



ALTERRA

WAGENINGEN UR

Mogelijkheden voor immobiliseren van bodemfosfaat in het kader van natuurontwikkeling

W.J. Chardon

Alterra-rapport 1870, ISSN 1566-7197



Mogelijkheden voor immobiliseren van bodemfosfaat in het kader van natuurontwikkeling

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Directie Natuur, als beantwoording van een helpdeskvraag; LNV-programma BO-02-001-007.

Mogelijkheden voor immobiliseren van bodemfosfaat in het kader van natuurontwikkeling

W.J. Chardon

Alterra-rapport 1870

Alterra, Wageningen, 2009

REFERAAT

Chardon W.J. 2009. *Mogelijkheden voor immobiliseren van bodemfosfaat in het kader van natuurontwikkeling*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1870. 27 blz.; 2 fig.; 1 tab.; 26 ref.

Een hoge beschikbaarheid van fosfaat in de bodem van voormalige landbouwgronden waarop natuur wordt ontwikkeld verkleint de kans op een soortenrijke vegetatie, en vergroot de kans op het dominant worden van ruigtesoorten. In het kader van een helpdeskvraag vanuit de Directie Natuur van het Ministerie LNV werd onderzocht of het immobiliseren (vastleggen) van bodemfosfaat mogelijk is om de kans op een gewenste natuurontwikkeling te vergroten.

Uit literatuuronderzoek blijkt dat het goed mogelijk is om fosfaat zodanig vast te leggen dat de oplosbaarheid van fosfaat met 80-90 % afneemt, en daarmee de beschikbaarheid voor de plant. Dit betekent dat door immobilisatie de kans op natuurontwikkeling kan worden vergroot. Voorwaarde is dat een voldoende hoge dosis immobiliserend materiaal wordt gebruikt, en dat een verzuring van de bodem wordt voorkomen.

Trefwoorden: fosfaat, immobiliseren, natuurontwikkeling

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra vestrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.boomblad.nl/rapportenservice.

© 2009 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Mechanisme van immobiliseren en gebruikte materialen	13
2.1 Mechanisme	13
2.2 Voor immobiliseren gebruikte materialen	15
3 Praktijkervaringen met immobiliseren	17
3.1 Experimenten ten behoeve van natuurontwikkeling	17
3.2 Experimenten ten behoeve van verminderen uit- of afspoeling	18
3.3 Samenvatting praktijkervaringen met immobilisatie	20
3.4 Kosten van immobilisatie	20
3.5 Aanbevelingen voor verder onderzoek	20
4 Conclusies	23
Literatuur	25

Woord vooraf

Natuurontwikkeling op voormalige landbouwgronden vindt op dit moment vooral plaats ten behoeve van de realisering van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS). In het verleden werd bij deze omvorming van landbouw naar natuur vrijwel uitsluitend rekening gehouden met een mogelijk nadelige invloed van de aanwezigheid van een overmaat aan stikstof. Recent werd echter duidelijk dat ook fosfaat, dat zich vaak sterk heeft ophoopt in landbouwgronden, hierbij ook een nadelige invloed heeft. Dit is met name het geval wanneer het gewenste natuurdoel gekenmerkt wordt door een lage biomassa productie en een hoge soortenrijkdom. In meerdere studies is beschreven dat de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem een sleutelfactor is voor de soortendiversiteit en drogestof productie van graslanden.

Bij een te hoge beschikbaarheid van bodemfosfaat wordt meestal geadviseerd om de betreffende bodemlagen af te graven. Dit is echter niet altijd toegestaan of gewenst. Het verwijderen van het fosfaat door middel van het oogsten van gewassen (uitmijnen) kan een alternatief zijn voor afgraven, maar dit kan in sommige gevallen een (te) langdurig proces zijn. Het vastleggen van het bodemfosfaat door het toevoegen aan de bodem van materialen die fosfaat binden, immobiliseren genoemd, is mogelijk een alternatief voor afgraven of uitmijnen.

Aan Alterra is door B.C. Volkers, Directie Natuur van het Ministerie LNV, de Helpdeskvraag gesteld of immobiliseren van bodemfosfaat mogelijk is, zo ja met welke materialen, en welke problemen daarbij zouden kunnen optreden.

Rolf Kemmers en Wim de Vries (beiden Alterra) worden bedankt voor het kritisch doorlezen van het rapport en het geven van aanwijzingen voor verbeteringen.

Samenvatting

Een hoge beschikbaarheid van bodemfosfaat in de bodem van voormalige landbouwgronden waarop natuur wordt ontwikkeld verkleint de kans op een soortenrijke vegetatie, en vergroot de kans op het dominant worden van ruigtesoorten.

De beschikbaarheid van bodemfosfaat kan enerzijds worden verlaagd door de grond uit te mijnen, en anderzijds door het fosfaat te immobiliseren (vast te leggen). Een inventarisatie werd gemaakt van bestaande kennis over het immobiliseren van fosfaat in de bodem. In het kader van natuurontwikkeling is nog nauwelijks onderzoek uitgevoerd naar het immobiliseren van fosfaat, en de resultaten ervan zijn bovendien niet altijd bruikbaar. Daarentegen is vooral in de USA veel onderzoek gedaan naar immobilisatie, met als doel om het risico van uit- of afspoeling van fosfaat te verkleinen. Uit dat onderzoek blijkt dat het goed mogelijk is om fosfaat zodanig vast te leggen dat de oplosbaarheid van fosfaat met 80-90 % afneemt.

Doordat de oplosbaarheid van fosfaat sterk gecorreleerd is met de beschikbaarheid voor de plant, betekent dit dat door immobilisatie de kans op natuurontwikkeling ook kan worden vergroot. Voorwaarde is dat een voldoende hoge dosis immobiliserend materiaal wordt gebruikt, en dat een verzuring van de bodem wordt voorkomen.

1 Inleiding

Natuurontwikkeling op voormalige landbouwgronden vindt op dit moment vooral plaats ten behoeve van de realisering van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS). Recent werd duidelijk dat fosfaat (P), dat zich vaak sterk heeft ophoopt in landbouwgronden, hierbij een nadelige invloed heeft. Dit is met name het geval wanneer het gewenste natuurdoel gekenmerkt wordt door een lage biomassa productie en een hoge soortenrijkdom. Een belangrijke voorwaarde voor een hoge soortenrijkdom is dat de beschikbaarheid van bodemfosfaat laag is. Chambers et al. (1999) onderzochten 578 graslandlocaties in Engeland en Wales, en vonden de hoogste soortenrijkdom bij een beschikbaarheid, gemeten als P-Olsen, van $< 10 \text{ mg P L}^{-1}$ grond. Binnen de landbouw geldt dat de beschikbaarheid van fosfaat dan zeer laag wordt genoemd (Sival en Chardon, 2003). In een inventariserend onderzoek op 24 terreinen in Noord-Brabant en Limburg werd gevonden dat soorten die kenmerkend zijn voor voedselarme omstandigheden vooral voorkomen bij een Pw die lager is dan 5, wat ook valt in het landbouwkundig gezien zeer lage traject ($< 10 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ L}^{-1}$ grond; Sival en Chardon, 2003; Sival et al., 2004).

Wanneer in voormalige landbouwgronden de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem hoog is, en de kansen op natuurontwikkeling daardoor klein zijn, dan wordt in veel gevallen geadviseerd om de bovengrond af te graven. Afgraven leidt echter vaak tot hoge (transport)kosten, het vinden van een bestemming voor de af te voeren grond is soms moeilijk, en er kan verstoring optreden van de hydrologie t.o.v. bestaande natuurterreinen. Afgraven is niet altijd toegestaan, vanwege archeologische en/of cultuurhistorische waarden, en het kan een negatieve invloed hebben op een nog aanwezige zaadbank (Sival et al., 2004). Door afgraven treedt een ecologische verarming op van de bodem, door het verdwijnen van ecologische groepen uit het bodemvoedselweb (Kemmers et al., 2007). Problemen met de afzet van de grond hebben recent geleid tot het sterk stijgen van de kosten per hectare, en het bij- of uitstellen van plannen voor ontgronden (Bekker, 2009).

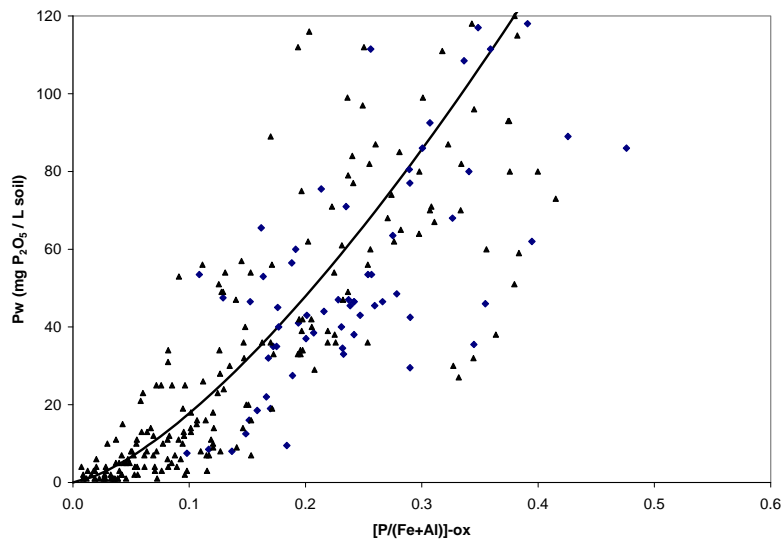
Het verwijderen van het fosfaat uit de bodem door onttrekking via een gewas (Koopmans et al., 2004; Sival en Chardon, 2004; Chardon, 2008) kan een alternatief zijn voor afgraven, maar dit kan in sommige gevallen een (te) langdurig proces zijn. Om de bodem goed te kunnen uitmijnen moet er voor gezorgd worden dat de productie van af te voeren biomassa zo hoog mogelijk blijft. Hiervoor is het na verloop van tijd noodzakelijk om stikstof, kalium en sporenelementen toe te dienen, maar bij sommige beheersvormen van natuurterreinen is dit niet toegestaan.

Een vraag is of het immobiliseren van het bodemfosfaat zou kunnen leiden tot een voldoende verlaging van de beschikbaarheid om gewenste natuurdoelen te bereiken. In een literatuurstudie is nagegaan of immobiliseren van bodemfosfaat mogelijk is, zo ja met welke materialen, en welke problemen daarbij zouden kunnen optreden.

2 Mechanisme van immobiliseren en gebruikte materialen

2.1 Mechanisme

In de bodem wordt fosfaat vooral gebonden aan ijzer (Fe)- en aluminium(Al)-hydroxiden. Hoe meer fosfaat een bodem bevat, hoe meer deze Fe- en Al-hydroxiden “verzadigd raken” met fosfaat, en hoe zwakker fosfaat door de bodem wordt vastgelegd. De beschikbaarheid van fosfaat voor de vegetatie, en het risico op uitspoeling van fosfaat zijn dan ook gecorreleerd met de verhouding tussen P en (Fe+Al) (beide gemeten in een oxalaatextract en uitgedrukt in molen). Deze verhouding wordt ook wel de verzadigingsindex genoemd (of PSI = Phosphorus Saturation Index). Een voorbeeld is te zien in de bijgaande figuur, waarin voor een groot aantal monsters (>300) de beschikbaarheid van P, gemeten via een waterextractie (Pw) is uitgezet tegen de PSI. Het blijkt dat de Pw (niet-lineair) toeneemt met de PSI; de spreiding rond de lijn wordt veroorzaakt doordat de dataset uiteenlopende grondsoorten bevat, met een verschillende bemestingsachtergrond.



Figuur 1. Verband tussen de verzadigingsindex PSI, $[P/(Fe+Al)]-ox$, en de beschikbaarheid van fosfaat (Pw); uit Chardon (1994).

Bij lage waarden van de PSI worden ook zeer lage waarden gevonden van de Pw. Voor de hierboven weergegeven dataset geldt dat bij $PSI < 0,05$ de Pw gemiddeld 3,3 mg P_2O_5/L grond is (st.afw. 3,0); bij $PSI < 0,1$ is dit 7,8 mg P_2O_5/L grond (st.afw. 8,7). Door Van Delft et al. (2006) wordt gesteld dat bij $PSI < 0,05$ het uitgangspunt voor natuurontwikkeling zeer gunstig is, en dat bij $PSI < 0,1$ via uitmijnen hiervoor een goed uitgangspunt binnen korte termijn kan worden bereikt.

De curve in figuur 1 kan worden beschreven met de vergelijking:

$$P_w = 481 * PSI^{1.433} \quad (1)$$

Met vergelijking (1) kan worden geschat met welk percentage de P_w kan afnemen bij een zekere afname van de PSI, wanneer (Fe+Al)-ox toeneemt :

$$\% \text{ afname } P_w = 100 \times [1 - (PSI_2/PSI_1)^{1.433}] \quad (2)$$

hierin hoort PSI_2 bij een grond waarin P is geïmmobiliseerd door het toevoegen van Fe- of Al-oxiden, en PSI_1 hoort bij een onbehandelde grond.

Een aantal schattingen voor de afname van P_w worden gegeven in Tabel 1 :

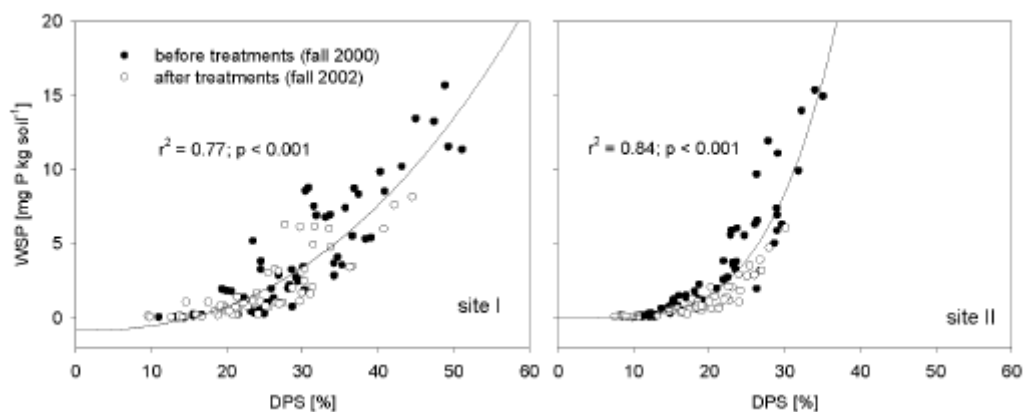
Tabel 1. Schatting van de afname van de P_w door een afname van de PSI, volgens vergelijking (2)

afname PSI (= PSI_2/PSI_1)	1/2	1/3	1/4
% afname P_w	63	79	86

Het verlagen van de P_w kan dus gebeuren door het verlagen van de verzadigings-index PSI. Dit kan óf door verlaging van het fosfaatgehalte van de bodem (P-ox) via uitmijnen, óf door het verhogen van het Fe- of Al- gehalte van de bodem [(Fe+Al)-ox], door het toevoegen van Fe- of Al-houdende stoffen aan de bodem.

Een voorbeeld van een studie waarin is geprobeerd om door het toevoegen van ijzer aan de bodem de wateroplosbaarheid van P te verlagen wordt beschreven door Schärer (2003) en Schärer et al. (2007). Een hoog gehalte aan wateroplosbaar P wordt gezien als een risicofactor voor verlies van P naar het oppervlaktewater via oppervlakkige afspoeling. Zij onderzochten op twee plekken ("site I en II") het gehalte aan wateroplosbaar P (WSP) als functie van de DPS. De DPS is een parameter die vergelijkbaar is met de PSI: $DPS=200*[P/(Fe+Al)]$ -ox. Gevonden werd dat WSP sterk toeneemt bij een stijging van de DPS (figuur 2).

In een laboratoriumexperiment werd ijzer aan de bodem toegevoegd. Hierdoor steeg (Fe+Al), en daalde dus de DPS; dit is in de figuur te zien aan de zwarte en witte bolletjes: de witte bolletjes werden gemeten na de toevoeging van Fe, en liggen links van, en lager dan de zwarte bolletjes (gemeten vóór de toevoeging van Fe). Zowel DPS als WSP werden dus verlaagd door de toevoeging van Fe aan de bodem.



Figuur 2. Stijging van wateroplosbaar P (WSP) bij een toename van de fosfaatverzadigingsgraad (DPS, $200 * [P/(Fe+Al)]$ -ox). Uit: Schärer (2003).

2.2 Voor immobiliseren gebruikte materialen

Vooraf om het risico van fosfaatuitspoeling vanuit de bodem te verminderen is op veel plaatsen geëxperimenteerd met het toevoegen van stoffen aan de bodem waaraan fosfaat wordt vastgelegd. In vrijwel alle gevallen betreft dit materialen met een hoog gehalte aan ijzer en/of aluminium. Vooral in de Verenigde Staten is hieraan veel onderzoek uitgevoerd, waarbij uiteenlopende stoffen zijn gebruikt. In Nederland is door Schoumans en Köhler (1995) op laboratorium- en veldschaal onderzoek gedaan naar de capaciteit van verschillende materialen om fosfaat te binden. Voorbeelden van gebruikte materialen zijn:

- zouten, zoals $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ in combinatie met $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- ijzeroer
- boehmite ($\gamma\text{-AlOOH}$, een synthetisch oxide)
- ijzer- of aluminiumslib afkomstig van waterzuivering of drinkwaterbereiding
- afvalstoffen van aluminiumfabricage vanuit bauxiet
- vliegias.

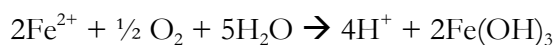
Belangrijk bij het gebruik van zouten is dat bij het neerslaan van hydroxiden zuur vrijkomt, wat in een slecht gebufferde grond tot een sterke verlaging van de pH kan leiden. Een voorbeeld is het neerslaan van $\text{Al}(\text{OH})_3$ volgens:



Een oplossing hiervoor is het gelijktijdig toedienen van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ of CaCO_3 om het gevormde zuur weg te vangen. Een ander nadeel is dat erbij dit neerslaan anionen vrijkomen zoals NO_3^- of SO_4^{2-} wat respectievelijk tot eutrofiëring of een zoutshock in het oppervlaktewater kan leiden. Wanneer het vastleggen van fosfaat in de bodem overwogen wordt dan zou gezocht moeten worden naar een methode om ijzerhydroxiden aan te maken zonder dat een bijproduct ontstaat (Chardon et al., 1996).

Een alternatief voor het gebruik van zouten is het gebruik van Fe- of Al-houdend slib dat wordt geproduceerd bij het bereiden van drinkwater. Vooral bij de bereiding van drinkwater uit oppervlaktewater is het vaak noodzakelijk om opgeloste verbindingen te verwijderen, door deze neer te slaan m.b.v. bijvoorbeeld $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Hierbij wordt slib geproduceerd met een hoog gehalte aan aluminium, dit is op veel plaatsen in de USA gebruikt om P in de bodem vast te leggen. Een voordeel van het gebruik van afvalstoffen zoals ijzer- of aluminiumslib of vliegias is dat de materialen goedkoop zijn. Nadelen zijn dat zij vaak verontreinigingen bevatten zoals zware metalen, en dat ze heterogeen zijn zodat de werkzaamheid niet altijd goed voorspelbaar is (Schärer, 2003).

Bij het zuiveren van grondwater voor het gebruik als drinkwater of proceswater wordt het ruwe grondwater belucht. Anaeroob grondwater bevat vaak opgelost Fe^{2+} , dat onder invloed van zuurstof wordt geoxideerd tot $\text{Fe}(\text{OH})_3$, volgens:



In de provincie Brabant zijn 34 waterproductiebedrijven actief van het drinkwaterbedrijf Brabant Water N.V., en deze bedrijven produceren circa 700 ton Fe in de vorm van Fe-slib per jaar (R. van Oers, pers. meded.).

Een mengsel van $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bleek in het laboratorium het meest effectief om fosfaat vast te leggen, en ook op veldschaal nam mobiel fosfaat sterk af nadat dit mengsel aan de bodem was toegediend; de werking op langere termijn is niet geheel zeker (Schoumans en Köhlerberg, 1995). Toevoegen van kalk werd ook gedaan door Schärer (2003) en Schärer et al., (2007) bij het toedienen van $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. De door hen gevonden sterke afname van de fosfaatverzadigingsgraad (DPS) en wateroplosbaar P (WSP) werd hierboven genoemd; de werking op langere termijn, het tegengaan van oppervlakkige afstroming van P, was in hun proef echter niet groot, waarschijnlijk doordat alleen de bovenste 10 cm van de bodem was behandeld.

De benodigde dosering van Fe voor immobilisatie van P werd door Schoumans en Köhlerberg (1995) op 0,2% gesteld. Dezelfde dosering werd door Schärer et al. (2006) gehanteerd, en komt neer op 36 mmol Fe kg^{-1} grond. De bouwvoor (30 cm) van 1 ha grond weegt, bij een dichtheid van 1,3 kg L^{-1} , ca. 4000 ton. Dit betekent dat, bij de genoemde dosering van 0,2%, aan de bouwvoor per hectare 8 ton (143 Mol) Fe moet worden toegevoegd. Door Schoumans en Köhlerberg (1995) werden bedragen genoemd voor de kosten van Fe wanneer die wordt toegediend via verschillende chemicaliën. In 1995 bedroegen deze kosten per kg Fe voor $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ € 2,75, en voor $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ € 1,40. Bij een inflatiepercentage van 3 % jaar^{-1} zouden de kosten voor $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ nu € 4, en voor $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ nu € 2 kg^{-1} Fe zijn. Bij de bovengenoemde dosering van 8 ton Fe ha^{-1} zijn de kosten per hectare dan resp. K€ 32 en 16; het gebruik van chemicaliën zou dus kostbaar zijn.

Bij een Fe-gehalte van het slib van 30%, en een dichtheid van 1,3 kg L^{-1} , komt 8 ton Fe overeen met $[8 \cdot (10/3) \cdot (1/1.3)] = 20 \text{ m}^3$. Verspreid over 1 ha komt dit overeen met een laag van 2 mm.

3 Praktijkervaringen met immobiliseren

3.1 Experimenten ten behoeve van natuurontwikkeling

Voor zover bekend zijn experimenten met het vastleggen van fosfaat ten behoeve van natuurontwikkeling schaars.

Gilbert et al. (2003) voegden $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ toe aan de bodem van grasland op twee uiteenlopende grondsoorten. Dit leidde tot een halvering van P-Olsen (van 20 naar 10 mg P kg^{-1}). Op een slecht gebufferde grond leidde het echter ook tot een sterke verlaging van de pH (van 6,5 naar 4,5), doordat bij het neerslaan van $\text{Al}(\text{OH})_3$ zuur vrijkomt zoals aangegeven in par. 2.2. Onder deze zure omstandigheden ontstond een sterke dominantie van *Holcus lanatus* (Gestreepte witbol). Op een goed gebufferde grond daalde de pH tijdelijk licht, maar de beschikbaarheid van P was daar veel hoger en daalde significant (van ca. 220 naar 180 mg kg^{-1} P-Olsen), maar bleef dus nog wel zeer hoog. In totaal werd, in drie porties, 15.000 kg $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ toegediend bovenop braakliggende proefveldjes; er werd niet vermeld of het werd ingewerkt. Grondbemonstering werd uitgevoerd in de laag 0-15 cm. Niet vermeld wordt hoeveel water het gehydrateerde $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ bevatte dat werd gebruikt. Hiervoor worden in de literatuur verschillende waarden gegeven: Moore et al. (1999) noemt 14, op internet worden waarden van 16 en 18 genoemd als meest voorkomend. Bij een waarde van $x=16$ komt de gift overeen met 1284 kg Al, of 48 Mol Al ha^{-1} .

Kemmers et al. (2007) deden experimenten met het toedienen van FeCl_3 en ijzerslib dat bovenop een bestaande vegetatie werd aangebracht, het materiaal werd dus niet ingewerkt. De toegediende dosis kwam overeen met 1867 kg Fe ha^{-1} , of 33 Mol Fe ha^{-1} . Na het toedienen van FeCl_3 werd een sterke verzuring en het afsterven van de vegetatie gevonden, dit deexperiment werd verder niet bemonsterd. Het uitgangsniveau aan Fe van de zeer organische stofrijke grond was al erg hoog: 425 mmol Fe-ox kg^{-1} . Wanneer de gift wordt omgerekend in mmol Fe per kg^{-1} grond dan wordt een naar verhouding zeer lage waarde berekend van 0,5 mmol kg^{-1} , of 0,1 % van het uitgangsniveau. Significante effecten van het toedienen op de beschikbaarheid van P (Pw) of de ontwikkeling van de vegetatie werden (daardoor?) niet gevonden.

Door de Universiteit van Nijmegen en het onderzoeksbureau B-Ware werd een tweetal experimenten uitgevoerd.

In het eerste experiment werd kalk (Dolocal) of Phoslock[®] (in twee doses) toegediend aan een veengrond en drie zandgronden (uitgangsniveau van P-Olsen ca. 500, 1000 en 2000 $\mu\text{mol kg}^{-1}$). Phoslock is een met lanthaan gemodificeerde bentonietklei, die wordt gebruikt om het vrijkomen van fosfaat uit sedimenten tegen te gaan (Robb et al., 2003; Ross et al., 2008). Dolocal is een Ca/Mg-carbonaat, en wordt als meststof gebruikt. De invloed van de behandelingen op de groei van pitrus was op zandgrond in een aantal gevallen significant, maar niet erg groot; op de veengrond werd geen effect gevonden. De beschikbaarheid van P, gemeten als P-Olsen, nam bij

de hoogste dosis Phoslock op de meest P-rijke zandgrond af met 50-70 %, maar kwam niet onder de drempelwaarde van 200-300 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ die als grenswaarde wordt genoemd om dominantie van pitrus te vermijden (Smolders et al., 2009). Na het toedienen van Dolocal nam P-Olsen in sommige gevallen echter toe (Geurts, pers. meded.). De behandeling met Phoslock is erg kostbaar: de kosten worden geschat op K€ 80 per hectare (Smolders, pers. meded.), een veelvoud van de kosten die met afgraven zijn gemoeid (Bekker, 2009).

In een tweede experiment dat uitgevoerd wordt in Groningen zal ijzerhoudend drinkwaterslib door de bodem worden gemengd. Dit slib bevat behalve Fe ook veel Ca en P. De molaire verhouding Fe/P is hoog, circa 24, uitgedrukt in PSI wordt dit ($1/24=$) 0,04; hierbij kan een zeer lage beschikbaarheid van P worden verwacht (zie 2.1) die geschikt is voor natuurontwikkeling. Het P in het slib zal de werking ervan echter gedeeltelijk teniet doen, een aspect waarmee rekening moet worden gehouden bij eventuele toepassing van ijzerslib (Smolders, pers. meded.). Op dit moment zijn nog geen gegevens beschikbaar over P-gehalten van andere soorten drinkwaterslib.

3.2 Experimenten ten behoeve van verminderen uit- of afspoeling

In Nederland is door Schoumans en Köhlerberg (1995) op laboratorium- en veldschaal onderzoek gedaan naar de capaciteit van verschillende materialen om fosfaat te binden. In het laboratorium waren $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ en $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ even effectief: bij het mengen van 0,1 % (w:w) ijzer door grond uit de bouwvoor van een opgeladen bodem nam de evenwichtsconcentratie van P af met meer dan 90 %. Na het maken van ijzeroxiden neemt de capaciteit om P te binden echter af in de tijd, het oxide moet dan ook zo snel mogelijk na aanmaken door de bodem gemengd worden. Een mengsel van $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ werd op veldschaal getest, het mobiel fosfaat nam ook toen sterk (60-80 %) af nadat dit mengsel aan de bodem was toegediend; de dosis was 2 g Fe (of 36 mmol Fe) per kg grond (Schoumans en Köhlerberg, 1995). Het onderzoek naar het op deze manier toedienen van ijzer aan de bodem heeft in Nederland tot op heden echter geen gevolg gehad, omdat er maatschappelijke weerstand bestond tegen het “toedienen van chemicaliën aan de bodem”. Wanneer het vastleggen van fosfaat in de bodem overwogen wordt dan zou gezocht moeten worden naar een methode om ijzerhydroxiden aan te maken zonder dat een bijproduct ontstaat (Chardon e.a. 1996).

In par. 2.1 werd al de studie genoemd van Schärer (2003) en Schärer et al. (2007). In het laboratorium werd gevonden dat toevoeging van 2 g Fe per kg grond op korte termijn leidde tot een afname van wateroplosbaar P (WSP) van 4,2 naar 0,5 mg kg^{-1} op een kalkhoudende grond (afname 88%), en op een zure grond van 2,6 naar 0,1 mg kg^{-1} (afname 96%). Na 5 weken incubatie was de afname van WSP iets kleiner geworden: resp. 76% en 91% (Schärer, 2003). De gift van 2 g Fe per kg grond was echter relatief beperkt: vóór de toediening was het gehalte aan Fe-ox van de laag 0-4 cm al resp. 3,4 en 4,3 g kg^{-1} (Schärer et al., 2007)

In een Amerikaans onderzoek werden 5 soorten aluminiumrijk slib, dat vrijkomt bij de bereiding van drinkwater uit oppervlaktewater, toegevoegd aan een fosfaatrijke grond. Het gehalte aan (Al+Fe)-ox steeg hiermee met 43 tot 300%. Bij een dosis van 50 g slib kg⁻¹ grond nam het gehalte aan met 0,01 M CaCl₂ extraheerbaar fosfaat af met meer dan 90% (Dayton en Basta, 2005); de toegediende hoeveelheid (Fe+Al)-ox varieerde van 26 tot 179 mmol kg⁻¹ grond). Een extractie met 0,01 M CaCl₂ geeft een goed beeld van de fosfaatconcentratie in het bodemwater, en daarmee van P dat voor de vegetatie beschikbaar is.

In een onderzoek naar het vrijkomen van P uit sedimenten werden verschillende vormen van Al aan het sediment toegevoegd, in een dosis van 18 mg Al m⁻², wat overeenkomt met 180 g ha⁻¹ (Malecki-Brown & White, 2009). De vormen van Al waren: Al₂(SO₄)₃·14H₂O (alum), een mengsel van Al₂(SO₄)₃ met CaCO₃, en polyaluminium chloride [Al_n(OH)_mCl_(3n-m)]. Het vrijkomen van P uit het sediment werd met meer dan 95% gereduceerd.

De invloed van het gebruik van Al-houdend slib op het gehalte aan labiel P in de bodem, gemeten als isotopisch uitwisselbaar P, werd onderzocht door Agyin-Birikorang en O'Connor (2007). Een gift van 25 gram slib kg⁻¹ grond (2,5 % op gewichtsbasis) zorgde ervoor dat een hoeveelheid van 100 g (3,2 mmol) P kg⁻¹ grond vrijwel volledig kon worden vastgelegd. De toegediende hoeveelheid (Fe+Al)-ox varieerde hierbij van 54 tot 76 mmol kg⁻¹ grond. De bindende werking van het slib nam toe in de tijd, zodat het toedienen van slib als een stabiele optie wordt gezien om P in de bodem vast te leggen.

Codling (2007) paste twee soorten waterzuiverings-slib toe op twee grondsoorten. De dosis was afgestemd op het P-gehalte van de bodem, gemeten met de Mehlich 3-methode. Een verhouding (Mol Fe+Al+Ca in slib) / (mol Mehlich 3-P in grond) van 1 tot 2 werd aangehouden, wat een niet erg grote overmaat is. Het gehalte aan water-extraheerbaar P nam af met meer dan 95%, ook na het aanzuren van de bodem (om natuurontwikkeling te simuleren) bleef de immobiliserende werking in stand.

Door Silveira et al. (2006) werd aluminiumhoudend slib gemengd met een grond waarin het verleden zeer grote hoeveelheden dierlijke mest waren opgebracht. In een kolomproef werd de grond gepercoleerd met water, waarbij concentraties tot 50 mg ortho-P L⁻¹ werden gemeten bij een onbehandelde grond. Wanneer de grond was gemengd met slib (50 g slib kg⁻¹ grond) nam de concentratie in het percolaat af tot ca. 2 mg L⁻¹, dit betekent een afname met > 95 %. Deze dosis komt overeen met 5 % op gewichtsbasis; de toegediende hoeveelheid (Fe+Al)-ox was 135 mmol kg⁻¹ grond.

3.3 Samenvatting praktijkervaringen met immobilisatie

De ervaringen met immobiliseren van bodemfosfaat ten behoeve van natuurontwikkeling zijn nog zeer beperkt. Ten dele zijn experimenten mislukt doordat geen rekening was gehouden met een sterk verzurende werking van toegediende zouten (FeCl_3), of doordat de toegediende hoeveelheid ijzer laag was t.o.v. de hoeveelheid die reeds in de bodem aanwezig was.

Experimenten met immobiliseren die waren uitgevoerd om het risico op uit- of afspoeling van fosfaat te verminderen wijzen uit dat, wanneer een voldoende hoge dosis Fe- of Al-oxiden wordt toegediend, P sterk kan worden vastgelegd aan de grond. De met water extraheerbare fractie, die zowel sterk gerelateerd is aan uitspoeling van P als aan opname van P door planten, kan met meer dan 90% worden verkleind door immobiliserend materiaal door de grond te mengen. Dit biedt perspectieven om de beschikbaarheid van P zodanig te verlagen dat de kansrijkdom voor natuurontwikkeling sterk toeneemt.

3.4 Kosten van immobilisatie

De kosten van immobiliseren bestaan uit materiaalkosten en de kosten van het inwerken.

De materiaalkosten kunnen variëren van (zeer) laag voor drinkwaterslib, tot hoog (chemicaliën, bij 8 ton Fe/ha K€ 16-32, zie 2.2) of zeer hoog (Phoslock[®], K€ 80, zie 3.1). De kosten van inwerken (bijv. via ploegen) zijn beperkt, deze worden op: ca. € 100-200 per ha geschat (Oosterbaan et al., 2008), en vallen dus in het niet bij de materiaalkosten.

Ter vergelijking: de kosten van afgraven (tot een diepte van 50 cm) worden door Oosterbaan et al. (2008) geschat op ca. K€ 15 wanneer de vrijgekomen grond op 1 km afstand kan worden geplaatst, en op resp. K€ 20 en 25 bij plaatsen op 2 en 3 km afstand. Op basis van door Bekker (2009) verzamelde gegevens voor 29 terreinen waar tussen 1989 en 2005 werd afgegraven, kunnen de kosten per hectare geschat worden op K€ 16 (gewogen gemiddelde). De afzet van de grond levert echter steeds meer problemen op, wat heeft geleid tot het sterk stijgen van de kosten per hectare (Bekker, 2009).

3.5 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Vooralsnog lijkt het gebruik van ijzerhoudend drinkwaterslib het meest perspectiefrijk voor het immobiliseren van bodemfosfaat ten behoeve van natuurontwikkeling.

Onderzocht zou moeten worden wat het fosfaatgehalte is van het slib dat in Nederland wordt geproduceerd, en hoe groot de hoeveelheid ijzerslib is die wordt geproduceerd in grondwaterputten met een laag fosfaatgehalte.

Daarna zou in het laboratorium moeten worden nagegaan hoeveel ijzerslib door de bodem moet worden gemengd om de beschikbaarheid van fosfaat voldoende te verlagen.

In veldproeven dient te worden onderzocht hoe de bij natuurontwikkeling gewenste vegetatie reageert op de door immobilisatie gecreëerde groeiomstandigheden. Daarbij is het van belang om gedurende langere tijd zowel de ontwikkeling van de vegetatie te volgen, als die van de beschikbaarheid van bodemfosfaat.

4 Conclusies

Door stoffen die ijzer- of aluminiumoxiden bevatten, of waaruit deze in de bodem worden gevormd, aan de bodem toe te voegen kan de oplosbaarheid van fosfaat sterk worden verlaagd: het fosfaat wordt geïmmobiliseerd. Dit kan de kansen op een soortenrijke vegetatie vergroten en het risico op dominantie van ruigtesoorten verkleinen.

Bij het gebruik van zouten moet worden voorkomen dat verzuring van de bodem optreedt; dit kan door tegelijkertijd zuurneutraliserende materiaal (zoals kalk) toe te dienen.

Bij het bepalen van de dosis van het immobiliserende materiaal moet rekening worden gehouden met ijzer- of aluminiumoxiden die reeds in de bodem aanwezig zijn, en met het eventuele fosfaat dat het slib bevat.

De kosten van immobiliseren bestaan uit materiaalkosten en de kosten van het inwerken. De materiaalkosten kunnen variëren van (zeer) laag voor drinkwaterslib, tot hoog (chemicaliën) of zeer hoog (Phoslock[®]). De kosten van inwerken (bijv. via ploegen) zijn beperkt: ca. € 100-200 per ton (Oosterbaan et al. 2008). Wanneer drinkwaterslib kan worden gebruikt dan is immobiliseren dus veel goedkoper dan afgraven, bij het gebruik van chemicaliën zijn de kosten vergelijkbaar.

Literatuur

Agyin-Birikorang, S. & G.A. O'Connor, 2007. Lability of drinking water treatment residuals (WTR) immobilized phosphorus: Aging and pH effects. *J. Environ. Qual.* 36: 1076-1085.

Bekker, R.M., 2009. 20 jaar ontgronden voor natuur op zandgronden. *De Levende Natuur* 110: 9-15.

Chambers, B.J., C.N.R. Critchley, J.A. Fowbert, A. Bhogal & S.C. Rose. 1999. Soil nutrient status and botanical composition of grasslands in English environmentally sensitive areas. Report MAFF Project BD1429, ADAS Gleadthorpe & Newcastle, UK, 71 pp.

Chardon, W.J. 1994. Relationship between phosphorus availability and phosphorus saturation index. Rapport 19, Inst. voor Agrobiol. en Bodemvruchtbaarheidsond., Haren.

Chardon, W.J., 2008. Uitmijnen of afgraven van voormalige landbouwgronden ten behoeve van natuurontwikkeling. Een studie in het kader van 'Bodendiensten'. Rapport 1683, Alterra Wageningen.

Chardon, W.J., O. Oenema, O.F. Schoumans, P.C.M. Boers, B. Fraters & Y.C.W.M. Geelen, 1996. Verkenning van de mogelijkheden voor beheer en herstel van fosfaatlekkende landbouwgronden. Rapporten Programma Geïntegreerd Bodemonderzoek, Deel 8, Wageningen.

Codling, E.E., 2007. Effects of soil acidity and cropping on solubility of by-product-immobilized phosphorus and extractable aluminum, calcium, and iron from two high-phosphorus soils. *Soil Sci.* 173: 552-559.

Dayton, E.A. & N.T. Basta, 2005. Use of drinking water treatment residuals as a potential best management practice to reduce phosphorus risk index scores. *J. Environ. Qual.* 34:2112-2117.

Delft, S.P.J. van, W.J.M. de Groot, & W.J. Chardon. 2006. Bemonstering landbouwgronden en bepaling van de beschikbaarheid van fosfaat in verband met voorgenomen natuurontwikkeling. Karakterisering van 7 terreinen in de provincie Limburg. Rapport 1332, Alterra Wageningen.

Gilbert, J.C., D.J.G. Gowing, & P. Loveland, 2003. Chemical amelioration of high phosphorus availability in soil to aid the restoration of species-rich grassland. *Ecol. Eng.* 19: 297-304.

- Kemmers, R.H., A.P. Grootjans, J. Nijp, S.P.J. Van Delft & G. van Dijk, 2007. Continuering experimenteel bevoeiingsonderzoek langs de Reest. Eindrapport 2006. Rapport DK 2007/080-O, Min. LNV, Directie Kennis Ede.
- Kemmers, R.H., J. Bloem, J.H. Faber & G.A.J.M. Jagers op Akkerhuis, 2007. Bodemkwaliteit en bodembiodiversiteit bij natuurontwikkeling op voormalige landbouwgronden. Rapport 1523, Alterra Wageningen.
- Koopmans, G.F., W.J. Chardon, O. Oenema & W.H. Van Riemsdijk, 2004. Uitmijnen biedt perspectief om uitspoeling van fosfaat uit zwaar bemeste landbouwgronden te verminderen. *H₂O* 37 (12): 15-18.
- Malecki-Brown, L.M. & J.R. White, 2009. Effect of aluminum-containing amendments on phosphorus sequestration of wastewater treatment wetland soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 852-861.
- Moore, P.A., T.C. Daniel & D.R. Edwards, 1999. Reducing phosphorus runoff and improving poultry production with alum. *Poultry Science* 78: 692-698.
- Oosterbaan, A., J.J. de Jong & A.T. Kuiters, 2008. Vernieuwing in ontwikkeling en beheer van natuurgraslanden op voormalige landbouwgrond op droge zandgronden. Rapport 1669, Alterra Wageningen, 57 pp.
- Robb, M., B. Greenop, Z. Goss, G. Douglas & J. Adeney, 2003. Application of Phoslock™, an innovative phosphorus binding clay, to two Western Australian waterways: preliminary findings. *Hydrobiologia* 494: 237-243.
- Ross, G., F. Haghsereht & T.E. Cloete, 2008. The effect of pH and anoxia on the performance of Phoslock (R), a phosphorus binding clay. *Harmful Algae* 7: 545-550.
- Schärer, M. 2003. The influence of processes controlling phosphorus availability on phosphorus losses in grassland soils. PhD thesis ETH no 15312, Zürich Switzerland, 140 p.
- Schärer, M., C. Stamm, T. Vollmer, E. Frossard, A. Oberson, H. Flühler & S. Sinaj, 2007. Reducing phosphorus losses from over-fertilized grassland soils proves difficult in the short term. *Soil Use Manage.* 23 (suppl. 1): 154-164.
- Schoumans, O.F. & H. Köhlerberg, 1995. Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden. Mogelijkheden van toediening van aluminium en ijzerverbindingen aan de bodem. Rapport 374.2, Staring Centrum, Wageningen.
- Silveira, M.L., M.K. Miyittah & G.A. O'Connor, 2006. Phosphorus release from a manure-impacted spodosol: effects of a water treatment residual. *J. Environ. Qual.* 35: 529-541.

Sival, F.P. & W.J. Chardon, 2004. Natuurontwikkeling op fosfaatverzadigde gronden: fosfaatonttrekking door een gewas. Rapport 1090, Alterra Wageningen.

Sival, F.P., W.J. Chardon & M.M. van der Werff. 2004. Natuurontwikkeling op voormalige landbouwgronden in relatie tot de beschikbaarheid van fosfaat: evaluatie van verschravingsmaatregelen. Rapport 951, Alterra, Wageningen.

Smolders, A.J.P., E.C.H.E.T. Lucassen, M. Van Mullekom, H.B.M. Tomassen & E. Brouwer, 2009. Ontgronden op voormalige landbouwgronden: doeltreffend maar ook toereikend? De Levende Natuur 110: 33-38.