



Broekbosontwikkeling op landbouwgronden

landbouwgronden
broekbossen
fosfaat
introductie doelsoorten
toevoeging slib

Heeft het toevoegen van drinkwaterslib en doelsoorten een meerwaarde?

In het kader van het Natuurnetwerk Nederland en Natura 2000 worden in Nederland landbouwgronden heringericht als soortenrijke natuur. In grondwatergevoede gebieden is elzenbroekbos daarbij een mogelijk natuurdoeltype. In dit onderzoek is gekeken of ijzerkalkslib, een restproduct uit de grondwaterwinning, de kwaliteit van deze te ontwikkelen elzenbroekbossen kan verhogen. Op voormalige landbouwgronden is het grondwater decennialang niet meer in het maaiveld uitgetreden. Met ijzerkalkslib worden ijzer en calcium uit het grondwater alsnog toegediend aan de toplaag van de landbouwbodem om de fosfaatverzadiging te verlagen.

Elzenbroekbossen

Elzenbroekbossen gedijen bij langdurig natte, waterverzadigde omstandigheden, waardoor de ondergrond tenminste een groot deel van het jaar zuurstofloos is. In beekdalen zorgt de aanvoer van vaak basenrijk kwelwater voor permanent hoge grondwaterstanden en voor buffering van de zuurgraad. Dit voorkomt verzuring. Op plekken waar zich boven het basenrijke grondwater regenwaterlenzen vormen komen zuurdere vormen van het elzenbroekbos voor, waarin ook veenmossen een belangrijke rol spelen, of ontwikkelt zich een berkenbroekbos (Runhaar et al., 2013).

In elzenbroekbossen wordt de boomlaag gedomineerd door zwarte els, met enige bijmenging van zachte berk. In de ondergroei komen vooral lichtminnende plantensoorten voor van grote zeggenvegetaties, dotterbloemhooilanden en moerasruigten. In het berkenbroekbos gaat het om soorten van hoogveenbegroeiingen en natte heide. Door het gebrek aan zuurstof in de bodem treden (reductie)reacties op, waarbij verbindingen ontstaan die potentieel toxisch zijn voor veel planten, zoals ammonium, waterstofsulfide en tweewaardig ijzer. In de praktijk gaat het in goed functionerende broekbossen vaak om ijzertoxiciteit. De verspreiding van plantensoorten in elzenbroekbossen wordt daarom gestuurd door de beschikbaarheid van nutriënten en door het optreden

van deze (ijzer)toxiciteit (Lucassen et al., 2009). Planten in elzenbroekbossen hebben zich hieraan aangepast door de aanwezigheid van luchtweefsels, waarmee zuurstof naar de wortels kan worden getransporteerd, wat leidt tot de oxidatie van potentieel toxische stoffen.

Elzenbroekbos op voormalige landbouwgrond

Onder droge omstandigheden wordt fosfaat op landbouwgronden goed gebonden aan ijzer en calcium, waardoor het fosfaatoverschot in de toplaag van de bodem aanwezig blijft. In een onderwaterbodem wordt de mobiliteit van fosfaat en ijzer sterk bepaald door de redoxpotentiaal (de verhouding tussen reducerende en oxiderende stoffen, die mede wordt bepaald door de mate van zuurstofindringing in de bodem).

Vernatting van landbouwgrond leidt tot een sterke afname van de zuurstoftoevoer. Bij gebrek aan zuurstof gaan micro-organismen over op de reductie van onder meer Fe^{3+} (driewaardig ijzer). Ijzerverbindingen hebben in gereduceerde toestand een lagere bindingscapaciteit voor fosfaat dan in de geoxideerde toestand. Bij vernatting kan daardoor fosfaat vrijkomen in het bodemvocht. Belangrijk voor de mate van fosfaatmobiliteit is niet alleen de grootte van de ijzergebonden fractie, maar ook de bezetting van de amorfe driewaardige ijzer(hydr)oxides met fosfaat (Loeb et al., 2008). De mate van fosfaat-

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

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

E. (Emiel) Brouwer

Onderzoekcentrum B-WARE

A.J.P. (Fons) Smolders

Onderzoekcentrum B-WARE & Radboud Universiteit Nijmegen

M. (Mark) Bartels

Brabant Water

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

Stichting het Limburgs Landschap

J.G.M. (Jan) Roelofs

Onderzoekcentrum B-WARE & Radboud Universiteit Nijmegen

Foto Esther Lucassen
Lommerbroek, Lomm.

verzadiging van de bodem (DPS, degree of phosphate saturation) is vast te stellen door alle amorfe ijzer- en aluminium(hydr)oxiden, met het daaraan gebonden fosfaat, op te lossen in een bodemextract met oxalaat. Veel landbouwbodems worden gekenmerkt door een (zeer) hoge DPS en door zeer hoge concentraties Olsen-P (voor planten beschikbaar fosfaat). Daardoor wordt fosfaat na vernatting vaak in sterke mate gemobiliseerd en ontwikkelt zich een (zeer) eutrofe vegetatie, vaak bestaande uit pitrus (*Juncus effusus*) en liesgras (*Glyceria maxima*), met bij langdurige inundatie een sterke algen- en kroosontwikkeling (Smolders *et al.*, 2008).

Op landbouwgronden die grenzen aan grondwatergevoede kwelkernen leiden lokale hydrologische ingrepen, zoals het dempen van drainagesloten, vaak snel tot de gewenste vernattingseffecten. Als daarbij ook de fosfaatbeschikbaarheid voldoende kan worden verlaagd zijn deze gronden geschikt voor (her)ontwikkeling van elzenbroekbossen. In het huidige onderzoek hebben wij gekeken of drinkwaterslib, een restproduct dat ontstaat op locaties waar grondwater wordt gezuiverd tot drinkwater, kan worden toegepast om de fosfaatbeschikbaarheid te verlagen. Dit drinkwaterslib bestaat uit ijzerslib, kalkslib of een mengvorm hiervan, afhankelijk van de kwaliteit van het opgepompte grondwater en het toegepaste zuiveringsproces. Omdat elzenbroekbossen gevoed worden door grondwater dat rijk is aan zowel calcium als ijzer hebben we ingezet op de toepassing van slib dat naast ijzer ook rijk is aan calcium (ijzerkalkslib). Laboratoriumonderzoek heeft aangetoond dat door toediening van ijzerslib de fosfaatbeschikbaarheid in landbouwbodems sterk afneemt (Chardon *et al.*, 2014). Uit groeiproeven op vernatte landbouwbodems bleek verder dat de toediening van ijzerslib leidt tot zowel verlaging van de fosfaatbeschikbaarheid als het optreden van ijzertoxiciteit, met een lagere biomassaproductie van ruigtesoorten tot gevolg (Lucassen *et al.*, 2015).

Ijzerkalkslib heeft in natte bodems mogelijk een stabilere immobiliserende werking op fosfaat dan ijzerslib omdat calciumfosfaten, in tegenstelling tot ijzerfosfaten, niet gevoelig zijn voor veranderingen in de redoxpotentiaal (het zuurstofgehalte) in de bodem (Smolders *et al.*, 2008).

Onze hypothese is dat vernatte landbouwbodems, afhankelijk van de DPS en de concentratie Olsen-P in de bodem, zullen versralen door toediening van ijzerkalkslib. Hierdoor zal de biomassaontwikkeling van ongewenste ruigtesoorten geremd worden. Wanneer dit in voldoende mate plaatsvindt, ontstaan sterk verbeterde lichtcondities voor de lichtminnende plantensoorten die bij elzenbroekbossen horen, zoals soorten van grote zeggenvegetaties en dotterbloemhooilanden. Omdat op landbouwgronden vaak geen zaadbank meer aanwezig is verwachten we dat het aanbrengen van deze doelsoorten het succes waarschijnlijk verhogt.

Materiaal en methoden

Ijzerkalkslib

Voor het onderzoek is slib uit de waterwinning in Luijkgestel gebruikt. Dit slib is relatief rijk aan ijzer (Fe) en calcium (Ca) en relatief arm aan fosfor (P). In mei 2016 werd zeer waterig ijzerkalkslib in een aantal overkapte droogtebedden overgebracht. In deze bedden was een laken gespannen waardoor het grootste deel van de vaste fractie direct gescheiden kon worden van het water. Door verdamping ontstond uiteindelijk een steekvaste fractie, die werd overgebracht in voorraadvaten van 600 liter en verdeeld over vaatjes van 40 liter. Uit elk vaatje werd een monster genomen om de vochtfractie en de DPS vast te stellen, zodat we uiteindelijk een mengverhouding konden berekenen met de bodemtoplaag van de verschillende plots.

Veldexperimenten

In april 2016 zijn op (deels afgegraven) landbouwgronden in totaal 18 plots geselecteerd in drie bestaande natuurgebieden grenzend aan elzenbroekbos: a) de Spikweien in het Lommerbroek (Lomm); b) de terrasrand van het Jammerdal aan de Voerdijk (Venlo) en c) een voormalig grasland in het Koelbroek langs de Everlosche Beek (Boekend). In het najaar van 2015 is hier in het kader van natuurontwikkeling een deel van de fosfaatrijke bodemlaag verwijderd. Het grasland in het Koelbroek is de afgelopen 10 tot 15 jaar vernat door benedenstroomse beveractiviteit en heeft zich ontwikkeld tot een elzenbos met een ruigteondergroei van brandnetel en ruw beemdgras. De bodem was nagenoeg kaal tijdens het uitrasteren. In ieder deelgebied zijn zes plots van elk twee bij twee meter afgerasterd met houten frames van 15 cm hoog.

Op basis van de vochtgehalten en DPS-waarden van de bodemtoplagen zijn per locatie drie doseringen met ijzerkalkslib berekend (in liters per m²). Uitgangspunt daarbij was dat de DPS-waarde van de toplaag tot 0,1 of lager moet dalen om natuurontwikkeling mogelijk te maken (Chardon, 2009).

De volgende behandelingen werden ingezet: a) geen toevoeging van ijzerkalkslib (controle), b) bijmenging met ijzerkalkslib tot de DPS-waarde van de bodemtoplaag daalt tot 0,1 (ijzerkalk laag) en c) een dubbele dosering ijzerkalkslib (ijzerkalk hoog). Voor het Lommerbroek, Jammerdal en Koelbroek ging het om hoeveelheden steekvast ijzerkalkslib van respectievelijk 10, 20 en 30 liter per m² (ijzerkalk laag) en 20, 40 en 60 liter per m² (ijzerkalk hoog). Voor details van de berekening verwijzen we naar Runhaar *et al.*, (2018).

In juli 2016 werd het steekvaste slib door de bovenste 20 cm van de kale bodem geharkt (n=2). Op elke loca-

tie werd een ondiepe grondwaterbuis gezet. In augustus 2016 werd in de helft van alle plots maaisel uit de omringende elzenbroekbossen aangebracht. In mei 2017 werden in de helft van alle plots zes individuen van slangenwortel (*Calla palustris*) en vier individuen van dotterbloem (*Caltha palustris*) gepoot.

Metingen

In maart 2017 zijn in alle plots bodemmonsters (0-10 cm) genomen. Elk monster bestond uit een mengmonster van 15 steken. Hieruit werd porievocht verzameld en ook werd een bodemdestructie, zoutextractie, oxalaatextractie en Olsen-P-extractie uitgevoerd (Lucassen *et al.*, 2015). Onder geklimatiseerde condities (in het donker bij 18°C) werd een inundatieproef uitgevoerd met een looptijd van zes weken. Op acht tijdstippen werd het grondwaterpeil opgemeten. In juli 2017 werd de lengte van de bovengrondse stolonen (uitlopers) van slangenwortel opgemeten en werd het aantal exemplaren van slangenwortel en dotterbloem geteld. Op 31 mei 2018 werd een vegetatie-opname gemaakt volgens de Braun-Blanquetmethode (aangepast door Doing & Segal) inclusief de mossen. De vegetatie werd aanvullend gemaaid en gewogen.

Resultaten en discussie

Grondwaterstanden

In het Jammerdal stond het grondwater bijna permanent in het maaiveld, wat zeer gunstig is voor ontwikkeling van elzenbroekbos (gemiddelde stand \pm standaarddeviatie: 1 ± 0 cm). In het Lommerbroek was het wat minder nat (-14 ± 18 cm). In het Koelbroek was de grondwaterstand het ongunstigst (-28 ± 19 cm). De maximale grondwaterstand was -5 cm. In het late voorjaar tot in de zomer zakte deze verder weg tot maximaal -53 cm.

Ontwikkeling bodemchemie

Figuur 1 laat een aantal bodemparameters zien die per plot sterk verschilden. Doordat het ijzerkalkslib zeer rijk was aan totaal-Fe (1175 mmol/kg dw), totaal-Ca (7547 mmol/kg dw) en totaal-Mn (24,6 mmol/kg dw) nam ook de totale concentratie van deze elementen sterk toe met toenemende additie (figuur 1c,d,f). De totaal-P-concentratie nam alleen in het Lommerbroek duidelijk toe in de met ijzerkalkslib behandelde plots. Op de andere locaties bleef de fosfaatconcentratie min of meer gelijk, doordat de concentratie totaal-P in het ijzerkalkslib (53 mmol/kg dw) ongeveer even hoog was als in de bodem (figuur 1e).

Door het toedienen van het ijzerkalkslib nam de DPS-waarde van de bodems af. De DPS van de bodem in het Lommerbroek was al laag (0,05-0,07) terwijl deze in het Jammerdal (0,17-0,24) en het Koelbroek (0,28-0,29) ver boven de grenswaarde van 0,1 lag (Chardon, 2009). Door het toedienen van het ijzerkalkslib daalde de DPS in het Jammerdal en het Koelbroek, zoals berekend, tot circa 0,1. Een verdubbeling van de dosering leidde, met uitzondering van het Jammerdal, tot een verdere afname van de DPS (figuur 1a). Olsen-P liet eenzelfde beeld zien, maar de fosfaatbeschikbaarheid nam veel minder sterk af dan de DPS (figuur 1b).

IJzerkalkslib heeft een sterk waterabsorberend vermogen. In het Lommerbroek en het Koelbroek, waar het grondwater niet permanent in het maaveld uittrad en de bodems dus niet waterverzadigd waren, was te zien dat het toedienen van ijzerkalkslib leidde tot een hoger vochtgehalte. De bodemdichtheid (kg drooggewicht/l) nam hier dan ook evenredig af met een toenemende dosering van ijzerkalkslib (resultaten niet getoond).

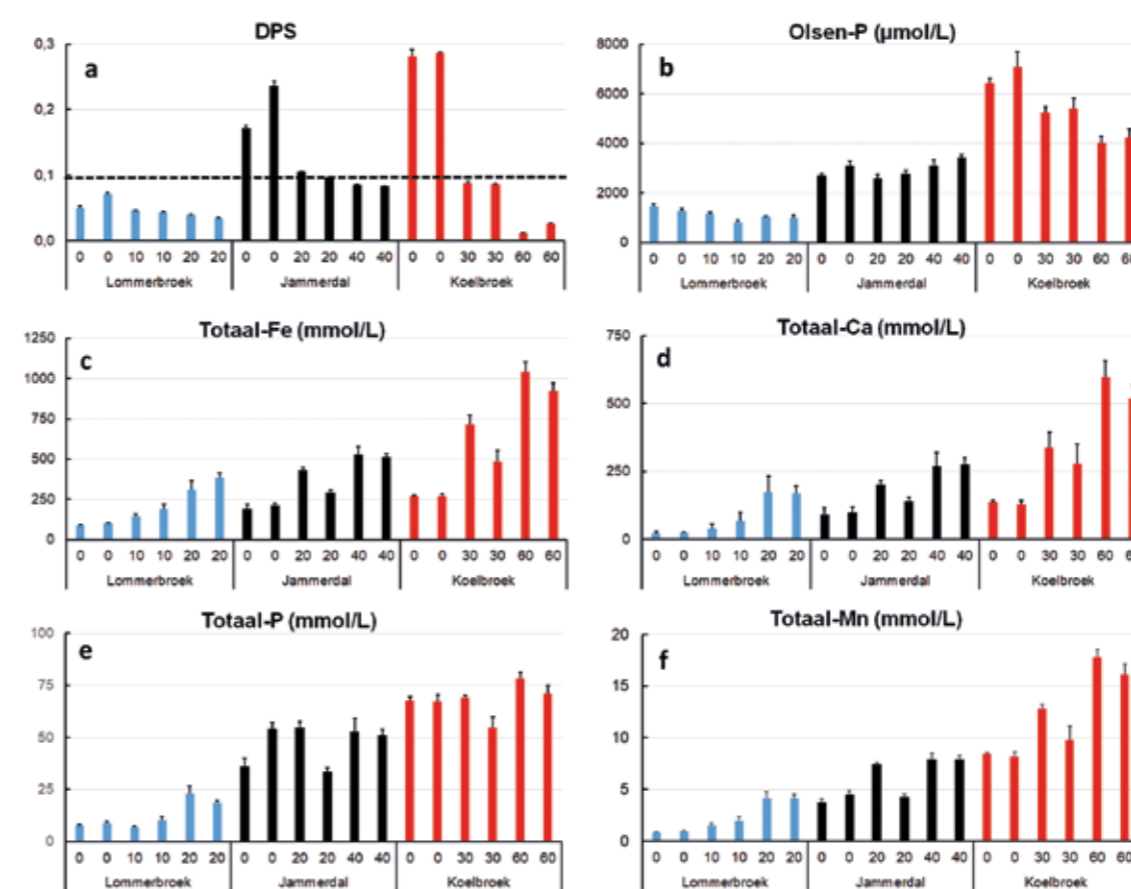
Ontwikkeling bodemvochtchemie

Figuur 2 laat parameters gemeten in het bodemvocht

zien die sterk verschilden per plot. In de controleplots van de fosfaatrijke bodems van het Jammerdal en het Koelbroek was de concentratie fosfaat in het bodemvocht relatief hoog (respectievelijk 43-44 en 16-27 $\mu\text{mol/l}$) ten opzichte van de relatief fosfaatarme bodem in het Lommerbroek (1,9-2,4 $\mu\text{mol/l}$). Door het toedienen van ijzerkalkslib daalde de concentratie fosfaat van het poriewater in alle plots sterk tot beneden 0,7 $\mu\text{mol/l}$ (Lommerbroek), 2,9 $\mu\text{mol/l}$ (Jammerdal) en 1,7 $\mu\text{mol/l}$ (Koelbroek), ongeacht de dosering aan ijzerkalkslib (figuur 2a). De oorzaak hiervan is de binding van fosfaat aan de in overmaat in het slib aanwezige geoxideerde ijzerverbindingen en mogelijk ook door de neerslag met calciumcarbonaat, waarbij het fosfaat wordt geïmmobiliseerd tot ijzer(III)fosfaat en calciumfosfaat (Lucassen *et al.*, 2015).

In de plots waarin ijzerkalkslib was toegediend waren de calcium- en calciumcarbonaatconcentraties hoger door het oplossen van calciumcarbonaat (figuur 2d,e). Omdat de oplosbaarheid van calciumcarbonaat beperkt is, nam de concentratie na het toedienen van het slib toe tot een maximumwaarde van rond de 6 mmol/l. De sterker gebufferde condities van het Lommerbroek hadden een verlagend effect op de beschikbaarheid van aluminium (Al) in het bodemvocht (resultaten niet getoond), doordat deze bij een hogere pH (figuur 2f) neerslaat als aluminium(hydr)oxiden. De hoge concentratie sulfaat en calcium in het bodemvocht van de twee controleplots (figuur 2c,d) laat zien dat het grondwater in de meeste Maasmeanders rijk is aan calcium en sulfaat.

In het Jammerdal kreeg de bodem na het toedienen van het ijzerkalkslib een roestige kleur, die echter ook snel weer verdween. Door de ligging aan de steilrand, en daarmee de relatief sterke invloed van grondwater, was er sprake van permanent natte condities. De bodemtoplaag was permanent zuurstofloos, een conditie



waarin (achtereenvolgens) nitraat-, ijzer- en sulfaat-reducerende bacteriën reactief organisch materiaal uit de bodem afbreken. In de bodem aanwezig nitraat wordt gedenitrificeerd tot stikstofgas (N_2) dat verdwijnt naar de atmosfeer. Geoxideerd ijzer (roest) wordt gereduceerd tot tweewaardig ijzer (Fe^{2+}) dat relatief goed oplosbaar is (waardoor de roestkleur van de bodem verdwijnt). Sulfaat wordt gereduceerd tot sulfide (S^{2-}) dat sterk bindt met tweewaardig ijzer onder de vorming van

immobiele ijzersulfiden. Ondanks het hogere ijzergehalte van de bodem na toedienen van ijzerkalkslib, was de concentratie Fe^{2+} in het poriewater niet hoger dan in de controleplots (figuur 2b). De concentratie sulfaat in het bodemvocht nam wel af (figuur 2c). Een deel van het Fe^{2+} kan dan ook zijn geïmmobiliseerd door de vorming van onoplosbare ijzersulfiden. Theoretisch kan er ook een oververzadiging van sideriet (FeCO_3) ontstaan waardoor er precipitatie plaatsvindt en de ijzerconcentratie

Figuur 1 Enkele bodemparameters in de plots. Op de x-as staat voor alle gebieden in duplo de doseringsreeks van het steekvaste ijzerkalkslib (liter/m²) om drie behandelingen te kunnen verkrijgen. a: controle; b: ijzerkalkslib laag; c: ijzerkalkslib hoog (zie paragraaf over inrichting veldexperimenten). De stippellijn geeft de DPS-grenswaarde voor natuurontwikkeling (Chardon, 2009).

Figure 1 Some soil parameters in the plots. On the x-axis the dose series of the semi-solid iron- and calcium-rich sludge is given in order to be able to obtain the following treatments. a: control; b: low dosage of iron- and calcium-rich sludge; c: high dosage of iron- and calcium-rich sludge (see paragraph on set up of field experiments). The dashed line gives the critical value for nature development (Chardon, 2009).

Figuur 2 Chemie van het bodemvocht in de plots acht maanden na toedienen van het ijzerkalkslib. Op de x-as staat voor alle gebieden in duplo de doseringsreeks van het steekvaste ijzerkalkslib (liter/m²) om drie behandelingen te kunnen verkrijgen. a: controle; b: ijzerkalkslib laag; c: ijzerkalkslib hoog (zie paragraaf over inrichting veldexperimenten).

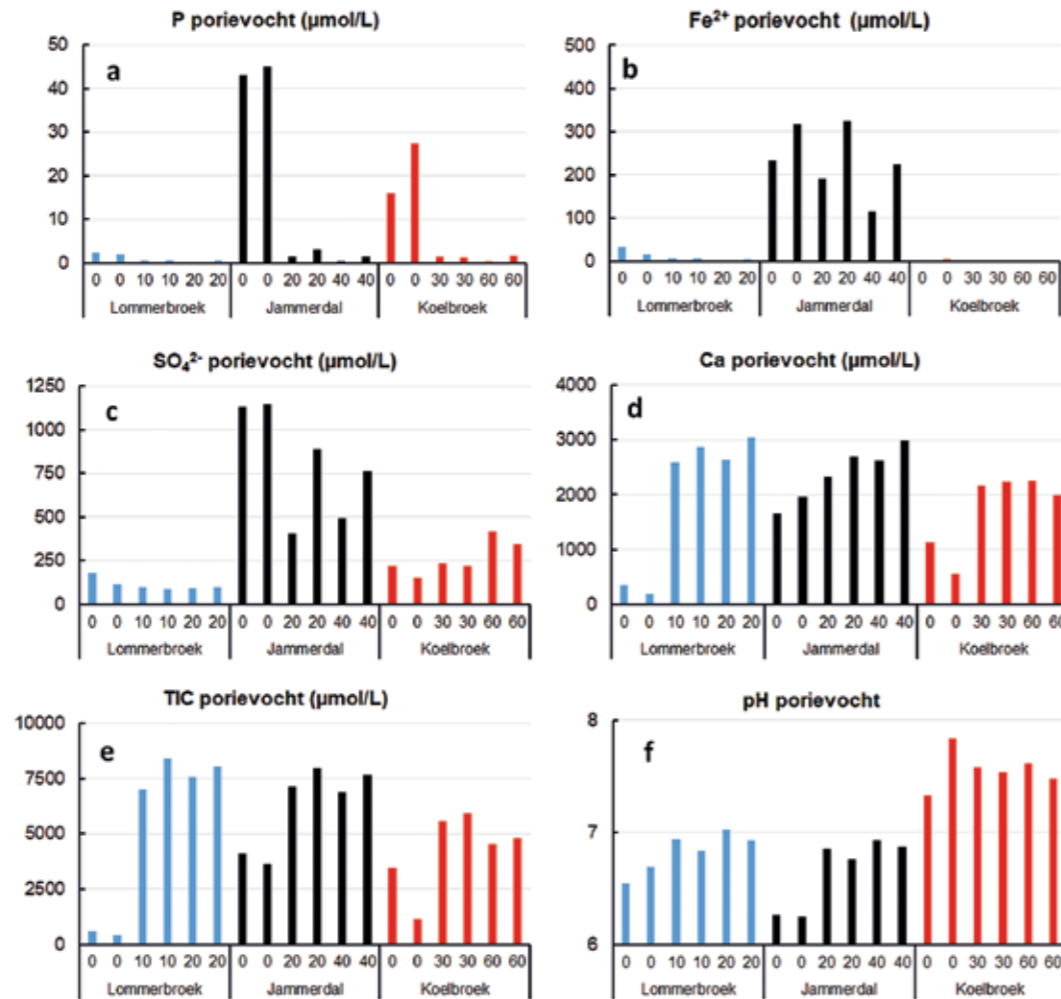


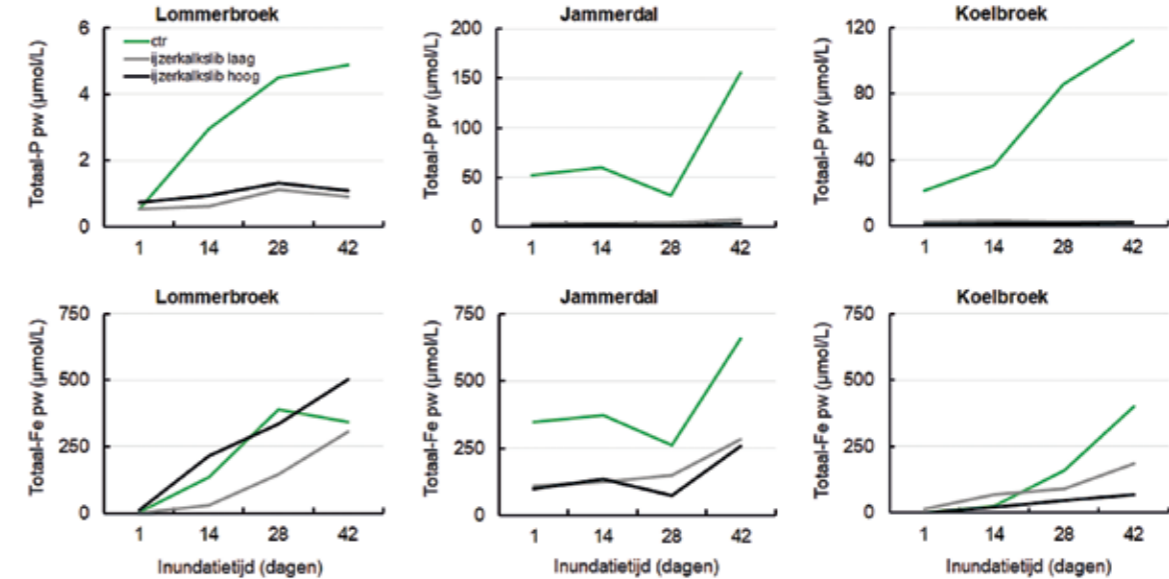
Figure 2 Soil pore chemistry eight months after application of the iron- and calcium-rich sludge. On the x-axis the dose series of the semi-solid iron- and calcium-rich sludge given in order to be able to obtain the following treatments. a: control; b: low dosage of iron- and calcium-rich sludge; c: high dosage of iron- and calcium-rich sludge (see paragraph on set up of field experiments).

tratie afneemt. Daarnaast kan Fe²⁺ adsorberen aan het bodemadsorptiecomplex en aan ijzer(hydr)oxiden die (nog) niet zijn gereduceerd.

In het Lommerbroek en Koelbroek bleef de toplaag van de ijzerkalkplots wel langdurig roestkleurig. Door de tijdelijke en permanente lage waterpeilen treden er daar

slechts tijdelijk of geen reductieprocessen op in de bodemtoplaag. Doordat ijzerreductie uitblijft lost er ook (nagenoeg) geen gereduceerd ijzer op (figuur 2b).

Figuur 3 laat de resultaten zien van de experimentele inundatie van de bodems. Te zien is dat er ijzerreductie optrad na inundatie van de controlebodems uit



Figuur 3 Ontwikkeling van de concentratie fosfor en ijzer(II) in het bodemvocht (pw) afkomstig uit de proefplots gedurende zes weken van inundatie in een donkere klimaatcel (18 °C).

Figure 3 Development of the concentration fosfor and reduced iron in the soil pore water (pw) from the experimental plots during an inundation period of six weeks in a climate-controlled room in the dark at 18 °C.

Lommerbroek en Koelbroek en dat de fosfaatconcentraties van het poriewater toenamen. Bij de ijzerkalkslibbehandelingen bleven de fosforconcentraties overal steeds zeer laag. De ijzerconcentraties vielen lager uit of waren gelijk aan de waarden die bij de controlebehandelingen werden gemeten. Meer ijzer in de bodem leidt na inundatie dus niet tot meer opgelost ijzer in het poriewater.

Vegetatieontwikkeling

Figuur 4 laat de biomassaontwikkeling van de vegetatie zien (na twee jaar), met daarbij het aantal planten van slangenwortel en dotterbloem en de productie van stolonen door slangenwortel (in de zomer van 2017).

Tabel 1 laat de opnames van de vegetatie zien in mei 2018 (ook na twee jaar).

In de met ijzerkalkslib behandelde plots in het Jammerdal, waar het grondwater permanent in het

maaiveld staat, ontwikkelde zich ondanks de onveranderd hoge concentratie Olsen-P (circa 3000 μmol/l) toch een zeer kruidenrijke vegetatie, bestaande uit een mix van eutrafente soorten met doelsoorten van kwelvegetaties (figuur 5). De bovengrondse biomassa nam in drie van de met ijzerkalkslib behandelde plots af ten opzichte van de controleplots. In de plots met de hoogste dosering ijzerkalkslib waar ook maaisel was aangebracht, ontwikkelden zich voor elzenbroekbossen typische soorten van grote zeggenvegetaties en dotterbloemhooilanden. De bedekking van ongewenste ruigtesoorten als pitrus en ruw beemdgras nam af in de vier met ijzerkalkslib behandelde plots, terwijl de bedekking van doelsoorten als hoge cyperzegge, ijle zegge en lidrus duidelijk toenam. Hoge cyperzegge en ijle zegge waren afwezig in de plots waar geen maaisel was aangebracht (tabel 1). Ook de gepote slangenwortel ontwikkelde zich het best in de permanent natte plots van het Jammerdal, met name de

Figuur 4 Situatie in mei 2018. a: bovengrondse biomassa (kg fw/m²) in de plots; b: totale lengte (cm) aan door *Calla palustris* geproduceerde stolonen per plot in juli 2017; c: aantal *Calla palustris* in de plots in juli 2017; d: aantallen *Calla palustris* in de plots in juli 2017. De stippellijn geeft het aantal gepote planten. M+/- = maaisel en soorten wel/niet geïntroduceerd.

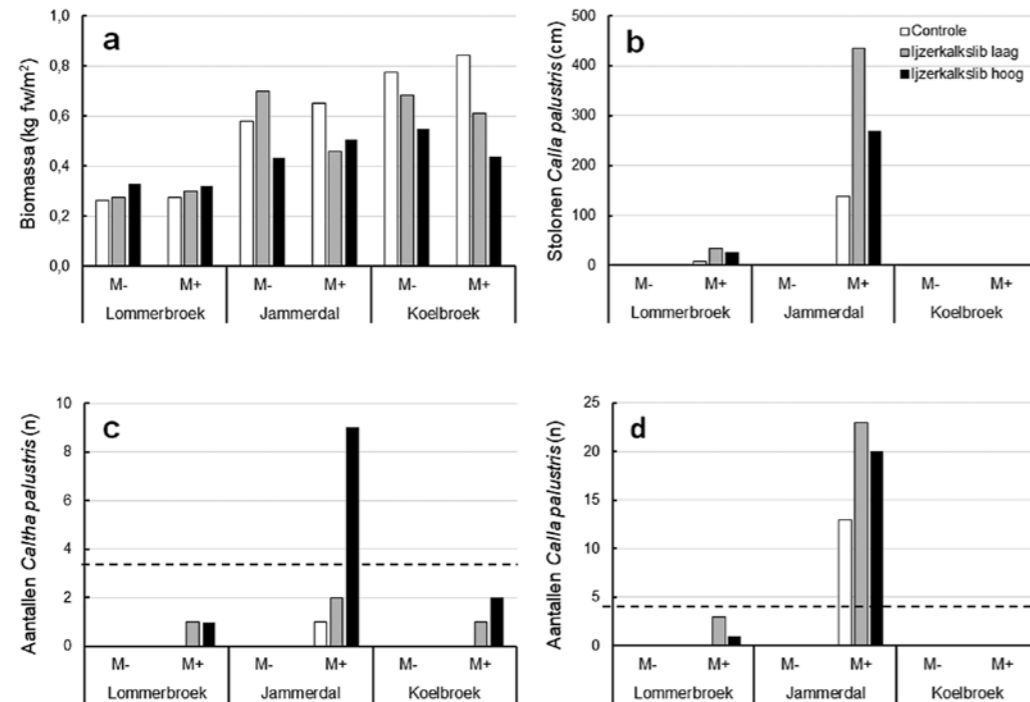


Figure 4 Situation in May 2018. a: aboveground biomass (kg fw/m²) in the plots; b: total length (cm) of stolons produced by *Calla palustris* in each plot in July 2017; c: number of *Calla palustris* plants in the plot in July 2017; d: number of *Calla palustris* plants in the plot in July 2017. The broken line gives the number of planted plants. M+/- = with/without introduction of clippings and plant species.

plots waaraan ijzerkalkslib was toegediend. De planten produceerden veel biomassa in de vorm van stolonen en ook aantal individuen van in de zomer van 2017 al sterk toe in de ijzerkalkplots (figuur 4a,d). De dotterbloem kon zich handhaven, maar zaaide zich alleen succesvol uit in de plot met de hoogste dosering ijzerkalkslib (figuur 4c). Deze ontwikkeling bleef onveranderd het jaar erop (tabel 1). In de zomer van 2018 werden in de plots weer zaden en kiemplanten van dotterbloem en slangenwortel aangetroffen. Dit komt overeen met de resultaten van eerdere groeiproeven met vernatte landbouwbodems, waarin ook werd aangetoond dat onder permanent natte condities de plantengroei met name gestuurd

wordt door de concentratie vrij beschikbaar fosfaat in het bodemvocht (Lucassen et al., 2015). Ook in dit onderzoek namen de DPS en vooral ook de fosfaatconcentratie in het poriewater sterk af door de additie van ijzerkalkslib. Waarschijnlijk is het zo dat Olsen-P vooral onder (semi)-droge omstandigheden sturend is voor de hoeveelheid fosfaat die voor planten beschikbaar is. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat plantenwortels in droge milieus zuren kunnen uitscheiden om fosfaten, afkomstig uit calcium- en ijzerfosfaatcomplexen, op te lossen en dat ze daarnaast gebruik kunnen maken van mycorrhizaschimmels. Moerasplanten kunnen dit in veel mindere mate en zijn



Figuur 5 Impressie van de controle plots in het Jammerdal zonder introductie van maaisel en soorten (links) en de plot met hoogste dosering aan ijzerkalkslib (overige foto's).

Figure 5 Impression of the control plots in Jammerdal with introduction of clippings and plant species (left) and the plot with the highest dosage of iron and calcium-rich sludge (other panels).

meer afhankelijk van de wateroplosbare fractie. In het Lommerbroek nam de bovengrondse biomassa van de vegetatie niet af met toenemende dosering van ijzerkalkslib (figuur 4a). Waarschijnlijk komt dit doordat de Olsen-P-concentratie hier al vrij laag was (Olsen-P < 1000 µmol/l). De verdere afname heeft waarschijnlijk vooral geleid tot een verschuiving in de soortensamenstelling. De bedekking van het dominerende pitrus en veldrus was lager op de met ijzerkalkslib behandelde plots dan op de controleplots. In dit relatief zwak gebufferde gebied (totaal-Ca < 25 mmol/l) werd de ontwikkeling van veenmos echter sterk gestimuleerd in de plots die met ijzerkalkslib waren verschaald én waarop maaisel uit het aangrenzende hoogveenbos was aangebracht. In de plots waar geen maaisel was aangebracht kon paraplutjesmos zich uitbreiden. In het najaar van 2017 produceerde slangenwortel biomassa in de vorm van stolonen (figuur 4b), terwijl het aantal gepote planten van slangenwortel en dotterbloem was afgenomen. De productie van stolonen leidde niet tot een netto toename van het aantal individuen in 2018 (tabel 1). Er waren nog enkele individuen van dotterbloem en slangenwortel aanwezig, maar deze planten waren relatief klein. Schijnbaar was het in het Lommerbroek te droog en te weinig gebufferd voor de ontwikkeling van deze typische elzenbroekbossoorten (tabel 1). In het Koelbroek nam de bovengrondse biomassa van de vegetatie af met een toenemende dosering van ijzerkalkslib (figuur 4a). De concentratie Olsen-P in de bodem

was zeer hoog (> 6000 µmol/l) en nam bij toenemende ijzerslibdosering iets af tot respectievelijk circa 5000 µmol/l (laag ijzerkalkslib) en 4000 µmol/l (hoog ijzerkalkslib). Deze afname was echter onvoldoende om ondergroei van andere kruiden tot ontwikkeling te laten komen. Ruw beemdgras domineerde in alle plots, de bedekking nam niet af bij een toenemende ijzerkalkslibaditie. De bedekking van grote brandnetel nam wel af bij een toenemende dosering van ijzerkalkslib. Doordat het waterpeil jaarrond beneden maaiveld stond was het voor slangenwortel te droog; de gepote planten waren in 2017 allemaal verdwenen zonder stolonen te hebben gevormd (figuur 4b,d). Ook in mei 2018 werd de soort niet meer teruggevonden, wel werden toen nog twee zeer grote planten van de dotterbloem teruggevonden in de ruigtevegetatie (tabel 1).

Conclusies en implicaties voor herstelmaatregelen

Uit het onderzoek is gebleken dat de additie van ijzerkalkslib in alle gevallen leidde tot beter gebufferde bodemcondities, een lagere fosfaatbeschikbaarheid en minder biomassa van ruigtesoorten. De fosfaatbeschikbaarheid moet echter voldoende verlaagd worden om ruigtesoorten genoeg te kunnen remmen, zodat lichtcondities verbeteren voor andere kruiden. Dit is ook is gebleken uit onderzoek in drogere graslanden (Dorland et al., 2016). Alleen als het grondwater langdurig (nagenoeg permanent) in het maaiveld treedt, ontwikke-

