.eu
Dr. W.J. Chardon Alterra team
duurzaam bodembeheer,
Wageningen UR
Dr. E. Dorland KWR
Watercycle Research Institute
M.L. van der Sluys BSc
Onderzoekcentrum B-ware
M.D.M. Poelen MSc
Onderzoekcentrum B-ware
Dr. A.J.P. Smolders
Onderzoekcentrum B-ware

Foto 1 Een hoog waterpeil in combinatie met een hoge concentratie Fe(II) in het bodemvocht leidt tot ontwikkeling van een kleine kluit met veel biomassa op veenweidebodembodem uit Drenthe.

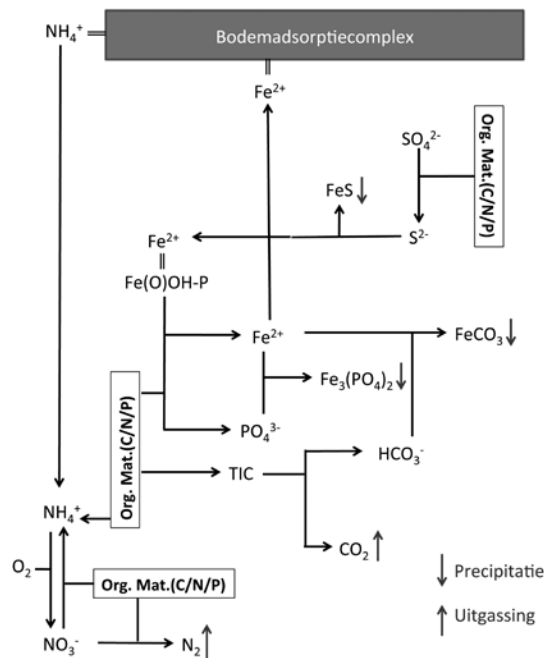
Picture 1 A high water table in combination with a high Fe(II) concentration in the pore water lead to development of a small clod with a high biomass development on degraded peat soil from Drenthe.

ratio. Het bijmengen van ijzer- of aluminiumhoudende materialen werkt mogelijk sneller en kosteneffectiever dan uitmijnen en is minder ingrijpend dan afgraven. Uit laboratoriumonderzoek is gebleken dat ijzerhydroxide, afkomstig uit ijzerrijk drinkwaterslib, uitstekend als immobiliserend materiaal kan fungeren in zandbodems (Chardon *et al.*, 2014). Dit slib is het bijproduct van de ontijzering van anaeroob grondwater als onderdeel van de drinkwaterproductie. Omdat in Nederland circa 60% van het drinkwater geproduceerd wordt uit grondwater is er een forse, doorlopende reststroom van ijzerslib (Koopmans *et al.*, 2010). Voor een deel wordt deze al

gebruikt voor het wegvangen van H_2S bij de biogasproductie, maar aanwending voor natuurontwikkeling op voormalige landbouwgronden zou een nieuwe interessante toepassing voor drinkwaterbedrijven kunnen zijn. Of het bijmengen van ijzerslib ook geschikt zou kunnen zijn voor het vastleggen van bodemfosfaat op terreinen die geregeld lang onder water staan, was onduidelijk. Om daar meer inzicht in te krijgen, zijn eind 2013 de effecten van ijzerslibadditie op de bodemchemie (figuur 1) en (ongewenste) groei van *H. lanatus* bepaald, voor zowel een gedegradeerde veenweidebodem als een zandige landbouwbodem bij waterstanden van 10 centimeter onder en 5 centimeter boven het maaiveld. Nadrukkelijk is voor een laboratoriumproef onder gecontroleerde condities gekozen (onder meer optimale menging van bodem en ijzerslib), zodat de werking kan worden gedemonstreerd (*proof of principle*), waarna opschaling naar het veld en de praktijk kan plaatsvinden.

Figuur 1 schematisch overzicht van belangrijke biogeochemische processen die optreden in vernatte ijzer-verrijkte landbouwbodems.

Figure 1 schedule with important biogeochemical processes taking place in rewetted iron-enriched former agricultural soils.



Materiaal en methoden

De bovenste 30 centimeter (zonder zode) van een venige (veraarde) en zandige (licht leemhoudende) voormalige landbouwgrond is respectievelijk verzameld bij een veenweide uit het Tusschenwater (Drenthe) en de Groote Heide in Heeze (Brabant). Van beide bodemtypen zijn twaalf 3,4 liter grote pvc-kolommen gevuld, zes met gezeefde grond zonder ijzerslib en zes met grond en bijmenging van ijzerslib tot een DPS (*Degree of Phosphate Saturation*) van 0,1. De DPS is de P-concentratie gedeeld door de som van de ijzer- en aluminiumconcentratie, gemeten in een oxalaatextract $P/(Fe+Al)-ox$. Een ratio lager dan 0,1 wordt als zeer gunstig voor natuurontwikkeling gezien (Chardon, 2009). Voor de zandige bodem uit Heeze kwam dit neer op een bijmenging van 65 gram ijzerslib (afkomstig van waterwinning Vessem) per kilogram bodem en voor de veraarde veenbodem uit

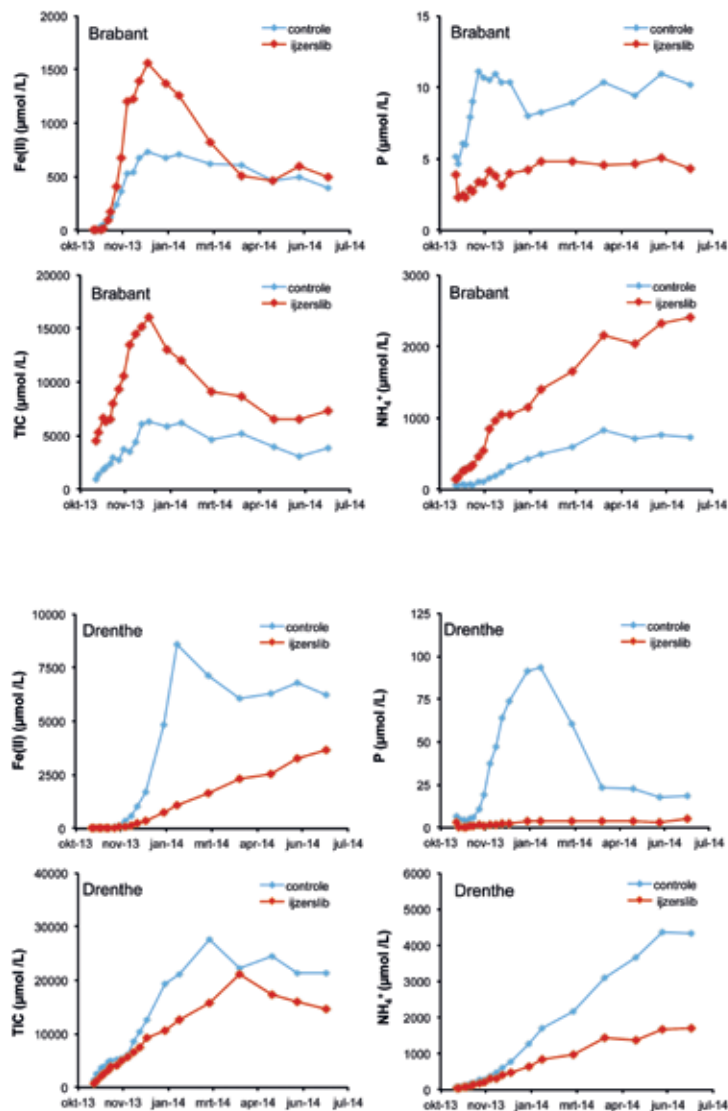
Drenthe op maar liefst 975 gram ijzerslib (waterwinning Sellingen).

Van elk bodemtype werden de cilinders met en zonder ijzerslib geplaatst in een zwarte plastic container (hxbxl = 50x40x65 cm). In de containers zijn achtereenvolgens twee waterregimes gehanteerd van 10 cm beneden maaiveld (constant veldvochtig) en 5 cm boven maaiveld (permanent nat). Het experiment is uitgevoerd in een donkere klimaatkamer bij een constante temperatuur van 20 °C. Gedurende achtereenvolgende maanden is porievocht verzameld met behulp van 10 cm lange Rhizons SMS-10, geïnstalleerd op een diepte van 0-10 cm (toplaag) en 20-30 cm (permanent natte bodemlaag). Hierna zijn met een smalle guts (doorsnede 1 cm) monsters uit de diepe en ondiepe bodemlaag genomen die onder meer een oxalaatextractie ondergingen onder anaerobe condities met stikstofgas om de voor de plant beschikbare hoeveelheid P te bepalen.

Aansluitend is in een kas de groei van *H. lanatus* op de bodems getest door, na het toedienen van circa 0,05 gram aan zaden, de biomassaontwikkeling te volgen van de kiemlingen. Na één maand zijn de planten geoogst. De kluitlengte is bepaald en de wortels zijn grondig gewassen. Het aantal stengels is geschat en de maximale spruit- en wortellengten zijn gemeten. Wortel en spruit zijn vervolgens gescheiden en gedroogd (24 uur bij 60 graden), waarna van beide de biomassa is bepaald.

Figuur 2 effecten van ijzerslib op de kwaliteit van het porievocht in de permanent waterverzadigde bodemlaag (> 20 cm). Gemiddelde waarden van de kolommen met lage (n=3) en hoge (n=3) waterstand zijn gegeven.

Figure 2 effects of iron sludge on the pore water quality of the permanent water saturated soil layer (> 20 cm). Mean values of the columns with low (n=3) and high (n=3) water table are given.



Resultaten en discussie

Effect op bodemchemie

In het bodemvocht in de permanent natte bodemlagen (20-30 cm diepte) nam de concentratie gereduceerd ijzer (Fe^{2+}) in alle gevallen toe (figuur 2). Het in oplossing gaan van ijzer is een gevolg van de chemische reductie van geoxideerd ijzer. Na inundatie wordt de bodem zuurstofloos (anaeroob) en kunnen ijzerreducerende bacteriën reactief organisch materiaal uit de bodem afbreken waarbij in plaats van zuurstof, geoxideerd ijzer (Fe^{3+}) als elektronenacceptor wordt gebruikt (ijzerreductie). Het hierbij vrijkomende Fe^{2+} is relatief goed oplosbaar waardoor het ophoopt in het poriewater. Na ongeveer twee maanden steeg in de meeste gevallen de ijzerconcentratie niet meer of nam deze af. Bij de reductie van organisch materiaal komt ook anorganisch koolstof vrij in de vorm van kooldioxide en bicarbonaat. Wanneer de concentraties van bicarbonaat en Fe^{2+} toenemen, kan er een oververzadiging aan sideriet (FeCO_3 , ijzercarbonaat) ontstaan waardoor er precipitatie van sideriet plaatsvindt en de ijzerconcentratie afneemt. Daarnaast kan ijzer adsorberen aan het bodemcomplex en aan ijzer(hydr)oxiden die (nog) niet gereduceerd zijn (Sharma, 2001), en kunnen Fe(II)hydroxides en ijzer(II,III)oxide (Fe_3O_4) ontstaan.

In de veengrond nam de concentratie ijzer veel sterker toe (factor 10 hoger) dan in de zandgrond. Dit is logisch aangezien de veengrond rijk is aan organisch materiaal en het ijzergehalte 36 maal hoger was dan in de zandgrond. Het ijzer zal in de toplaag van de bodem aanwezig zijn geweest, grotendeels in geoxideerde vorm en gevoelig voor reductie. In tegenstelling tot de zandgrond leidde het toedienen van ijzerslib aan de veengrond niet tot een verhoging van de ijzerconcentratie in het poriewater. Dit heeft deels te maken met de aanzienlijk hoge-

re mengverhouding van nagenoeg 1:1 waardoor ook de hoeveelheid reactief organisch materiaal wordt gehalveerd. Ook uit de toename van de concentratie van totaal anorganisch koolstof (TIC) voor de veengrond viel dit af te lezen. Bij de grond waaraan ijzerslib was toegediend was de TIC-toename in de eerste drie maanden ongeveer de helft van die bij de grond zonder ijzerslib. Opvallend was echter dat de toename van de ijzerconcentratie nog veel verder achterbleef. Dit kan verklaard worden door de binding van Fe^{2+} aan niet gereduceerde ijzerhydroxides (Sharma, 2001). Het ijzergehalte van de bodem werd na het toedienen van het ijzerslib heel erg hoog en maar een relatief klein deel hiervan werd in gereduceerde vorm in het bodemvocht gemeten. Als gevolg van de ijzerreductie wordt ook fosfor vrijgemaakt dat aan ijzer(III)(hydr)oxides is geadsorbeerd. Daarnaast komt er ook P vrij bij de anaerobe afbraak van organisch materiaal. De concentratie van P in het poriewater nam dan ook toe, net als ijzer (figuur 2). Het verloop van de fosforconcentratie volgde grofweg het verloop van de ijzerconcentratie in het poriewater. In de veengrond waaraan geen ijzer was toegediend, nam de concentratie P sterk toe tot zeer hoge waarden gedurende de eerste twee maanden na vernatting. De maximale concentratie bedroeg circa 100 $\mu\text{mol/L}$ en was daarmee 10 maal hoger dan in de zandbodem waarin de concentratie in het poriewater toenam tot iets meer dan 10 $\mu\text{mol P/l}$.

Door toediening van ijzerslib aan de zandgrond nam de P-concentratie in de diepe bodemlaag toe tot ongeveer 5 $\mu\text{mol/l}$ (figuur 2). Dit is de helft van de concentratie die is gemeten in de grond waaraan geen ijzerslib was toegediend, ondanks dat er meer ijzerreductie plaatsvond en er ook meer organisch materiaal werd afgebroken. Door het verhogen van het gehalte aan ijzer(III)(hydr)oxiden van de bodem is een groter deel van het P dat vrijkomt door ijzerreductie weer gebonden aan nog niet ge-

reduceerde ijzer(III)(hydr)oxiden, waardoor er per saldo minder P vrijkomt.

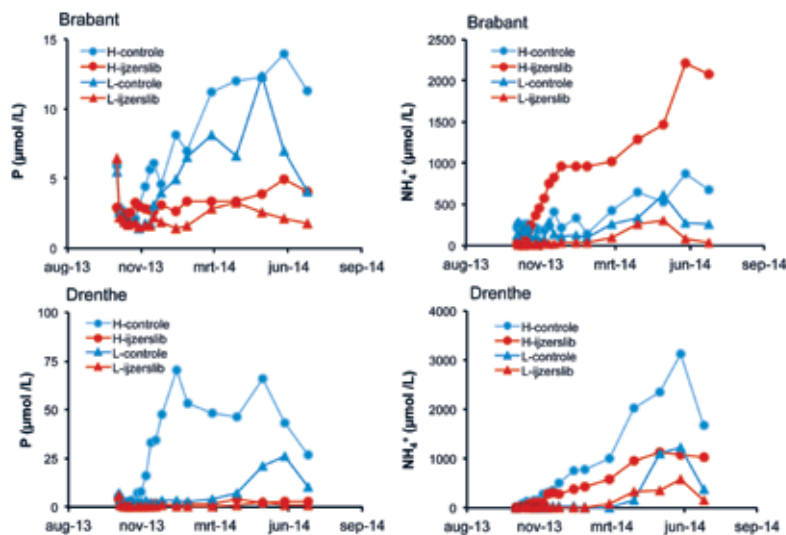
Toedienen van ijzerslib aan de veenbodem voorkwam een toename van P in het porievocht (figuur 2). Hier was een dusdanig grote overmaat aan ijzer(III)(hydr)oxiden aanwezig dat alle P die vrijkwam door ijzerreductie is gebonden aan nog niet gereduceerde ijzer(III)(hydr)oxiden. Opvallend is dat in de veengrond waaraan geen ijzerslib is toegediend de P-concentratie sterk afnam vanaf maand drie na inundatie van de bodem. Aan het eind van het experiment waren de P-concentraties gedaald van 100 $\mu\text{mol/l}$ naar 18 $\mu\text{mol/l}$ (figuur 2). De sterke toename van de P-concentratie in de vernatte veenbodems was dus duidelijk van tijdelijke aard. De afname in de tweede helft van het experiment kan mogelijk verklaard worden door de vorming van ijzer(II)fosfaat (vivianiet) dat net als ijzercarbonaat (sideriet) kan neerslaan in de bodem. Het vivianiet is herkenbaar aan een fel blauwe kleur. Deze is waargenomen tijdens het experiment in vliesjes die op het water dreven. Daarnaast kan mogelijk ook co-precipitatie van fosfaat met calciumcarbonaat een rol hebben gespeeld, en adsorptie aan gevormde ijzer(II)(hydr)oxides.

In het porievocht uit de toplaag (0-10 cm) is bij de veengrond waaraan geen ijzer was toegediend een duidelijk effect van het waterregime op de P-concentratie zichtbaar (figuur 3). Bij een laag waterpeil bleef de concentratie P relatief laag, wat overeenkwam met de lage concentratie ijzer in het porievocht onder de meer zuurstofhoudende condities. Het P blijft in dit geval gebonden aan Fe(III) in de bodem. Voor de zandbodem zonder ijzerslib was een zelfde patroon zichtbaar maar waren de verschillen in concentratie minder groot.

Voor een inschatting van de mogelijke effecten op plantengroei is het ook van belang om te kijken naar effecten van het bijmengen van ijzerslib op de beschikbaarheid

van stikstof (N). Bij de anaerobe afbraakprocessen in de bodems die met name gestuurd worden door de reductie van ijzer(III)hydroxiden komt ook NH_4^+ vrij. In de diepere lagen van de zandgrond was de NH_4^+ -concentratie hoger bij toediening van ijzerslib (maximaal $\pm 2500 \mu\text{mol/l}$) dan zonder toediening ($\pm 900 \mu\text{mol/l}$), zie figuur 2. Dit kan verklaard worden door een netto toename van de anaerobe afbraak door het toedienen van ijzerslib. De beschikbaarheid van Fe^{3+} in deze bodems is blijkbaar beperkend voor de anaerobe afbraak. Dit bleek ook uit de veel sterkere toename van de TIC-concentratie in de bodem waaraan ijzer was toegediend. Een andere mogelijke bron van NH_4^+ is verdringing van geadsorbeerd NH_4^+ (desorptie) door Fe^{2+} . Vanaf januari nam de Fe^{2+} -concentratie van het poriewater af maar de NH_4^+ -concentratie steeg verder. Dit zou door deze verdringing verklaard kunnen worden. In de veengrond nam de NH_4^+ -concentratie sterker toe in de situatie dat geen ijzer was toegediend. Zoals eerder beschreven leidt het toedienen van ijzerslib aan de veengrond tot een ongeveer 1 op 1 verdunning van de bodem. Per saldo is na toediening van slib per liter bodem minder organisch materiaal afgebroken – zie de kleinere initiële toename van de TIC-concentratie – waardoor ook minder NH_4^+ is vrijgekomen. Verder is in deze bodems mogelijk ook minder NH_4^+ vrijgekomen door desorptie. De concentratie van NH_4^+ in het bovenste porievocht is met name in de veengrond beïnvloed door het waterregime. Een laag waterpeil leidde tot lagere NH_4^+ -concentraties omdat er in veel mindere mate sprake was van anaerobe afbraak en juist meer van nitrificatie van NH_4^+ omdat bij een laag waterpeil zuurstof in de bodem treedt (figuur 3).

De concentratie van nitraat (NO_3^-) in het onderste porievocht nam in beide bodemtypen na vernatten snel af tot zeer lage waarden (data niet getoond). Dit komt doordat het NO_3^- denitrificeert tot stikstofgas onder zuurstoflo-



Figuur 3 effecten van ijzerslib op de concentratie fosfor en ammonium in het porievocht van de bodemtoplaag bij twee waterstanden (laag/droog en hoog/geïnundeerd). Gemiddelde waarden ($n=3$) zijn gegeven.

Figure 3 effects of iron sludge on the concentration of fosfor and ammonium in the pore water of the soil top-layer under two water tables (low/dry and high/inundated). Mean values ($n=3$) are given.

ze bodemcondities. Bij een laag waterpeil nam in de toplaag van de bodems de concentratie NO_3^- in het porievocht gedurende het experiment relatief langzaam af. Dit komt doordat er in de toplaag bij een laag waterpeil geen anaerobe condities heersen en er dus ook geen denitrificatie plaatsvindt. NO_3^- kan echter wel door diffusie naar de diepere bodemlaag verdwijnen waar het vervolgens kan worden gedenitrificeerd.

Effecten op groei gestreepte witbol

Voorafgaande aan het experiment met *Holcus lanatus* is de DPS van de toplaag van de bodem gemeten. Deze liet een mooie correlatie zien met de P-concentratie van het poriewater ($R^2 > 0,9$), zie figuur 4A. Door het toedienen van ijzerslib werd de voor natuurontwikkeling beoogde verlaging van de DPS voor beide bodemtypen van 0,2-0,3 naar 0,1 bereikt. De DPS van de toplaag van de veraarde

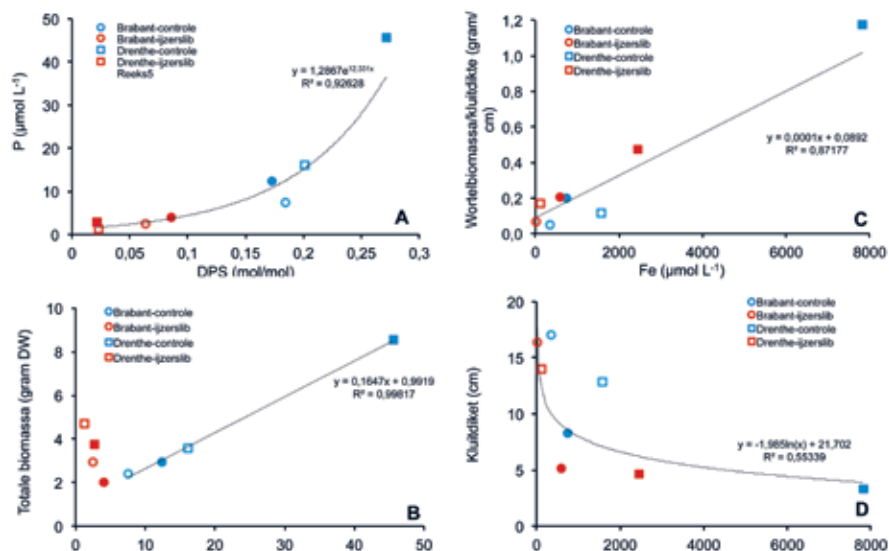
veengrond waaraan geen ijzerslib is toegediend was duidelijk hoger in de kolommen met een hoge dan met een lage waterstand. Zuurstof leidt tot oxidatie van ijzer waardoor de capaciteit van de bodem om fosfaat te binden toeneemt. De totale biomassa van *H. lanatus* op de bodems correleerde sterk met de P-concentratie in het porievocht ($R^2 = 0,998$). Dit gold niet voor de veengrond die met ijzerslib behandeld is (figuur 4B). Hier zijn de P-concentraties in het poriewater lager of gelijk aan die gemeten in de zandbodems waaraan ijzerslib is toegediend. Tegelijkertijd is de totale biomassa groter. De biomassa wordt dus niet enkel bepaald door de beschikbaarheid van P. Bij de lage waterpeilen kunnen de wortels dieper in de bodem doordringen wat resulteert in een dikkere wortelkluif (figuur 4D). Maar wanneer de ijzerconcentratie van het poriewater toeneemt is de beworteling minder diep (foto 1; figuur 4D), omdat gereduceerd ijzer in bepaalde concentraties giftig kan zijn voor planten en met de name de wortelgroei remt (Laan et al., 1991). Dit kan de plant echter compenseren door relatief meer wortelbiomassa in de zuurstofhoudende toplaag van de bodem te maken (gram wortelbiomassa/cm kluifdikte), zie figuur 4C. De bodem met de hoogste ijzerconcentratie in het poriewater (veengrond zonder ijzerslib) heeft bij een hoge waterstand de kleinste kluifdikte (figuur 4D), maar maakt tevens veel meer wortelbiomassa aan ten opzichte van de dikte van de kluif. Ook de veengrond waaraan ijzer is toegediend heeft bij een hoge waterstand een dunne kluif en eveneens een relatief hoge worteldichtheid. De beworteling wordt dus sterk beïnvloed door de combinatie van waterpeil en ijzerrijkdom van de grond en beïnvloedt hiermee naast de P-beschikbaarheid ook de biomassa productie van de planten. Het toedienen van ijzerslib aan de veenweidebodem met een hoog waterpeil leidde netto

tot de relatief sterkste biomassa-afname van *H. lanatus* (foto 2).

De ontwikkelde P-concentraties in de vernatte met ijzerslib behandelde bodems indiceren dat door het toedienen van het ijzerslib ook daadwerkelijk goede condities voor schrale soortenrijke natuur (o.a. dotterbloemhooilanden, veldrusschraalanden) kunnen ontstaan. De gemiddelde P-concentraties op het einde van het experiment bedroegen namelijk 4,1 µmol/l (Brabant) en 2,6 µmol/l (Drenthe) wat in de orde van grootte ligt van waarden ($3,3 \pm 2,9$ µmol/l) gemeten in ijzerrijke bodems afkomstig van locaties uit natuurgebieden met een fraaie soortenrijke vegetatie (n=42; dataset Onderzoekcentrum B-ware).

Conclusies en implicaties voor natuurbeheer

Op voedselrijke landbouwgrond leidt een verhoging van het waterpeil tot een hogere biomassa-productie van ongewenste grassen (*H. lanatus*) wanneer de DPS van de bodem relatief hoog is ($>> 0,2$) en er als gevolg van ijzerreductie een forse toename plaatsvindt van de P-beschikbaarheid. Door het toedienen van ijzerslib en het verlagen van de DPS tot waarden lager dan 0,1, neemt de P-concentratie van het poriewater sterk af en leidt een gelijktijdige verhoging van de waterstand zelfs tot een afname van de biomassa-productie van *H. lanatus*, mede vanwege optredende ijzertoxiciteit. De ontwikkelde P-concentraties zijn ook kenmerkend voor ontwikkeling van soortenrijkere ijzerrijke systemen. Het optreden van ijzertoxiciteit zal voor het herstel van bepaalde vegetatietypes echter een nadeel zijn. Het voordeel van de ontstane ijzerrijkdom is dat er geen problemen te verwachten zijn met interne eutrofiëring ten gevolge van vernatting onder sulfaatrijke condities (Smolders et al., 2006). Een ander nadeel van het toedienen van ijzerslib onder natte



Figuur 4 (A) correlaties tussen de DPS (mate van P-verzadiging) en de concentratie P in het poriewater, (B) de concentratie P in het bodemvocht en de totale biomassa van *H. lanatus*, (C) de concentratie Fe in het bodemvocht en de ratio tussen de wortelbiomassa en de kluitdikte, en (D) Fe-concentratie in het bodemvocht en kluitdikte. Gesloten symbolen geven de waarden bij de hoge waterstand, open symbolen bij de lage waterstand. Gemiddelde waarden (n=3) zijn gegeven. De P-concentratie betreft de concentratie op het einde van de incubatieproef.

Figure 4 (A) correlation between the DPS (degree of P saturation) and the P concentration in the pore water., (B) the P concentration in the pore water and the total biomass production of *H. lanatus*, (C) the P concentration in the pore water and the root biomass:clod thickness ratio and (D) the P concentration in the pore water and clod thickness. Closed symbols represent values at the high water table, open symbols at the low water table. Mean values (n=3) are given. The P concentration is the concentration at the end of the incubation experiment.



Foto 2 IJzerslib remt de biomassa-ontwikkeling van *H. lanatus* op vernatte bodem met een hoge DPS en sterke P-mobilisatie ten gevolge van Fe-reductie .

Picture 2 Iron sludge inhibits biomass production of *H. lanatus* on rewetted soil with a high DPS and a strong P mobilization as a consequence of Fe reduction.

omstandigheden is dat de concentraties van NH_4^+ sterk kunnen toenemen (afhankelijk van het type ijzerslib). Dotterbloemhooilanden en broekbosvegetaties worden gekenmerkt door zeer ijzerrijke bodems waardoor met name soorten die minder gevoelig zijn voor ijzertoxiciteit tot ontwikkeling kunnen komen. Voor het herstel van dit soort vegetatietypen lijkt het toedienen van ijzerslib in combinatie met vernatting in ieder geval een kansrijke maatregel. Het is dan wel aan te raden maaisel van de doelvegetatie aan te brengen om de kans op vestiging van deze soorten te vergroten. De laboratoriumproef laat zien dat het toedienen van ijzerslib aan P-rijke bodems succesvol kan zijn in het verlagen van de P-beschikbaarheid en het remmen van de groei van ongewenste snelgroeiende grassen (*proof of principle*). Of deze maatregel zich ook in de praktijk

bewijst, wordt momenteel met meerdere veldexperimenten in Nederland onderzocht in het kader van TKI (Topconsortia Kennis en Innovatie) Watertechnologie. Indien aan een toplaag van een bodem een te grote hoeveelheid ijzerslib zou moeten worden toegediend om de DPS in voldoende mate te verlagen, kan een combinatie van ondiep plaggen met het toedienen van een kleinere hoeveelheid ijzerslib worden overwogen. Waarschijnlijk is de combinatie van ondiep plaggen en toedienen van ijzerslib veel kansrijker om fosforarme condities te bereiken, dan het toedienen van ijzerslib op de meest fosforrijke toplaag van de bodem.

Dank

Dit onderzoek werd gedeeltelijk gefinancierd door TKI Watertechnologie, Brabant Water, Vitens en Waterbedrijf Groningen en gedeeltelijk door Onderzoekscentrum B-ware.

Summary

Iron sludge and the lowering of P availability on former agricultural lands

Esther Lucassen, Wim Chardon, Edu Dorland, Milan van der Sluys, Moni Poelen & Alfons Smolders
iron sludge, phosphate immobilisation, nature development, former agricultural land, water table

The possibility to lower P availability and growth of grasses for nature development on former agricultural lands was tested by adding iron sludge from groundwater extraction processes. Two different soil types (degraded peat and non calcareous sandy soil) were test-

ed under two different water tables: moist (water table 10 cm beneath ground level) and permanent wet (water table 5 cm above ground level). The results show that rewetting of nutrient-rich agricultural lands leads to an undesired higher biomass production of competitive grasses (e.g. *H. lanatus*) in case the DPS (Degree of Phosphate Saturation) of the agricultural soil is relatively high (around 0.3) in combination with the occurrence of high Fe reduction rates leading to P mobilization. By decreasing the DPS with iron sludge down to 0.1 this phenomenon does not take place.

Literatuur

- Chardon, W.J. 2009.** Mogelijkheden voor immobiliseren van bodemfosfaat in het kader van natuurontwikkeling. Rapport 1870. Wageningen. Alterra.
- Chardon, W.J., J.E. Groenenberg & G.F. Koopmans, 2014.** Immobiliseren fosfaat met ijzerslib. Landschap 31/3: 117-122.
- Chardon, W.J., F.P. Sival, R.H. Kemmers, S.P.J. van Delft & G.F. Koopmans, 2009.** Is het mogelijk om met uitmijnen in plaats van ontgronden voldoende fosfaat kwijt te raken? De Levende Natuur 110: 39-42.
- Koopmans, G.F., W.J. Chardon & J.E. Groenenberg, 2010.** Karakterisatie van ijzerslib en -zand. Rapport 2047. Wageningen. Alterra.
- Laan, P., A.J.P. Smolders & C.W.P.M. Blom, 1991.** The relative importance of anaerobiosis and high iron levels in flood-tolerance of Rumex species. Plant and Soil 136: 153-161.
- Lamers, L., E. Lucassen, F. Smolders & J. Roelofs, 2005.** Fosfaat als adder onder het gras bij 'nieuwe natte natuur'. H2O 38(17): 28-30.
- Loeb, R., L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2008.** Prediction of phosphorus mobilisation in inundated floodplain soils. Environmental Pollution 156: 325-331.
- Mullekom, M. van, E. Lucassen, M. Weijters, H. Tomassen, R. Bobbink & A. Smolders, 2013.** Van landbouw naar natuur: gericht op zoek naar kansen! De Levende Natuur 114(4): 120-126.
- Sharma, S.K., 2001.** Adsorptive iron removal from groundwater. Proefschrift. ISBN 9054104309 Delft.
- Smolders, A.J.P., L.P.M. Lamers, E.C.H.E.T. Lucassen & J.G.M. Roelofs, 2006.** Internal eutrophication: How it works and what to do about it – a review. Chemistry & Ecology 22: 93-111.
- Smolders, A.J.P., E.C.H.E.T. Lucassen, M. Van der Aalst, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2008.** Decreasing the abundance of *Juncus effuses* on former agricultural lands with noncalcareous sandy soils: possible effects of liming and soil removal. Restoration Ecology 16 (2): 240-248.
- Wassen, M.J., H. Olde Venterink, E.D. Lapshina & F. Tanneberger, 2005.** Endangered plants persist under phosphorus limitation. Nature 437: 547-550.