

Sulfaatbronnen in het Hollandse veenlandschap

sulfaat
waterkwaliteit
veenafbraak
gebiedsvreemd water
toxiciteit

Er bestaat onduidelijkheid over de effecten van sulfaat op de waterkwaliteit en over het relatieve belang van verschillende bronnen van sulfaat in het Hollands-Utrechtse veenlandschap. Deze studie laat zien dat de oxidatie van het gebiedseigen veen meestal de belangrijkste bron is en dat de veenpolders netto exporteurs zijn van sulfaat. Over het algemeen zijn de sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater van het laagveen-gebied vrij hoog. Dit heeft een verarmende invloed op de watervegetatie.

Sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater van het West-Nederlandse laagveen gebied variëren aanzienlijk, van 2 tot > 1000 mg l⁻¹ SO₄. Er bestaat onduidelijkheid over de bronnen van dit sulfaat, en ook over de effecten. Zo is het de vraag of sulfaat vooral van buiten met het inlaatwater binnenkomt of dat het juist lokaal vrijkomt uit de bodem. Het gedraineerde veen mineraliseert waar het blootgesteld wordt aan de lucht. De bodem klinkt in met 2 tot 10 mm j⁻¹ (Schothorst, 1977; Borger, 1992, Jansen et al., 2009) en zwavel, aanwezig in de organische stof en in sulfiden in de veenbodem, oxideert hierbij tot sulfaat, dat kan afspoelen naar de sloot. Ook bestaat er onenigheid over de vraag of hoge sulfaatconcentraties bijdragen aan de oxidatie van oevers, de zogenaamde veenrot (Lamers et al., 1998; 2002; Smolders et al., 2006; Van den Akker et al., 2007). Het is van belang om dit te weten in verband met een toekomstige, klimaatbestendige inrichting van het West-Nederlandse laagveengebied. Om veenmineralisatie en verdere bodemdaling tegen te gaan is namelijk peilverhoging noodzakelijk. Klimaatprojecties van steeds vaker voorkomende droge zomers suggereren dat hiervoor water van elders ingelaten zal moeten worden (onder meer Immerzeel et al., 2009; Hellmann & Vermaat, 2011). Dit water bevat echter vaak hoge concentraties sulfaat en het vermoeden bestaat dat hierdoor interne eutrofiëring en voortgaande veenoxidatie optreedt.

Ons doel was het relatieve belang van de verschillende sulfaatbronnen te verhelderen en vervolgens de effecten, zoals veenafbraak en mogelijke toxiciteit voor wa-

terplanten te inventariseren. De studie heeft zich ook op een aantal andere, met de problematiek samenhangende vragen gericht, maar daarvoor verwijzen we naar het uitgebreide verslag (Vermaat et al., 2012).

Aanpak

In dit project is de kennis over het onderwerp in Nederland samengevat door een kernteam: de auteurs van dit artikel. Onze bevindingen zijn getoetst in een workshop met een bredere groep deskundigen. Er is gebruik gemaakt van literatuur, deels ongepubliceerde databestanden van waterschappen en onderzoeksinstituten (B-Ware en Alterra) en de eerder opgestelde waterbalansen van Vermaat & Hellmann (2010). Er zijn jaarbalansen gemaakt van in- en uitstroom van sulfaat op drie schalen: die van een perceel en bijbehorende sloot, die van een complete polder en die van de boezem, het afwateringsgebied van een waterschap. De processen en balansposten op perceels- en slootschaal zijn weergegeven in figuur 1 (Vermaat et al., 2012). De verschillende oxidatiestaten van zwavel zijn hierbij van groot belang. In een zuurstofrijke omgeving is sulfaat mobiel. In zuurstofloze condities is zwavel meestal aanwezig in de vorm van sulfide en het is dan vaak gebonden als ijzersulfide en daardoor immobiel. De polderbalans (figuur 2) is gericht op een aparte, ongeveer 1 meter diepe schijf van land en water, bestaande uit de ondiepe bodem, het oppervlaktewater en het maaiveld (min of meer boven de GLG, Gemiddeld Laagste Grondwaterstand) en drijvend op het onverweerde veen en de slootbodem. Fluxen

JAN VERMAAT, JOOP
HARMSSEN, FRITZ
HELLMANN, HARM VAN
DER GEEST, JEROEN DE
KLEIN, SARIAN KOSTEN,
FONS SMOLDERS, JOS
VERHOEVEN, RON MES &
MAARTEN OUBOTER

Prof. Dr. Ir. J.E. Vermaat
sectie Aarde en Economie,
Faculteit Aard- en Levens-
wetenschappen, Vrije
Universiteit
j.e.vermaat@vu.nl
Dr. J. Harmsen Alterra,
Wageningen UR
Drs. F.A. Hellmann Instituut
voor Milieuvraagstukken, Vrije
Universiteit
Dr. H.G. van der Geest afde-
ling Aquatische Ecologie en
Ecotoxicologie, Universiteit
van Amsterdam
Dr. Ir. J.J.M. de Klein afde-
ling Aquatische Ecologie en
Waterkwaliteit, Wageningen UR
Dr. S. Kosten afdeling
Aquatische Ecologie en
Waterkwaliteit, Wageningen
UR en afdeling Aquatische
Ecologie en Milieubiologie,
Radboud Universiteit Nijmegen
Dr. A.J.P. Smolders
Onderzoekscentrum B-WARE en
afdeling Aquatische Ecologie
en Milieubiologie, Radboud
Universiteit Nijmegen
Prof. Dr. J.T.A. Verhoeven
Knowledge for Nature and
Water, Amersfoort
Drs. R.G. Mes Provinciale
Adviescommissie
Leefomgevingskwaliteit,
Provincie Zuid-Holland
Drs. M. Ouboter Waternet,
Amsterdam

Foto Esther Lucassen Gele
plomp (*Nuphar lutea*)

vanuit de schijf van en naar deze laatste twee kunnen zo apart meegenomen en verdisconteerd worden in de balans. Voor vier polders: de Krimpenerwaard, Polder Zegveld, de Nieuwe Keverdijkse polder en de Vlietpolder, waren voldoende sulfaatgegevens van het oppervlakte-water beschikbaar om een balans te kunnen maken. Voor de effecten op vegetatie is uitgegaan van onderzoek aan de Radboud Universiteit (Bloemendaal & Roelofs, 1988; Smolders et al., 2003) aangevuld met recente veldgegevens van Waternet. Directe toxiciteit van sulfaat voor onderwatervegetatie is moeilijk aan te tonen vanwege het samenspel van meerdere processen (figuur 1). In tegenstelling tot sulfide is sulfaat op zichzelf waarschijnlijk weinig giftig (Lamers et al., 1998; Smolders et al., 2003). Een verhoogde sulfaatbelasting kan leiden tot eutrofiëring, ijzergebrek, sulfidotoxiciteit en ammoniumtoxiciteit, allemaal factoren die de vegetatie

beïnvloeden. Voor waterplanten die betrokken zijn bij de verlanding leidt dit tot multi-stress verschijnselen (Smolders et al., 2003) die weer leiden tot het verdwijnen van de meest karakteristieke en bijzondere vegetatie. Op basis van een uitgebreide literatuurstudie (Vermaat et al., 2012) hebben we daarom drempelwaarden afgeleid voor sulfaat, sulfide, ijzer en ammonium waarboven de meeste soorten waterplanten in groei of voorkomen beperkt worden.

Resultaten

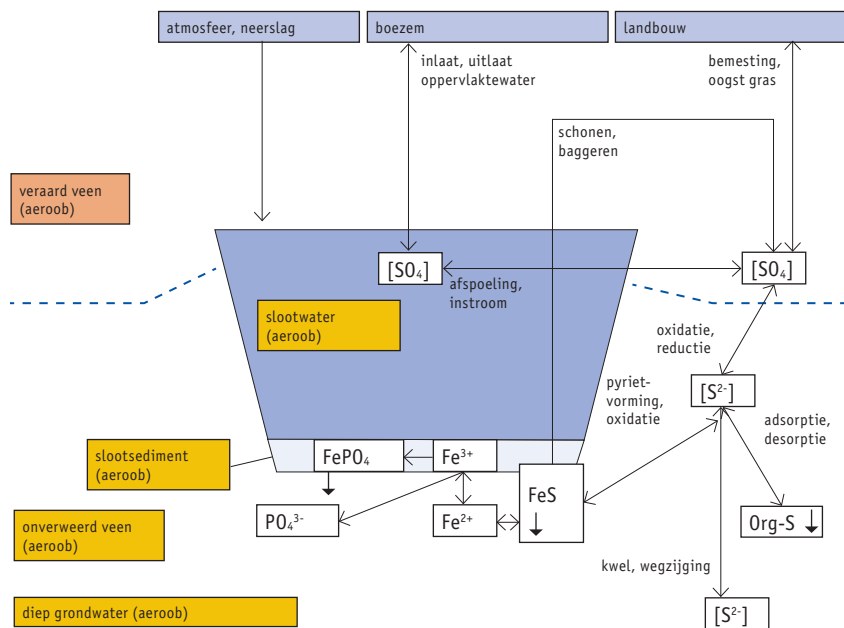
Bronnen van sulfaat

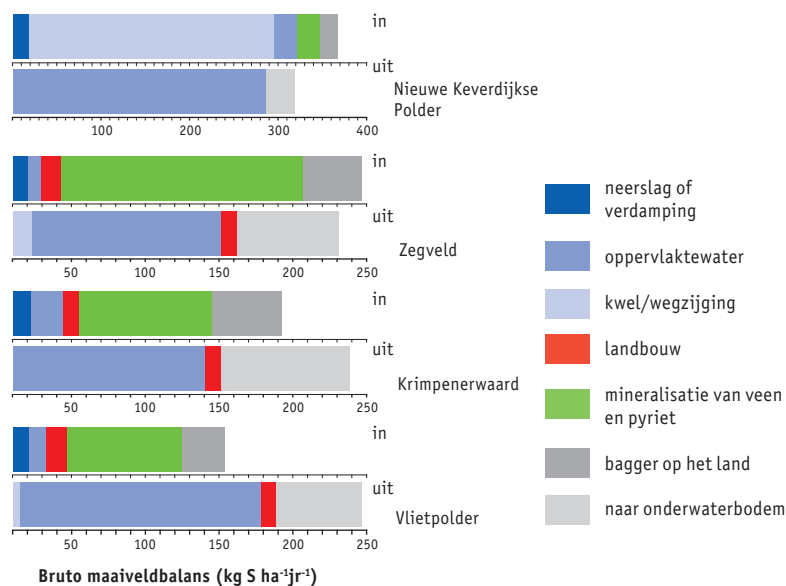
De sulfaatbalansen van perceel, sloot en polder zijn nauw met elkaar verweven, zoals te zien is aan de fluxen in figuur 1. De huidige externe bronnen zijn atmosferische depositie, inlaatwater, en mest.

De atmosferische depositie bedraagt tegenwoordig (2010) zo'n 30-45 kg SO₄ ha⁻¹ j⁻¹ (Van Dam, 2009; Hendriks & Van Gerven, 2011). Die is in het recente verleden veel hoger geweest (Buijsman et al., 2010). Sinds 1980 is de nationale emissie in de vorm van SO₂ gedeceimeerd van 465 naar 40 kt j⁻¹ en ook de totale sulfaatdepositie is met meer dan 80% afgenomen (De Vries, 2008). Inlaatwater wordt gebruikt om in de zomerperiode het neerslagtekort aan te vullen. Dit 'gebiedsvreemde' water wordt vaak als ongewenst beschouwd, omdat de kwaliteit ervan slechter zou zijn dan die van 'gebiedseigen' water. Om het polderpeil in de zomer te kunnen handhaven is gemiddeld 100 mm water (of 1000 m³ ha⁻¹) nodig (Huinink, 2001), oplopend tot 300 mm in een erg droog jaar. Per 100 mm aanvoer wordt 80 kg SO₄ ha⁻¹ j⁻¹ binnengebracht als gebruik wordt gemaakt van IJmeerwater (Specken & De Groot, 2010) en 50 kg SO₄ ha⁻¹ j⁻¹ als gebruik wordt gemaakt van Rijnwater bij normale afvoeren. De SO₄-concentratie verschilt per zijarm waarover het Rijnwater zich verdeelt. Gegevens van Twisk (2010)

Figuur 1 schematisering van posten in de sulfaatbalans in een veenperceel en -sloot.

Figure 1 sulfate budget items and processes in a ditch and surrounding parcel of drained peatland.





laten zien dat het aanvoerwater uit de Lek in de zomer 50 en in de winter 60 mg l⁻¹ SO₄ bevat, de Hollandse IJssel bij Gouda fluctueert tussen 40 en 200 mg l⁻¹ SO₄, terwijl de gehalten van de Oude Rijn bij Bodegraven ook aanzienlijk fluctueren (figuur 3).

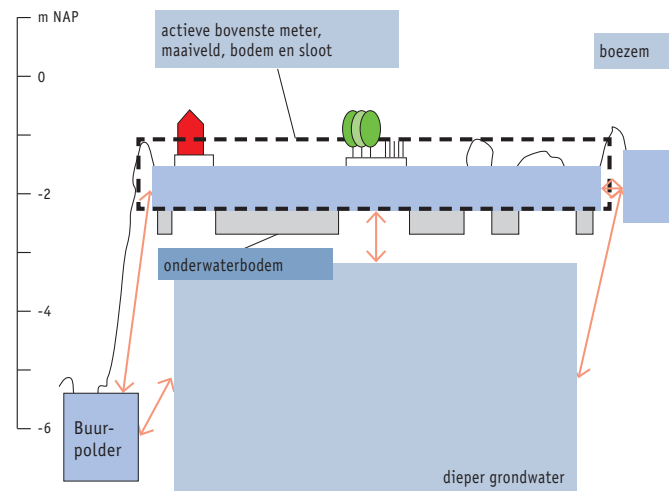
Sulfaat wordt ook aangevoerd via koe- en kunstmest. Vanwege de verminderde depositie werkt sulfaat in kunstmest inmiddels weer productieverhogend en veehouders, ook op veen, wordt geadviseerd om daarmee te bemesten (BLGG, 2010). We schatten in dat het netto bedrijfsoverschot in de melkveehouderij, mest minus melk en vlees, 15 kg SO₄ ha⁻¹ j⁻¹ bedraagt.

Onze polderbalansen (figuur 2) laten twee belangrijke interne bronnen zien: de mineraliserende veenbodem inclusief het daarin aanwezige pyriet en de op het land gebrachte bagger uit de onderwaterbodem. Beide bronnen zijn kwantitatief veel belangrijker dan het inlaatwater. De onderwaterbodem is een belangrijke tijdelijke

opslagplaats van sulfaat dat elke zomer vanuit de sloot naar die bodem verdwijnt en als sulfide wordt vastgelegd. Bij een baggerbeurt, zo eens in de zes tot tien jaar, als grond uit die sloot op het perceel wordt verspreid, komt de sulfaat weer vrij.

De Nieuwe Keverdijkse Polder is een geval apart. Vanwege het dunne (Jansen et al., 2009) of zelfs ontbrekende veenpakket is de kwelstroom daar aanzienlijk (Post et al., 2002). Deze brakke zwavelrijke kwel uit holocene wadafzettingen is de belangrijkste bron van sulfaat.

De polderbalansen suggereren dat alle polders met het uitgeslagen water in de winter aanzienlijke hoeveelheden sulfaat exporteren naar de boezem (figuur 2). Dit wordt bevestigd in onze balans voor het hele beheersgebied van het Hoogheemraadschap Rijnland (tabel 1). Zowel de water- als de sulfaatbalans sluiten verrassend goed. Het uitgeslagen polderwater is verantwoordelijk voor 70% van de sulfaatvracht naar de boezem, gebieds-

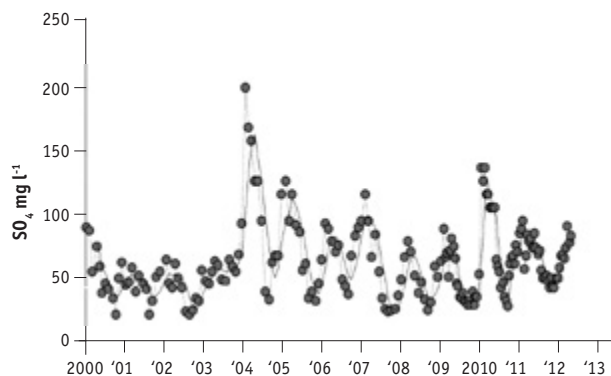


Figuur 2 polderbalans voor zwavel in vier veenpolders. De balans is in kg zwavel in plaats van sulfaat, omdat de fluxen in gereduceerd milieu meestal sulfiden zijn (omrekenen naar sulfaat: x3). Rechts een geschematiseerde dwarsdoorsnede door een polder met rechts de boezem en links een diepere naastliggende polder. Het kader met de gebroken lijn geeft in de dwarsdoorsnede het gebied aan waar de bruto maaiveldbalans betrekking op heeft.

Figure 2 sulfur mass budgets for four polders expressed in kg S rather than sulfate (x3). Scheme on the right is a cross section of a polder with a deeper polder to the left and the higher water body that receives the drainage to the right. The broken frame in the inset cross section of a polder depicts the 1 m deep layer of land and water for which the input and output budget terms were estimated.

Figuur 3 seizoens- en jaarsvariatie in sulfaatgehalte van de Oude Rijn bij Bodegraven (gegevens Hoogheemraadschap Rijnland). Getrokken lijn is 3-maandelijkse lopend gemiddelde. Gemiddelde 69, standaardafwijking 28 mg l⁻¹ SO₄.

Figure 3 annual and seasonal variation in sulfate concentration at the Bodegraven Oude Rijn station, where water enters the regional water system of the water board of Rijnland. A three-monthly running mean is displayed as a smooth curve. Grand mean is 69, with a standard deviation of 28 mg l⁻¹ SO₄.



vreemd Rijnwater voor ongeveer 18% en rioolwaterzuiveringen voor 11%. Het meeste sulfaat wordt uitgeslagen bij Halfweg en Katwijk en verdwijnt naar de Noordzee.

Seizoensdynamiek

In de zomer zakt de grondwaterspiegel en dan treedt oxidatie van veen op met vorming van sulfaat in de onverzadigde zone boven de GLG. Uitspoeling van sulfaat vanuit het perceel zal in normale zomers echter nauwelijks optreden omdat de verdamping dan groter is dan de neerslag. Bij de hogere temperatuur in de zomer zal sulfaat in het slotwater, net als zuurstof en nitraat, worden gebruikt voor oxidatie van de gereduceerde, zuurstofloze slotbodem. Dit impliceert vastlegging in de onderwaterbodem als FeS (figuur 1) en een verlaging van de sulfaatconcentratie in het oppervlaktewater.

In de winter kan uitspoeling van sulfaat met het ondiepe bodemvocht naar sloot en boezem optreden, maar zal er geen nieuw sulfaat meer worden gevormd in de landbodem. Door de lage watertemperatuur in de winter zal het sulfaat in het slotwater niet noemenswaardig worden verbruikt als oxidator. In het tweede deel van de winter en het voorjaar neemt de uitspoeling af en zorgt de regen voor verdunning.

Tabel 1 water- en sulfaatbalans voor het beheersgebied van het Hoogheemraadschap Rijnland. Bron waterbalans: Hoogheemraadschap Rijnland (2003). Verantwoording concentraties sulfaat: Vermaat *et al.* (2012). Voor het uitgeslagen water is de mediane winterconcentratie van Rijnlands boezem gehanteerd.

Table 1 water and sulfate balance for the whole area of the water board Rijnland, 2002.

	Water miljoen m ³	Sulfaat mg SO ₄ l ⁻¹	Vracht 10 ³ kg SO ₄	%
In				
neerslag	41.8	4.8	201	0.4
uit polders	431.4	90	38826	70.4
inlaat Gouda	29	120	3480	6.3
inlaat Bodegraven	79.7	69	5499	10.0
rioolwaterzuivering-effluent	137.3	45	6179	11.2
inlaat sluisen	12.7	69	876	1.6
berging = sluitpost	0.9	69	62	0.1
Som	732.8		55123	100
Uit				
verdamping	26	0	0	0
naar polders	15.2	78	1186	2.2
Spaarndam	105.1	78	8198	14.9
Halfweg	310.4	78	24211	43.9
Gouda	40.7	78	3175	5.8
Katwijk	209.9	78	16372	29.7
Leidschendam	0.2	78	16	0
KvL sluis	8.8	78	686	1.2
wegzijing uit boezem	16.4	78	1279	2.3
berging	0	78	0	0
Som	732.7		55123	100

Al deze processen leiden tot lage gehalten in de zomer en hoge gehalten in de winter. Dit beeld is bevestigd met recente metingen in 2010 van Smolders *et al.* (2011) en modelonderzoek van Hendriks & Van den Akker (2012). In de zomer zijn de sulfaatgehalten in poldersloten lager dan die in het aangevoerde Rijnwater, wat duidt op verbruik van sulfaat uit het oppervlaktewater in de onderwaterbodem.

Sulfaat en veenafbraak

Oxidatie van veen leidt tot bodemdaling. Zuurstof is de belangrijkste elektronenacceptor bij dat proces; sulfaat kan die rol eventueel overnemen. In Vermaat *et al.* (2012) is geschat hoeveel sulfaat nodig is om de huidige bodemdaling volledig door sulfaatoxidatie te kunnen ver-

klaren. De berekening toont aan dat veel meer sulfaat nodig zou zijn dan voorhanden is. Bij diepe ontwatering kan per jaar tot 10,2 mm veen worden geoxideerd. Hierbij komt $10,2 \times 97,2 = 991 \text{ kg ha}^{-1} \text{ SO}_4$ vrij. Het vrijgekomen sulfaat kan op zijn beurt weer organische stof oxideren als er geen andere oxidatoren zijn. Dit komt dan overeen met 0,52 mm van de 10,2 mm bodemdaling, een relatief kleine bijdrage van ongeveer 5%. Hendriks & Van den Akker (2012) komen met modelberekeningen uit op een bijdrage van sulfaatreductie aan de veenafbraak in westerse veenweiden van hooguit 3% voor veenprofielen zonder kleidek en 5% (bij 60 cm drooglegging) tot 10% (bij 40 cm drooglegging) voor profielen met een kleidek.

Toxiciteit sulfaatconcentraties

Uit de literatuurstudie (Vermaat *et al.*, 2012) hebben we drempelwaarden afgeleid voor sulfaat, sulfide, ijzer en ammonium (tabel 2). De drempelwaarde voor sulfaat hebben we vervolgens getoetst aan veldgegevens uit de Vechtstreek. Voor 207 peilvakken kon het voorkomen van waterplanten gekoppeld worden aan sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater (figuur 4). De volgende waterplanten zijn apart bekeken: het minder gevoelige schedefonteinkruid, een groep gevoelige fonteinkruiden en krabbenscheer (volgens Bloemendaal & Roelofs, 1988). Schedefonteinkruid komt disproportioneel meer voor bij hogere sulfaatconcentraties, krabbenscheer en de gevoelige fonteinkruiden juist meer bij lagere concentraties. De figuur suggereert voor krabbenscheer een drempelwaarde rond de $100 \text{ mg SO}_4 \text{ l}^{-1}$, in plaats van de $30\text{-}50 \text{ mg SO}_4 \text{ l}^{-1}$ die voor de meeste soorten uit de literatuur naar voren komt (tabel 2).

Van de ongeveer 3000 peilvakgetallen in onze database blijft slechts 24% in de zomer onder de grenswaarde van $50 \text{ mg l}^{-1} \text{ SO}_4$. Dit suggereert dat de sulfaatgehalten in

grote delen van het laagveengebied hoog zijn en waterplantengemeenschap mogelijk beïnvloeden. In die 24% locaties is op basis van de sulfaatconcentratie potentie voor een soortenrijke waterplantenvegetatie. Deze punten liggen langs de rand van het veengebied tegen het zand of bij grotere plassencomplexen (figuur 5). Hier zijn kansen voor de eerste fasen van verlanding via krabbenscheer of zelfs trilveenvegetaties. Elders zijn sulfaatconcentraties hoog en zijn vooral algemene soorten te verwachten.

Discussie

In de eerste plaats hebben we een duidelijk antwoord op onze vraag naar de belangrijkste bronnen van sulfaat in veenpolders. Meestal is dat het langzaam verdwijnende veen zelf. Hoe dieper de drooglegging, hoe sneller de veenbodem afbreekt en inklinkt, en ook hoe meer sulfaat beschikbaar komt. Dit heeft consequenties voor het huidige waterbeheer, maar we kunnen het ook doortrekken naar aanpassingen die in de toekomst nodig zijn om waarschijnlijke gevolgen van klimaatsverandering op te vangen. De vrees voor de gevolgen van extra extern sul-

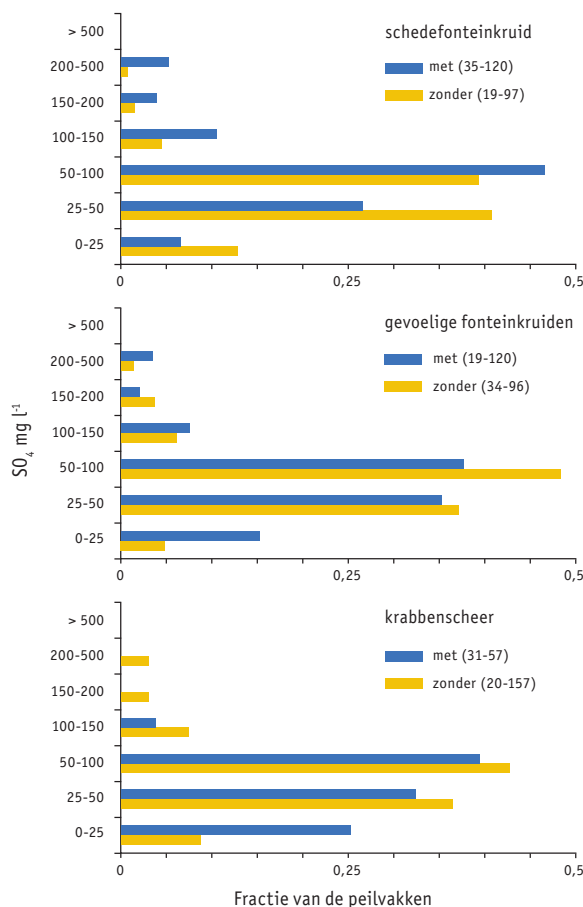
Tabel 2 samenvatting van afgeleide grenswaarden voor sulfaat en met de sulfaaddynamiek samenhangend ijzer en ammonium (voor meer details zie Vermaat *et al.*, 2012).

Table 2 threshold concentrations for sulfur, iron and ammonium in peat waters and sediments.

Parameter	Wat gebeurt er?	Grenswaarde (mg l ⁻¹)
Sulfaat waterlaag	Boven deze waarde sterke verslechtering waterkwaliteit en verdwijnen van bijzondere soorten waterplanten.	30-50
Sulfide sediment	Hierboven sulfidestress, sterk soortafhankelijk.	0.4-16
IJzer/fosfor ratio poriewater	Hieronder nalevering van P, afhankelijk van de P-concentratie in het poriewater	1 (-3) (mol mol ⁻¹)
IJzer/zwavel ratio van de bodem	Hieronder sterke verslechtering waterkwaliteit	0.5-1 (mol mol ⁻¹)
IJzer in poriewater	Hieronder ophoping van sulfide in reductieve bodems	0.3
Ammonium in waterlaag	Hierboven zelden vitale Krabbenscheer aangetroffen in het veld	0.7

Figuur 4 frequentieverdelingen van het voorkomen van schedefonteinkruid (*Potamogeton pectinatus*), een groep gevoelige fonteinkruiden (*Potamogeton acutifolius*, *P. berchtoldii*, *P. compressus*, *P. lucens*, *P. mucronatus* en *P. trichoides*) en krabbenscheer (*Stratiotes aloides*) bij verschuivende klassen van sulfaatconcentraties gedurende het groeiseizoen in 207 peilvakken in de Noord-Hollandse Vechtstreek (gegevens Waternet). Voor de peilvakken met en zonder planten wordt ook steeds de boven en onder 19%-percentiel sulfaatconcentratie gegeven. De frequentieverdelingen met en zonder waterplant zijn in alle drie de gevallen significant verschillend (χ^2 , $P < 0.001$).

Figure 4 frequency distributions of tolerant *Potamogeton pectinatus*, four sensitive species of *Potamogeton* and *Stratiotes aloides* against summer sulfate concentration in the same water body.



faat bij het inlaten van boezemwater in een veenpolder tijdens droge zomers lijkt niet gefundeerd. De afweging wel of niet meer water inlaten zou vooral gemaakt moeten worden op basis van interne en externe belasting met sulfaat, maar ook met fosfaat en chloride.

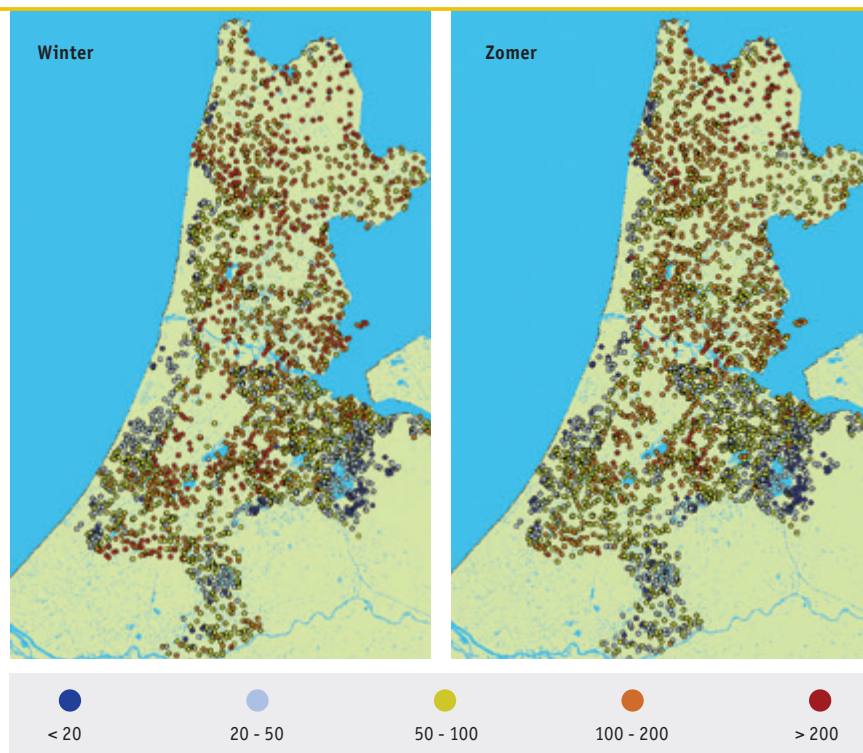
Op polderniveau is het aannemelijk dat er in de toekomst meer water ingelaten moet worden om de huidige grond- en oppervlaktewaterpeilen te handhaven. Een aantal modelstudies laat zien dat aanzienlijke effecten

van klimaatverandering op de watervoorraad in peilgestuurde poldersystemen te verwachten zijn (Tauw, 2007; Immerzeel et al., 2009; Hellmann & Vermaat, 2011). De benodigde hoeveelheid inlaatwater neemt met 50 tot 100% toe als de KNMI klimaatscenario's (Van den Hurk et al., 2006) worden doorgerekend. Afhankelijk van de aard van het inlaatwater zal hiermee ook de externe sulfaatbelasting toenemen. Is het dan verstandiger het peil te laten zakken? Als gedachteoefening hebben we voor de Krimpenerwaard (figuur 2, tabel 1) de twee extremen doorgerekend: een toename van het inlaatwater met 100% of een grondwaterdaling met 30 cm (modeluitkomst klimaatscenario W+ in Hellmann & Vermaat, 2011). Twee keer zoveel inlaatwater betekent ongeveer een verdubbeling van de sulfaatvracht naar de polder, van 93 naar 183 kg SO₄ ha⁻¹ j⁻¹. De grondwaterdaling met 30 cm zal zorgen voor een extra bodemdaling van 5 mm door veenoxidatie. En dat komt neer op een verhoging van de interne sulfaatbelasting van 273 naar 543 kg SO₄ ha⁻¹ j⁻¹. In dit geval is extra inlaatwater dus duidelijk te prefereren: het levert het minste extra sulfaat op en voorkomt ook andere gevolgen van bodemdaling. Deze schatting wordt ondersteund door recent uitgevoerde modelberekeningen (Hendriks & Van den Akker, 2012). De effecten van het continu uit de veenbodem vrijkomende sulfaat zijn complex en locatieafhankelijk. Bij ophoping in de onderwaterbodem kan de binding van fosfaat aan ijzer teniet worden gedaan omdat sulfide ijzer sterker bindt. Dit kan voor nalevering van fosfaat uit de bodem zorgen en daarmee leiden tot eutrofiëring met kroosdekken in sloten en blauwalgenbloei in veenplassen. Dit treedt op bij onderwaterbodems met een molaire Fe/S ratio onder de 1. Zulke lage ijzergehalten komen algemeen voor in het laagveengebied: 82% van de 583 door B-WARE onderzochte onderwaterbodems met een organische stofgehalte van ten minste 50%. De

hoge sulfaatbeschikbaarheid in veel veenwateren heeft waarschijnlijk verarmende gevolgen voor de vegetatie en de bijbehorende levensgemeenschap gezien het verminderde voorkomen van krabbenscheer en gevoelige fonteinkruidsoorten bij hogere sulfaatconcentraties. We kunnen echter geen simpele een-op-een relaties veronderstellen vanwege de complexiteit van de covariërende waterkwaliteitsparameters.

Een oplossing, die zowel de klink als de levering van sulfaat zou verminderen, moet gezocht worden in het peilbeheer. Elke decimeter minder drooglegging betekent ongeveer 2 mm j^{-1} minder maaiveldaling en een vermindering van de vorming van sulfaat van $192 \text{ kg sulfaat ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$. Voor natuurgebieden is dit een mogelijkheid, maar boeren in het veen wordt dan moeilijk. Opzetten van het peil in de sloten alleen is niet voldoende. De grondwaterstand in het midden van een perceel moet ook hoog blijven. De zorg bestaat dat drogere zomers (zoals in 2003) de maaiveldaling zullen versterken, en dan vooral in het midden van de percelen. Toepassing van onderwaterdrains lijkt een optie om de oxidatie van veen midden op de percelen te beperken (Hendriks & Van den Akker, 2012).

Samengevat kan worden gesteld dat in laagveengebieden de veenbodem zelf de belangrijkste bron is van een hoge sulfaatbelasting met negatieve effecten op de waterkwaliteit, zoals blijkt uit het voorkomen van waterplanten. Er wordt meer sulfaat gevormd bij een lagere grondwaterspiegel gekoppeld aan een lager slootpeil. Peilverlaging ten bate van een rendabele agrarische bedrijfsvoering is tot nu toe steeds het antwoord geweest op de voortgaande maaiveldaling. Veenpolders worden daardoor echter steeds dieper, de natuurlijke bodemvruchtbaarheid van het veen gaat verloren, en het waterkwantiteits- en kwaliteitsbeheer wordt steeds complexer, zoals we hier voor sulfaat laten zien. Het is dus



een belangrijke technische en bestuurlijke uitdaging om vermindering van de maaiveldaling op grote schaal te realiseren.

Dankwoord

We zijn onze collega's erkentelijk voor hun bijdrage aan het debat in de deskundigenworkshop: Bart Specken (Waternet), Bruce Michielsens (Hoogheemraadschap Rijnland), Jan van den Akker, Rob Hendriks (beiden Alterra), Wim Twisk (Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard), Gert van Ee en Ben Eenkhoorn (Hoogheemraadschap Noord-Hollands Noorderkwartier), Nicko Straathof (Natuurmonumenten), Jan Kuiper (NIOO), en Sebastiaan Schep (Witteveen en Bos).

Figuur 5 gemiddelde sulfaatconcentratie in groeiseizoen en niet-groeiseizoen in $\text{mg SO}_4 \text{ l}^{-1}$. Gegevens van Rijnland, Krimpenerwaard, Waternet en Noordhollands Noorderkwartier.

Figure 5 mean growing season and non-growing season sulfate concentration in sampling stations provided by several waterboards.

Summary

Sulfate dynamics in lowland peat polders in the Netherlands

Jan Vermaat, Joop Harmsen, Fritz Hellmann, Harm van der Geest, Jeroen de Klein, Sarian Kosten, Fons Smolders, Jos Verhoeven, Ron Mes & Maarten Ouboter

soil subsidence, sulfate, water quality, mineralization, toxicity

Annual sulfate mass balances have been constructed for low-lying peat polders in the Netherlands. These peat polders are generally used for dairy farming or nature conservation, and can have large areas of shallow ditches and ponds (mean 16%, range 6-43%). As a consequence of continuous drainage, the peat (organic matter and sulfides) in these polders mineralizes and the soil subsides at rates between 2 and 10 mm y^{-1} . This mineral-

ization is generally the most important internal source of sulfate, providing some 96 kg $SO_4 ha^{-1} mm^{-1}$ subsidence y^{-1} . During summer, when evapotranspiration exceeds rainfall, sulfate accumulates in the unsaturated zone, to be washed away and drained off during the wet autumn and winter. In some polders, upward seepage of early Holocene, brackish water can be a source of sulfate. Aquatic sediments are an important temporary sulfate sink, which is emptied every 6 to 10 years when the ditches are dredged and these sediments are put back on the fields. External sources are precipitation and water supplied during summer to compensate for water shortage, but these are minor compared to internal release. Peat polders export sulfate to the regional water system and the sea during winter drainage. Most surface waters have high sulfate concentrations; 76% exceed a threshold of 0.3-0.5 mmol $SO_4 l^{-1}$ which may lead to impoverished aquatic communities.

Literatuur

Akker, J.J.H. van den, R.F.A. Hendriks & J.R. Mulder, 2007. Invloed van infiltratiewater via onderwaterdrains op de afbraak van veengrond : helpdeskvraag D2057 Onderwaterdrains. Wageningen. Alterra-rapport 1597.

BLGG, 2010. Voorbeeldadvisering bemesting. www.blgg.nl

Bloemendaal, F.H.J.L. & J.G.M. Roelofs, 1988. Waterplanten en waterkwaliteit. KNNV Natuurhistorische Bibliotheek nr 54, 189 pp.

Borger, G.J., 1992. Draining-digging-dredging; the creation of a new landscape in the peat areas of the low countries. In: J.T.A. Verhoeven (ed.). Fens and bogs in the Netherlands: vegetation, history, nutrient dynamics and conservation. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.

Buijsman, E., J.M.M. Aben, J.P. Hetteling, A. van Hinsberg, R.B.A. Koelemeijer & R.J.M. Maas, 2010. Zure regen, een analyse van dertig jaar verzuringsproblematiek in Nederland. Bilthoven. PBL publicatie 500093007.

Dam, H. van, 2009. Evaluatie basismetnet waterkwaliteit Hollands Noorderkwartier Trendanalyse hydrobiologie, temperatuur en waterchemie 1982-2007. AWN rapport 708, Amsterdam.

Hellmann, F. & J.E. Vermaat, 2012. Impact of climate change on water management in Dutch peat meadows. Ecological Modelling 240, 74-83.

Hendriks, R.F.A. & J.J.H. van den Akker, 2012. Effecten van onderwaterdrains op de waterkwaliteit in veenweiden. Wageningen. Alterra-rapport 2354.

Hendriks, R.F.A. & L.P.A. van Gerven, 2011. Nadere beschrijving van de analyse van processen van 'interne eutrofiëring'. In: L.P.A. van Gerven, B. van der Grift, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder & T.P. van Tol-Leenders (reds.). Nutriëntenhuishouding in de bodem en het oppervlaktewater van de Krimpenerwaard. Bronnen, routes en sturingsmogelijkheden. Alterra rapport 2220.

Hoogheemraadschap Rijnland, 2003. Waterbeheer in Rijnland 2002. Leiden, ISSN 1567-698.

Huinink, J., 2001. Neerslag, verdamping en neerslagoverschotten. Regionale verschillen binnen Nederland. Ede. Rapport Informatie- en Kenniscentrum Landbouw, vierde druk.

Hurk, B.J.J.M. van den, A.M.G. Klein Tank, G. Lenderink, A.P. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, C.A. Katsman, H.W. van den Brink, F.

- Immerzeel, W.W., C.C. van Heerwaarden & P. Droogers, 2009.** Modelling climate change in a Dutch polder system using the FutureViewR modelling suite. *Computers & Geosciences* 35, 446–458.
- Jansen, P.C., R.H. Hendriks & C. Kwakernaak, 2009.** Behoud van veenbodems door ander peilbeheer; Maatregelen voor een robuuste inrichting van het westelijk veenweidegebied. Wageningen. Alterra-Rapport 2009.
- Keller, J.J.F. Bessembinder, G. Burgers, G.J. Komen, W. Hazeleger & S.S. Drijfhout, 2006.** KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR 2006-012006, De Bilt, The Netherlands.
- Lamers, L.P.M., H.B.M. Tomassen & J.G.M. Roelofs, 1998.** Sulfate-induced eutrophication and phytotoxicity in freshwater wetlands. *Environmental Science & Technology* 32, 199–205.
- Post, V., E. Bloem, K. Ooteman, E. Slob, K. Groen & M. Groen, 2002.** The use of CVES to map the subsurface salinity distribution: a case study from the Netherlands. Delft. 17th Salt Water Intrusion Meeting.
- Schothorst, C.J., 1977.** Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands. *Geoderma* 17, 265–291.
- Smolders, A.J.P., L.P.M. Lamers, C. den Hartog & J.G.M. Roelofs, 2003.** Mechanisms involved in the decline of *Stratiotes aloides* L. in the Netherlands: sulphate as a key variable. *Hydrobiologia* 506/509, 603–610.
- Smolders, A.J.P., L.P.M. Lamers, E.C.H.E.T. Lucassen & J.G.M. Roelofs, 2006.** Internal eutrophication: How it works and what to do about it, a review. *Chemical Ecology* 22, 93–111.
- Smolders, A.J.P., T. van den Broek, E.C.H.E.T. Lucassen, M. van der Welle & W.J. Zaadnoordijk, 2011.** Monitoring proefsloten Lopikerwaard. B-WARE rapport 2011.30.
- Specken, B. & J. de Groot, 2010.** Trends in waterkwaliteit in het beheersgebied van Amstel, Gooi en Vecht. *H2O* 43(4), 19–22.
- Tauw, 2007.** Effecten van klimaatverandering op het grondwatersysteem in de provincie Utrecht. Utrecht, juni 2007, 68 p.
- Twisk, W., 2010.** Interne eutrofiëring binnen Schieland en de Krimpenerwaard: verkennend onderzoek naar overeenkomsten en verschillen tussen theorie en praktijk. Intern rapport HH Schieland en de Krimpenerwaard.
- Vermaat, J.E. & F. Hellmann, 2010.** Covariance in water- and nutrient budgets of Dutch peat polders: what governs nutrient retention? *Biogeochemistry* 99,109–126.
- Vermaat, J.E., J. Harmsen, F. Hellmann, H. van der Geest, J. de Klein, S. Kosten, F. Smolders & J. Verhoeven, 2012.** Zwaveldynamiek in het West-Nederlandse laagveengebied, met het oog op klimaatverandering. Rapport AE-12/01, Vrije Universiteit Amsterdam. Beschikbaar via: <http://hydrotheek.blogspot.nl/2012/10/zwaveldynamiek-in-veenpolders.html>
- Vermeulen, J. & R.F.A. Hendriks, 1996.** Bepaling van afbraaksnelheden van organische stof in laagveen. Ademhalingsmetingen aan ongestoorde veenmonsters in het laboratorium. Wageningen. DLO-Staring Centrum, rapport 288.
- Vries, W. de, 2008.** Verzuring: oorzaken, effecten, kritische belastingen en monitoring van gevolgen van ingezet beleid. Wageningen. Alterra rapport 1699.