

Waterberging en veenvorming als klimaatbuffer

waterberging
eutrofiëring
veenvorming
vernatting
fosfaat

Kansen en valkuilen vanuit biogeochemisch perspectief

De ontwikkeling van klimaatbuffers gaat vaak hand in hand met de ontwikkeling van nieuwe natte natuur. Het kan hierbij gaan om moerasnatuur die ontstaat als gevolg van de berging van oppervlaktewater of om nieuwe veenvormende natuur waarin vooral ook veel regenwater wordt vastgehouden. Aan de ontwikkeling van deze natte natuur zitten haken en ogen, met name ook vanuit biogeochemisch oogpunt, die in dit artikel besproken zullen worden.

Door klimaatverandering zullen zowel periodes van droogte als van hoge neerslagintensiteiten steeds frequenter voorkomen (Kosten, 2011). De weersextremen kunnen leiden tot overlast als overstromingen, droogteschade in de landbouw en infrastructuur, en (irreversibele) degradatie van natuurgebieden, bijvoorbeeld door verdroging en brand. Dit heeft er ook toe geleid dat de zoetwatervoorziening in Nederland hoger geprioriteerd wordt, zoals verwoord in het beleid van de Topsector Water. Het waterbeheer is kortom aan vernieuwing toe: het dient klimaatbestendig gemaakt te worden (Stuijtzand, 2008). Piekafvoeren moeten beperkt of voorkomen worden, en daarnaast moeten voor droge periodes reserves worden aangelegd en moet er aan voorraadvorming worden gedaan. Voor deze berging wordt vooral gezocht naar gebieden met een beperkte economische waarde. Vooral gebieden met de functie (nieuwe) natuur staan in de belangstelling. Vanwege dreigend biodiversiteitsverlies en de doelstellingen van de Kaderrichtlijn Water en Natura 2000 (Runhaar *et al.*, 2004; Stuijtzand, 2008) zijn natuurgebieden echter niet altijd geschikt voor waterberging. Daarom zal een deel ook moeten plaatsvinden in nieuwe natuur die gecreëerd wordt op (voormalige) landbouwgronden. Dit kan echter tot problemen leiden, omdat deze sterk met voedingsstoffen opgeladen bodems tot een extreem slechte waterkwaliteit kunnen leiden (Lamers *et al.*, 2012). Daarnaast wordt er ook gewerkt aan het reactiveren of

revitaliseren van natuurlijke landschapsvormende processen (Bureau Strooming, 2006). Voor laag Nederland wordt hierbij met name gedacht aan het herstel van veenvormende systemen. Venen kunnen als een spons water vasthouden waardoor de afvoer sterk wordt verminderd. Bovendien kan door veenvorming op gang te brengen de forse emissie van broeikasgassen worden omgezet in een netto vastlegging en kan bodemdaling worden omgezet in bodemstijging.

Hieronder zal op beide ontwikkelingen, waterberging en veenvorming, en de problemen dieper worden ingegaan.

Waterberging

Vernatting van voedselrijke grond

Retentiegebieden bestaan uit laag gelegen delen van het landschap die onder water kunnen lopen. Vaak bevatten de bodems geoxideerd ijzer (Fe^{3+}) in de vorm van ijzer(hydr)oxides. Deze driewaardige ijzer(hydr)oxides spelen een belangrijke rol bij de immobilisatie van fosfaat. Fosfaat, dat bijvoorbeeld via landbouwkundig gebruik in de bodem terecht komt, wordt sterk aan dit geoxideerde ijzer gebonden. Bij inundatie worden de bodems zuurstofloos en bij afwezigheid van zuurstof treden de ijzer(hydr)oxides op als alternatieve elektroacceptor voor de microbiële afbraak van organisch materiaal. Het ijzer wordt gereduceerd naar tweewaardig ijzer (Fe^{2+}) en het fosfaat komt vrij. Voor dit proces is niet alleen zuurstofloosheid een vereiste, maar

ALFONS SMOLDERS,
JOS VERHOEVEN,
HILDE TOMASSEN,
MARK VAN MULLEKOM,
MONIQUE VAN
KEMPEN, JAN ROELOFS
& LEON LAMERS

Dr. A.J.P. Smolders
Onderzoekcentrum B-WARE
Toernooiveld 1, 6525 ED
Nijmegen
A.Smolders@science.ru.nl
Prof. Dr. J.T.A. Verhoeven
Knowledge for Nature and
Water, Amersfoort
Dr. H.B.M. Tomassen
Onderzoekcentrum B-WARE
Drs. M. van Mullekom
Onderzoekcentrum B-WARE
Drs. M. van Kempen Radboud
Universiteit Nijmegen,
Institute for Water and
Wetland Research, Afdeling
Aquatische Ecologie en
Milieubiologie
Prof. Dr. J.G.M. Roelofs
Radboud Universiteit
Nijmegen, Institute for
Water and Wetland Research,
Afdeling Aquatische Ecologie
en Milieubiologie
Dr. L.P.M. Lamers Radboud
Universiteit Nijmegen,
Institute for Water and
Wetland Research, Afdeling
Aquatische Ecologie en
Milieubiologie

Foto Aat Barendregt
hoogveenontwikkeling in
Wooldse Veën, Winterswijk

Tabel 1 organische stof, Fe en P van bodem en poriewater (pw), twee weken na inundatie van de top laag (0-20 cm diepte) en diepere laag van de bodem (40-60 cm) in zes weilanden bij het Korenburgerveen. Olsen-P: voor de plant beschikbare fractie P.

		Organische stof %	Totaal Fe mmol l ⁻¹	Totaal P mmol l ⁻¹	Olsen P μmol l ⁻¹	Fe (pw) μmol l ⁻¹	P (pw) μmol l ⁻¹	Nh ₄ ⁺ (pw) μmol l ⁻¹
0-20 cm	Gemiddelde	10,6	61,6	26,8	2308	771,2	40,4	577,5
	SD	3,3	49,0	19,2	1029	480,6	35,0	298,7
40-60 cm	Gemiddelde	0,9	41,2	3,4	311	10,0	3,5	4,2
	SD	0,4	9,1	0,8	122	7,7	1,2	3,2

Tabel 1 organic matter, Fe and P of the soil and pore water (pw) after two weeks of inundation for the top layer (0-20 cm) and a deeper layer of the soil (40-60 cm) of six pastures near Korenburgerveen. Olsen-P: plant available P fraction.

er moet ook reactief organisch materiaal in de bodem aanwezig zijn dat kan worden geoxideerd. Tabel 1 illustreert dit voor landbouwbodems uit de omgeving van het Korenburgerveen bij Winterswijk.

De top laag van de bodem (de bouwvoor) is rijk is aan organisch materiaal. Hier vindt dan ook veel meer ijzerreductie plaats dan in de diepere bodems. Bij de afbraak van organisch materiaal komt ammonium (NH₄⁺) vrij. Verder neemt de fosforconcentratie (P) in het poriewater van de bodem ook toe, omdat fosfaat wordt vrijgemaakt van de ijzer(hydr)oxide complexen. Omdat bij deze bio-geochemische reductieprocessen micro-organismen betrokken zijn, worden ze sterk gestimuleerd door hogere temperaturen. Inundatie van voedselrijke grond buiten het winterseizoen kan dan ook leiden tot het vrijkomen van fosfaat en ammonium in de bodem. In een plasdras-situatie leidt dit tot de ontwikkeling van ruigtevegetatie met bijvoorbeeld veel pitrus, of wilg (figuur 1). Als de bodem onder water ligt, zal het in het poriewater opgeloste fosfaat en gereduceerd ijzer naar de waterlaag diffunderen (figuur 2). Zolang deze waterlaag voldoende zuurstof bevat, wordt het gereduceerde ijzer op de overgang van de anaerobe waterbodem naar de waterlaag weer geoxideerd. Het geoxideerde ijzer slaat hier neer en bindt fosfaat dat van de geïnundeerde bodem naar de waterlaag diffundeert. Als er meer ijzer dan fosfaat aanwezig is in de onderwaterbodem komt er dus maar weinig fosfaat in de waterlaag terecht. Is de verhouding an-

dersom, dan kan er te weinig ijzer zijn om alle fosfaat te binden en vindt nalevering van fosfaat naar de waterlaag plaats waardoor eutrofiëring en algengroei kan optreden (Geurts et al., 2010). Daarnaast kan nalevering van fosfaat optreden wanneer de waterlaag anaeroob wordt. Dit zal vooral in de zomer optreden. Wanneer het water warmer wordt kan er namelijk minder zuurstof in de waterlaag oplossen, neemt de microbiële activiteit toe en zal er – wanneer de bodem nog veel reactief organisch materiaal bevat – veel zuurstof worden geconsumeerd waardoor de waterlaag zuurstofloos wordt. Bij gebrek aan zuurstof wordt er ook geen ijzer meer geoxideerd op de overgang van bodem naar waterlaag en kan het fosfaat en ijzer ongehinderd naar de waterlaag diffunderen (figuur 2).

Wanneer er geen nalevering van fosfaat plaatsvindt en het water helder blijft, is de kans groot dat er bij langdurige inundatie van voedselrijke bodems een massale ontwikkeling van waterplanten plaatsvindt (Lamers et al., 2012). Op zichzelf is dit niet per se negatief maar deze waterplanten kunnen veel nutriënten uit de bodem opnemen. Wanneer ze afsterven komen deze nutriënten weer deels vrij in de waterlaag. Waterplanten functioneren dus als een nutriëntenpomp van de bodem naar het water. Het oogsten van de waterplantenbiomassa kan problemen voorkomen.

Vernatting van fosfaatrijke bodems met voldoende organisch materiaal kan dus leiden tot de mobilisatie



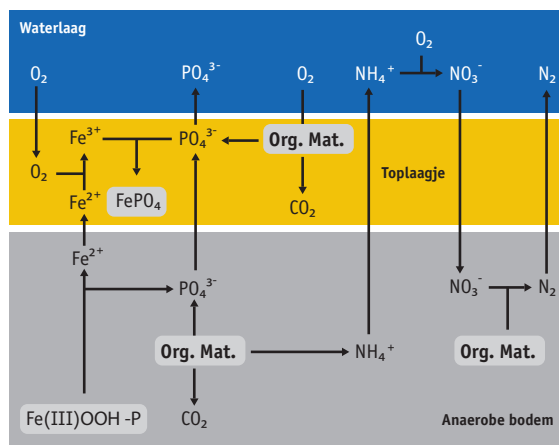
Figuur 1 links: ontwikkeling van een ruigtevegetatie (voornamelijk pitrus) op voormalige landbouwgrond in het Beekdal van de Essche Stroom (foto: Esther Lucassen). Beoogd natuurdoeltype hier: moeras met riet, wilgen en elzen. Rechts: verruiging van een moeraslocatie op voormalige landbouwgrond in het Beekbergerwoud (foto: Mark van Mullekom).

Figure 1 left: development of a productive vegetation (mainly Soft Rush) on former farmland in the valley of the Essche Stroom (photo: Esther Lucassen), with a targeted development of natural marsh vegetation with reed, willow and alder. Right: development of eutrophic vegetation in a swamp located on former farmland in the Beekbergerwoud (photo: Mark van Mullekom).

van veel fosfaat en vaak ook ammonium. Het is van wezenlijk belang om hier rekening mee te houden wanneer wordt gekozen voor waterberging in een voormalig landbouwgebied. Overigens kan middels eenvoudige proefjes worden vastgesteld hoeveel nutriënten er daadwerkelijk vrijkomen na inundatie (tabel 1). Ook kan de mate van P-mobilisatie vooraf voorspeld worden aan de hand van de P-verzadiging van het beschikbare ijzer (Loeb et al., 2008).

Afgraven of uitmijnen

Het verwijderen van de nutriëntenrijke bouwvoor kan in veel gevallen leiden tot een aanzienlijke vermindering van de kans op eutrofiëring en tot een toename van de biodiversiteit in de nieuw gevormde natuur (Beltman et al., 2009; Van Mullekom et al., 2009). Het leidt tevens tot maaiveldverlaging en vergroot hiermee de waterbergingscapaciteit. Afgraven kan echter ook leiden tot een versnelde afvoer van grondwater uit aangrenzende systemen en dus tot verdroging van nabijgelegen goed ontwikkelde natuurterreinen. Een alternatief voor het afgra-



Figuur 2 schematische weergave van de processen die een rol spelen bij de reductie van geoxideerd ijzer en de nalevering van fosfaat uit geïnundeerde bodems.

Figure 2 schematic representation of the processes that play a role in the reduction of oxidized iron and the subsequent release of phosphate from inundated soils.

ven van de bouwvoor kan uitmijnen via maaibeheer zijn. Hierbij wordt fosfaat via een gewas versneld uit de bodem verwijderd door middel van een gerichte kalium- en/of stikstofbemesting. Vooral zand- en kleibodems zijn hiervoor geschikt. Voor het uitmijnen mogen de gronden niet al te droog of extreem nat zijn, zodat de gewasgroei op peil kan blijven en machinale bewerking moge-

lijk is. Er is een P-afvoer van (soms meer dan) 40 kg ha⁻¹ jr⁻¹ mogelijk (Sival & Chardon, 2004), vier keer zoveel als met een standaardbeheer van maaien en afvoeren.

Uitmijnen met kroosvaren (*Azolla*) is een ander alternatief voor ontgronden of regulier uitmijnen door maaibeheer. Kroosvaren neemt het fosfaat dat vrijkomt na inundatie zeer snel op. Omdat de plant in symbiose leeft met een stikstoffixerende bacterie zijn zonder bemesting met stikstof en/of kalium toch zeer hoge producties mogelijk. Wanneer de kroosvaren geoogst wordt, kan op deze manier het fosfaat, in de toekomst een schaarse grondstof, worden teruggewonnen. Met kroosvaren kan de landbouwgrond nog sneller worden uitgemijnd dan met bijvoorbeeld het inzaaien van een gras-klavermengsel. Bijkomend voordeel is dat deze wijze van uitmijnen samen gaat met permanente waterberging. Een nadeel is dat de natuurwaarde van een door kroosvaren gedomineerde waterplas gering is.

Kwaliteit inundatiewater

Behalve de eigenschappen van de bodem speelt ook het water waarmee wordt geïnundeerd een belangrijke rol. Dat kan schoon regenwater zijn dat lokaal wordt vastgehouden, maar ook water afkomstig van beken en rivieren. De waterkwaliteit hiervan laat in Nederland vaak te wensen over. Meestal is het water rijk aan nitraat en vaak ook fosfaat. Als dit water stil staat kan er (buiten het winterseizoen) algenbloei optreden of kunnen kroosdekken ontstaan. Daardoor nemen de zuurstofconcentraties van het water vaak sterk af omdat een kroosdek de zuurstofaanvoer vanuit de lucht afsluit. Wanneer de bodem nog voedselrijk is, zal ook dit weer leiden tot een versterkte nalevering vanuit de bodems. Door een gedeelte van het gebied in te richten als een voorzuiveringsmoeras, kan de fosfaatbelasting van een retentiebekken sterk afnemen. Een mogelijkheid is om het water

door een laag ijzerrijk zand te laten stromen en vervolgens door een denitrificatiebekken.

Behalve nutriëntenrijkdom kunnen ook andere chemische eigenschappen van het oppervlaktewater een belangrijke invloed hebben op de natuurkwaliteit. Zo heeft de hardheid van het water grote invloed op het voorkomen van ondergedoken waterplanten. Hard water is rijk aan bicarbonaat en relatief arm aan kooldioxide. In dit soort water komen vooral waterplanten tot ontwikkeling die in staat zijn om bicarbonaat te gebruiken als koolstofbron, zoals glanzig fonteinkruid, schedefonteinkruid en smalle waterpest. In zachter water komen waterplanten voor die bij voorkeur kooldioxide gebruiken. Daarnaast heeft waterhardheid ook een belangrijke invloed op de ontwikkeling van moerasvegetaties. Onder invloed van harder water kunnen laagveenvegetaties tot ontwikkeling komen (rietlanden, trilvenen, etc.), onder invloed van zeer zwak gebufferd water (regenwater) hoogveenvormende vegetaties.

Ook sulfaatrijk water kan voor problemen zorgen. Sulfaat is een reactief ion dat in onderwaterbodems door micro-organismen kan worden gereduceerd tot sulfide. Deze reductie gaat gepaard met de afbraak van organisch materiaal. Het sulfide dat vrij komt reageert in de bodem met opgelost gereduceerd ijzer waardoor het ijzer in de bodem wordt vastgelegd als ijzersulfide. Hierdoor neemt de mobiliteit van ijzer af, waardoor de nalevering van fosfaat naar de waterlaag kan toenemen. Bovendien wordt er door deze processen ook meer fosfaat vrijgemaakt in de onderwaterbodem (Smolders *et al.*, 2006). Wanneer al het ijzer gebonden is aan sulfide, kan het sulfide ophopen in het poriewater van de bodem. Dit sulfide is zeer toxisch voor veel wortelende planten en bodemfauna.

Voor de reductie van sulfaat is, net als voor de reductie van ijzer, organisch stof nodig. Het organisch stofgehal-

te en de ijzerconcentratie bepalen of blootstelling van nieuwe natuur aan sulfaat voor problemen gaat zorgen. Sulfaatreductie komt pas goed op gang nadat al het reduceerbare driewaardige ijzer in de bodem is gereduceerd. Hierbij is het grotendeels omgevormd tot tweewaardig ijzer(hydr)oxide. Ook hieraan kan fosfaat binden, maar deze binding is meestal minder sterk. Door de vorming van ijzersulfides neemt de bindingscapaciteit van het ijzer verder af waardoor fosfaat nog mobieler wordt. Dit alles speelt niet bij bodems die arm zijn aan organisch materiaal en veel ijzer bevatten. Deze kunnen een behoorlijke sulfaatbelasting verdragen. Maar door de accumulatie van organische stof kunnen ook hier op termijn reductieprocessen op gang komen en kan sulfaat voor problemen gaan zorgen.

Problemen met sulfaatrijk water kunnen worden voorkomen door een regime te creëren waarbij veel dynamiek in het systeem aanwezig is en de bodems regelmatig droogvallen. In veel klimaatbuffers zal dit ook wel het geval zijn vanwege de aard van het systeem: waterberging in periodes met een wateroverschot. Wanneer de bodem droogvalt komt er weer zuurstof in, waardoor ijzersulfide wordt geoxideerd. Hierbij komen ijzer(hydr)oxides en sulfaat vrij. Aan de ijzer(hydr)oxides kan het fosfaat weer goed binden en het sulfaat kan (deels) uitspoelen bij vernatting. Ook het ammonium dat accumuleert in de bodem kan bij droogvallen van de bodem worden omgezet (genitrificeerd) tot nitraat. Het gevormde nitraat kan onder natte omstandigheden weer worden gedenitrificeerd tot stikstofgas. Hierdoor treden dus stikstofverliezen op. Bovendien kan een deel van het organische materiaal versneld worden afgebroken onder invloed van de zuurstof. Er vindt dus als het ware een reset van het systeem plaats bij veel dynamiek waardoor de beschikbaarheid van voedingsstoffen afneemt (Smolders *et al.*, 2003; Lucassen *et al.*, 2005; Brouwer

et al., 2008). Voor systemen die belast worden met sulfaatrijk water kan dit een randvoorwaarde zijn voor een goede waterkwaliteit.

Winter- versus zomerinundatie

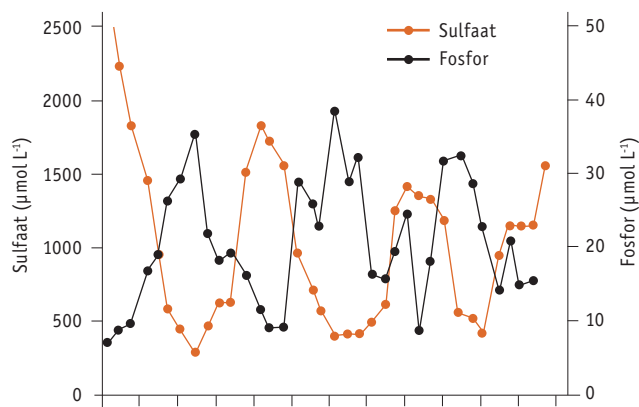
Inundatie in de winter zal veel minder problemen met de waterkwaliteit geven dan inundatie in de zomer (Lamers *et al.*, 2008). In de winter is de productiviteit van het systeem erg laag, waardoor nauwelijks groei van waterplanten en algen optreedt. Ook verlopen in de winter de microbiële processen die verantwoordelijk zijn voor de reductie van sulfaat en ijzer erg traag. Een nadeel van winterinundatie is wel dat het water dan vaak rijker is aan sulfaat en nitraat (Smolders *et al.*, 2006; Vermaat *et al.*, 2013; figuur 3). Dit komt doordat sulfaat en nitraat, door oxidatie vrijgemaakt in venige bodems, vanaf het najaar uitspoelen naar het oppervlaktewater. In de zomermaanden vindt er vanwege een neerslagtekort veel minder uitspoeling plaats. Daarnaast is ook de microbiële reductie van nitraat en sulfaat in de winter veel lager dan in de zomer. Wanneer het water dat in de winter wordt ingelaten in het voorjaar nog aanwezig is, kan het sulfaat in het systeem worden gereduceerd en kan ook de verhoogde nitraatconcentratie eventueel bijdragen aan algenbloei. Inlaat van water in de zomer heeft als nadeel dat het water vaak rijker is aan fosfaat (figuur 3). Dit komt doordat in de zomermaanden fosfaat wordt gemobiliseerd in onderwaterbodems. In de praktijk vindt de waterberging echter vooral plaats in de wintermaanden.

Aanvoer van slib

Bij tijdelijke overstroming in de winter is de chemische kwaliteit van het water vaak minder belangrijk dan de hoeveelheid in het water gesuspendeerd slib (Runhaar *et al.*, 2004). Als de stroomsnelheid van het water af-

Figuur 3 fluctuaties van de sulfaat- en totaal fosforconcentraties in het oppervlaktewater van de Tiendwegwetering (Lopikerwaard). Data: Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden.

Figure 3 fluctuations of sulphate and total phosphorus concentrations in surface waters of the Tiendwegwetering (Lopikerwaard). Data: Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden.



neemt, zakt het slib uit en kunnen aanzienlijke hoeveelheden nutriënten worden afgezet. Ook kan het slib zorgen voor een sterke verontreiniging met zware metalen (Stuijzand, 2008). Bij de inrichting van een waterberginggebied zou hier rekening mee gehouden kunnen worden door een slibvang aan te leggen.

Herstellen veenvorming

Veengebieden vormen belangrijke natuurlijke klimaatbuffers omdat ze water vasthouden tijdens perioden van wateroverlast. Veenvormende vegetaties leggen bovendien koolstof vast uit de atmosfeer en stoten minder broeikasgassen uit dan verdroogde veengebieden waar veenoxidatie plaatsvindt. Deze vegetaties zijn dus klimaatbuffers bij uitstek en dragen bij aan herstel van de biodiversiteit van het sterk gedegradeerde Nederlandse veenlandschap. Op dit moment zijn er verschillende initiatieven, onder meer in het IJperveld en gebieden rondom het Zuid-Laardermeer, om de veenvorming weer op gang te brengen (Tomassen *et al.*, 2012).

Vernatten van veengebieden

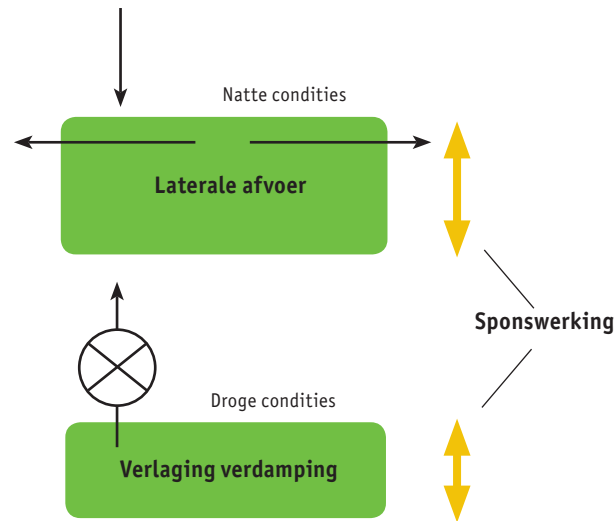
Veel van onze veengebieden zijn sterk aangetast en verdroogd als gevolg van verving en landbouwkundig gebruik. Zo worden in veenweidegebieden de waterpeilen kunstmatig laag gehouden om landbouwkundig gebruik (veeteelt) mogelijk te maken. In ontwaterd veen dringt zuurstof door in de toplaag waardoor het veen oxideert. De geaccumuleerde koolstof verdwijnt hierbij als kooldioxide naar de atmosfeer en de in het veen opgeslagen nutriënten en zwavel komen vrij. Deze veenafbraak leidt tot serieuze problemen waaronder bodemdaling, een slechte waterkwaliteit en emissies van broeikasgassen. De oxidatie van veen kan sterk verminderd worden door het veen weer te vernatten en de intensiteit van het landgebruik te verlagen. Kleine veranderingen in het beheer van veengebieden kunnen grote gevolgen hebben voor de broeikasgas- en koolstofbalans (Joosten, 2011). Op termijn moet het mogelijk zijn om kooldioxide-emitterende veengebieden (*sources*) te veranderen in broeikasgas- en koolstofputten (*sinks*). Hiermee kan een bijdrage geleverd worden aan het behalen van de doelstellingen van het Kyoto Protocol. Het is daarbij wel belangrijk om ook de effecten van vernatting op de emissies van de broeikasgassen methaan en lachgas mee te nemen (Tomassen *et al.*, 2012). Vernatting van veengronden leidt altijd tot een toename van de methaanemissie omdat de methaanproductie exponentieel toeneemt met de stijging van het waterpeil. Het aardopwarmingsvermogen (GWP) van methaan is een factor 25 hoger dan het vermogen van kooldioxide. In geresatureerde laagvenen is de methaanemissie relatief hoog vergeleken met intacte laagvenen, vermoedelijk door de voedselrijkheid van de toplaag.

De studie Klimaat voor Ruimte onderzocht in welke mate beheermaatregelen in het veenweidegebied kunnen bijdragen aan het verminderen van emissies van broeikas-

Acrotelm

De acrotelm is de bovenste, gemiddeld 50 centimeter dikke, en deels levende, laag van het veen die de voor hoogveenen zo karakteristieke zelfregulerende hydrologische eigenschappen bezit (Ingram, 1978; Proctor, 1995). Wanneer het erg nat is, zwelt de acrotelm op en absorbeert als een spons het regenwater. Het water dat niet opgenomen kan worden stroomt via laterale afvoer weg. Onder droge condities krimpt de acrotelm waardoor het doorlaatvermogen en ook de laterale afstroming fors afnemen. Daarnaast heeft een levend veenmosdek nog een regulerende invloed op de verdamping omdat de capillaire nalevering van water aanzienlijk vermindert wanneer het water-niveau in de acrotelm daalt. Bovendien vullen de hyaliene cellen van de veenmossen zich wanneer het droog wordt met lucht waardoor ze wit kleuren en minder opwarmen. Experimenten laten zien dat het onder de juiste omstandigheden mogelijk is om binnen een periode van tien jaar een nieuw acrotelm te ontwikkelen (Tomassen *et al.*, 2012).

gassen (Kroon *et al.*, 2010). De netto balans in een moderne veenweide, met een peil van 60 cm onder maaiveld, bedraagt ongeveer +1620 g CO₂-equivalenten m⁻² jaar⁻¹ (Schrier-Uijl, 2010). Bij een peilverhoging tot 20 cm onder maaiveld wordt een flinke reductie in de emissie van kooldioxide en lachgas bereikt, terwijl de methaanemissie stijgt. De netto balans komt uit op circa +560 g CO₂-equivalenten m⁻² jaar⁻¹. Bij het herstel van veenvorming zal de vastlegging van kooldioxide toenemen en wordt de netto balans -550 g CO₂-equivalenten m⁻² jaar⁻¹ (Schrier-Uijl, 2010). Per saldo is er dus altijd sprake van een afname van het broeikaseffect ondanks een toename van de methaanemissie in de meeste gevallen. In hoogveen vormen de vegetaties kan de methaanemissie sterk gereduceerd worden door microbiële methaanoxidatie en koolstofherfixatie in de veenmoslaag (Kip *et al.*, 2010). Veenmossen leven namelijk samen met bacteriën die het methaan oxideren. De kooldioxide die hierbij vrijkomt wordt gebruikt



Figuur 4 schematische voorstelling van de werking van een acrotelm.

Figure 4 schematic representation of the functioning of an acrotelm

voor de fotosynthese van het veenmos. Dit mechanisme draagt bij aan de reductie van de methaanemissie in systemen die door veenmos gedomineerd worden.

Hoogveen vorming

In intacte hoogveenen zorgt de toplaag van levend en recent afgestorven veenmos (acrotelm; zie kader) zelf voor een stabiele hydrologische situatie en groot waterbergend vermogen. Het herstel van de juiste condities in de acrotelm is een absolute randvoorwaarde voor het op gang komen van hoogveen vorming (Joosten, 1995). Niet alle veenmossoorten beschikken over de goede eigenschappen. Wrattig veenmos (*Sphagnum papillosum*), hoogveenveenmos (*S. magellanicum*), kamveenmos (*S. imbricatum*), bruin veenmos (*S. fuscum*) en rood veenmos (*S. rubellum*) zijn de belangrijkste sleutelsoorten (Joosten, 1995). Dit zit hem met name in de resistentie van deze soorten tegen afbraak. Slenksoorten als waterveenmos

Figuur 5 links: ontwikkeling van veenmossen op geplagde veengronden in de Oosterpolder, Groningen (foto Mark van Mullekom); rechts: het kweken van veenmossen op voormalige landbouwgronden ten noorden van Oldenburg in Niedersachsen, Duitsland (foto Gijs van Dijk).

Figure 5 left: development of peat mosses on former agricultural land with peaty soils in the Oosterpolder (Groningen) after the removal of the nutrient rich top layer (photo: Mark Mullekom); right: growing peat mosses on former agricultural land north of Oldenburg, Germany (photo: Gijs van Dijk).



(*S. cuspidatum*) en in mindere mate fraai veenmos (*S. fallax*) breken veel beter af, waardoor geen toplaag met een groot waterbergend vermogen ontstaat. Terreindelen waar alleen slenksoorten aanwezig zijn, blijven voor hun hydrologie afhankelijk van hun omgeving. Het herstel van een min of meer zelfregulerend hoogveenvormend systeem kan dan ook pas op gang komen indien één of meer van de sleutelsoorten over grotere oppervlakten tot dominantie zijn gekomen en een veenlaag vormen.

Na het plaggen van de voedselrijke toplaag (tot een Olsen-P concentratie $< 350 \mu\text{mol L}^{-1}$) kan in verdroogde veen(weide)gebieden door het vasthouden van regenwater weer een gunstige uitgangssituatie voor de ontwikkeling van door veenmossen gedomineerde vegetaties ontstaan (Tomassen *et al.*, 2012). In eerste instantie zullen op de gebufferde bodems soorten als haakveenmos (*Sphagnum squarrosum*) of gewoon veenmos (*Sphagnum palustre*) tot ontwikkeling komen (figuur 5). Deze snelgroeiende soorten kunnen de juiste abiotische randvoorwaarden scheppen omdat ze voor een verdergaande verzuring zorgen. Hierdoor kunnen de hoogveenvormers zich uiteindelijk vestigen, mits dispersie en vestiging mogelijk is. In Duitsland wordt sinds 2001 onder-

zoek gedaan naar het kweken van veenmossen (Gaudig *et al.*, 2012). Het onderzoek richt zich op het optimaliseren van de groeicondities voor veenmossen, onder andere op geplagde voormalige landbouwgrond. Een stabiele waterstand blijkt de belangrijkste sturende factor te zijn, en onder optimale condities kunnen zeer hoge biomassa-producties gehaald worden tot wel 6900 kg droge massa aan veenmos $\text{ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ (*S. palustre*).

Het probleem van afplaggen is dat er een bestemming moet worden gevonden voor de afgeplagde veraarde en voedselrijke veengrond. Deze kan worden opgebracht bij veenbodems die een landbouwkundige functie behouden, waardoor natte plekken, die bijvoorbeeld continu onderbemaling vereisen, voor de veeteelt veiliggesteld kunnen worden.

Samenvatting

Klimaatbuffers in de vorm van natte natuur kunnen verschillende functies hebben: het bergen of vasthouden van oppervlaktewater (waterberging) of het vasthouden van regenwater, wat prima samen kan gaan met het herstel van (hoog)veenvormende vegetaties.

Voor de berging van oppervlaktewater is de interactie

tussen het oppervlaktewater en de bodem in zeer sterke mate bepalend voor de waterkwaliteit en de vegetatieontwikkeling. Wanneer waterberging hand in hand moet gaan met natuurontwikkeling is dit een relevant aandachtspunt. Vernatting van voedselrijke grond kan leiden tot een sterke verruiging van de vegetatie (plastrassituatie) of tot een excessieve groei van algen of monotone vegetaties van ondergedoken waterplanten. Daarnaast kan via het water ook voedselrijk slib aangevoerd worden dat zich lokaal afzet. Waterberging in de winter is minder risicovol dan waterberging in de zomer omdat in de winter de microbiële activiteit veel lager is. In de zomer heeft de waterkwaliteit van het te bergen water een veel groter effect op de ontwikkeling van het systeem, en kan zuurstofloosheid van de waterlaag leiden tot een versterkte nalevering van nutriënten uit de bodem. Met een relatief schrale nutriëntenarme uitgangssituatie kunnen dit soort problemen grotendeels voorkomen worden. Dit kan worden bereikt door in voor-

malige landbouwgebieden de nutriëntenrijke toplaag te verwijderen. Als alternatief kan juist worden gekozen voor het benutten van de voedselrijkdom van de bodem door waterberging op voormalige landbouwgrond te combineren met het kweken van kroosvaren (Azolla). Dit kan als een voortraject gebruikt worden om later, bij lagere voedselrijkdom, naar veengroei over te gaan. Door veen(weide)gebieden te vernattingen kan veenvorming op gang worden gebracht. Er treedt verzuring van de toplaag op en op termijn, als sleutelsoorten zich kunnen vestigen, kan een hoogveenvormende vegetatie tot ontwikkeling komen. (Hoog)venen werken als een grote spons en kunnen veel water vasthouden in perioden van overvloedige regenval. Bovendien kunnen ze broeikasgassen vastleggen. Functionerende venen zijn dan ook uitstekende klimaatbuffers. Veenvorming via veenmosen blijkt het beste op gang te komen wanneer de voedselrijke toplaag wordt verwijderd.

Summary

Water storage and peat formation as climate buffer: opportunities and pitfalls from a biogeochemical perspective

Alfons Smolders, Jos Verhoeven, Hilde Tomassen, Mark van Mullekom, Monique van Kempen, Jan Roelofs & Leon Lamers

water storage, eutrophication, peat formation, rewetting, phosphate.

Climate buffers, natural areas specially designed to reduce the consequences of climate change, can be achieved in different ways. There is a distinction between the storage or retention of surface water (water storage) and the retention of rain water. The latter can,

particularly in peatlands, be combined with the recovery of Sphagnum dominated peat bog forming vegetation. The interaction between surface water and soil plays a major role in determining the water quality and vegetation development during water storage. This is a relevant issue when water storage must go hand in hand with nature development. Waterlogging of nutrient rich soil can lead to a strong development of fast growing semi-aquatic vegetation (after waterlogging) or to an excessive growth of algae or monotonous vegetation of submerged aquatic plants (after flooding). In addition, nutrient rich silt can be supplied via the water which can settle locally. Water storage in winter is less risky compared to water storage in summer due to lower microbial activity.

Literatuur

- Beltman B., A.J.P. Smolders & J.E. Vermaat, 2009.** Waterberging en natuurontwikkeling op veenweidegronden. *Landschap* 26/3: 95-102.
- Brouwer, E., E. Lucassen, A. Smolders & J. Roelofs, 2008.** Vennen kunnen verzuipen. *H₂O* 41(19): 35-37.
- Bureau Strooming bv, 2006.** Natuurlijke klimaatbuffers. Adaptatie aan klimaatverandering. Wetlands als waarborg.
- Gaudig, G., F. Gahlert, M. Krebs, A. Prager, J. Schulz, S. Wichmann & H. Joosten, 2012.** Sphagnum farming in Germany - 10 years on the road to sustainable growing media. Extended abstract No. 374, 14th International Peat Congress, Stockholm, Sweden.
- Geurts J.J.M., A.J.P. Smolders, A.M. Banach, J.P.M. van de Graaf, J.G.M. Roelofs & L.P.M. Lamers, 2010.** The interaction between decomposition, N and P mineralization and their mobilization to the surface water in fens. *Water Research* 44: 3487-3495.
- Ingram, H.A.P., 1978.** Soil layers in mires: function and terminology. *Journal of Soil Science* 29: 224-227.
- Joosten, J.H.J., 1995.** Time to regenerate: long-term perspectives of raised bog regeneration with special emphasis on palaeoecological studies. In: B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt & R.A. Robertson (eds.). *Restoration of Temperate Wetlands*. Chichester, UK. J. Wiley and Sons: pp. 379-404.
- Joosten, H., 2011.** The global peatland CO₂ picture. In: F. Tanneberger & W. Wichtmann (eds.). *Carbon credits from peatland rewetting. Climate – biodiversity – land use. Science, policy, implementation and recommendations of a pilot project in Belarus*. Stuttgart, Germany. Schweizerbart Science Publishers: pp. 20-30.
- Kip, N., J.F. van Winden, Y. Pan, L. Bodrossy, G.J. Reichart, A.J.P. Smolders, M.S.M. Jetten, J.S. Sinninghe Damsté & H.J.M. op den Camp, 2010.** Global prevalence of methane oxidation by symbiotic bacteria in peat-moss ecosystems. *Nature Geosciences* 3: 617-621.
- Kosten, S., 2011.** Een frisse blik op warmer water. Over de invloed van klimaatverandering op de aquatisch ecologie en hoe je de negatieve effecten kunt tegengaan. *Stowa-rapportnummer 2011-20*.
- Kroon, P.S., A.P. Schrier-Uijl, P.C. Stolk, F.K. van Evert, P.J. Kuikman, A.H. Hensen & E.M. Veenendaal, 2010.** Kunnen we sturen op landgebonden broeikasgas emissies? Naar een klimaat neutrale(re) inrichting van het landelijk gebied. *Landschap* 27/2: 99-109.
- Lamers L.P.M., R. Loeb, A.M. Antheunisse, M. Miletto, E.C.H.E.T. Lucassen, A.W. Boxman, A.J.P. Smolders & J.G.M. Roelofs, 2008.** Biogeochemical constraints on the ecological rehabilitation of wetland-vegetation in river floodplains. *Hydrobiologia* 565: 165-186.
- Lamers, L., S. Schep, J. Geurts & A. Smolders, 2012.** Erfenis fosfaatrijk verleden: helder water met woekerende waterplanten. *H₂O* 2012(13): 33-34.
- Loeb, R., L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2008.** Prediction of phosphorus mobilisation in inundated floodplains. *Environmental Pollution* 156: 325-331.
- Lucassen E.C.H.E.T., A.J.P. Smolders & J.G.M. Roelofs, 2005.** Effects of temporary desiccation on the mobility of phosphorus and metals in sulphur-rich fens: differential responses of sediments and consequences for water table management. *Wetlands: Ecology and Management* 13: 135-148.
- Mullekom, M. van, A.J.P. Smolders, E. Brouwer, W. Geraedts & J.G.M. Roelofs, 2009.** Herstel van schraalgraslanden in het Hierdense beekdal. *Vakblad voor Natuur, Bos en Landschap* 6 (8): 2-7.
- Proctor, M.C.F., 1995.** The ombrogenous bog environment. In: B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt & R.A. Robertson (eds.). *Restoration of Temperate Wetlands*: p. 287-303.
- Runhaar J., G. Arts, W. Knol, B. Makaske & N. van den Brink, 2004.** Waterberging en Natuur; Kennisoverzicht ten behoeve van regionale waterbeheerders. Rapportnummer 2004-16. Amersfoort, STOWA.
- Schrier-Uijl, A.P., 2010.** Flushing meadows. The influence of management alternatives on the greenhouse gas balance of fen meadow areas. PhD-thesis. Wageningen, Wageningen University.
- Sival, F.P. & W.J. Chardon, 2004.** Natuurontwikkeling op fosfaatverzadigde gronden: fosfaatonttrekking door een gewas. Rapport 1090. Wageningen, Alterra.
- Smolders A.J.P., E.C.H.E.T. Lucassen & J.G.M. Roelofs, 2003.** Waterpeilregulatie in broekbossen: bron van aanhoudende zorg. *H₂O* 36 (24): 17-19.
- Smolders A.J.P., L.P.M. Lamers, E.C.H.E.T. Lucassen, G. van der Velde & J.G.M. Roelofs, 2006.** Internal eutrophication: 'How it works and what to do about it', a review. *Chemistry and Ecology* 22: 93-111.
- Stuijffand S. (red.) 2008.** Praktijkervaringen met waterberging in natuur(ontwikkelings)gebieden. Hoofdrapport Suzanne pilotprogramma waterberging en natuur. Waterdienst rapport nr. 2007.011/ Alterra rapport nr. 1632.
- Tomassen H., M. van Mullekom, L. Lamers & A.J.P. Smolders, 2012.** Koolstoffixatie in het Zuidlaardermeergebied, een literatuurstudie. Nijmegen. Onderzoekcentrum B-WARE, Rapport 2012-23.
- Vermaat J.E., J. Harmsen, F.A. Hellman, H.G. van der Geest, J.J.M. de Klein, S. Kosten, A.J.P. Smolders, J.T.A. Verhoeven, R.G. Mes & M. Ouboter, 2013.** Sulfaatbronnen in het Hollandse veenlandschap. *Landschap* 30/1: 5-13