

Zwaveland

Sulfaat als obstakel voor het bereiken van de KRW-doelen

De KRW-doelen dreigen in Nederland niet gehaald te worden. De kwaliteit van ons oppervlaktewater is momenteel matig tot slecht, met als belangrijke oorzaak uitspoeling van nutriënten van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater. Vaak gaat het vooral over de directe belasting, maar er is ook een grote indirecte invloed. Het zijn vooral de biogeochemische processen in de waterbodembodem die de nutriëntenbeschikbaarheid in een watersysteem bepalen. De rol die de zwavelkringloop speelt bij de vaak veel te hoge concentraties van fosfor in ons oppervlaktewater wordt nog steeds onderschat.

De Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) verplicht Nederland ervoor te zorgen dat in 2027 de oppervlaktewateren een goed leefgebied vormen voor de planten en dieren die er thuishoren. Hiervoor zijn (biologische en fysisch-chemische) normen opgesteld, die samen de kwaliteit van het waterlichaam bepalen. Op dit moment wordt de biologische waterkwaliteit in Nederland bijna overal als matig tot slecht beoordeeld (Compendium voor de Leefomgeving, 2022). Waar de biologische kwaliteit op orde is, worden vaak de fysisch-chemische normen niet gehaald, waardoor de ecologische kwaliteit alsnog onvoldoende is. Als het niet lukt om in 2027 de doelen te halen, waar het naar uitziet, dan moeten in dat jaar in ieder geval wel alle benodigde maatregelen zijn getroffen om op termijn de doelen alsnog te kunnen halen. Het is dus twee voor twaalf.

Biogeochemie en waterkwaliteit

Een belangrijke oorzaak voor de matige tot slechte waterkwaliteit is vermisting. Te hoge fosfor- en stikstofconcentraties in het oppervlaktewater worden onder andere veroorzaakt door uit- en afspoeling vanaf landbouwgronden. Hoewel deze 'externe' belasting van het watersysteem een belangrijke rol speelt, zijn het

vooral de biogeochemische processen in de waterbodembodem die de nutriëntenbeschikbaarheid in een watersysteem bepalen (Smolders et al., 2013). De waterbodembodem fungeert hierbij als opslag én doorgeefluik van nutriënten. De 'motor' van deze processen is de hoeveelheid reactief organisch materiaal in de waterbodembodem. Dit is afkomstig van afgestorven resten van algen en waterplanten die binnen het systeem zijn geproduceerd, maar kan ook van buiten komen via bijvoorbeeld aangevoerd slib of afkalving van oevers. In de waterbodembodem wordt reactief organisch materiaal afgebroken door microbiële redoxreacties waarbij koolstof (C), stikstof (N) en fosfor (P) vrijkomen. De mate waarin reactief organisch materiaal afgebroken kan worden is echter afhankelijk van de aanwezigheid van zogenaamde elektronenacceptoren (Smolders et al., 2006; Lamers et al., 2012). Zuurstof is een sterke elektronenacceptor, maar in waterbodems vaak amper aanwezig. Veel waterbodems bevatten van nature relatief veel ijzer en er wordt ook ijzer aangevoerd via af- en uitspoeling van percelen en via grondwater. In de zuurstofloze delen van de onderwaterbodems zijn driewaardig ijzer (Fe^{3+}) en sulfaat (SO_4^{2-}) de meest voorkomende elektronenacceptoren. Driewaardig ijzer is aanwezig in ijzer(III)

eutrofiëring
oppervlaktewater
waterbodembodem
fosfaat
ijzer

A.J.P. (Fons) Smolders
Onderzoekcentrum B-WARE,
Toernooiveld 1, 6525 ED
Nijmegen;
a.smolders@b-ware.eu

Y.J.M. (Yvon) Verstijnen
Onderzoekcentrum B-WARE

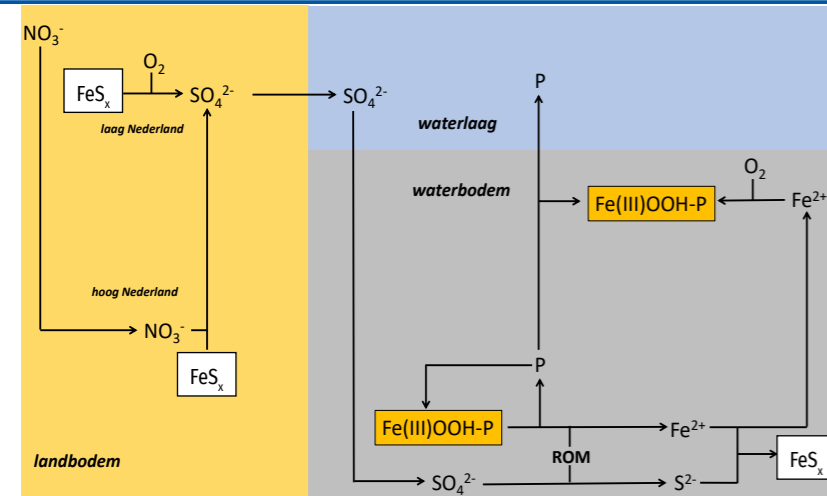
J.M.H. (José) van Diggelen
Onderzoekcentrum B-WARE

M.D.M. (Moni) Poelen
Onderzoekcentrum B-WARE

E.C.H.E.T. (Esther) Lucassen
Onderzoekcentrum B-WARE

G. (Gijs) van Dijk
Onderzoekcentrum B-WARE

Foto **Mark van Veen**. Zuidplaspolder bij Moordrecht: een diepe polder met ouderwetse hooilanden en sloten, ingesloten door steden.



Figuur 1 Schematische weergave van de interacties tussen ijzer (Fe), zwavel (S), nitraat (N) en fosfor (P) in verschillende compartimenten (water, land- en waterbodem) op landschapsschaal. ROM = reactief organisch materiaal.

Figure 1 Schematic representation of the interactions between iron (Fe), sulphur (S), nitrate (N) and phosphorus (P) in different compartments (water, terrestrial and aquatic soil) at the landscape scale. ROM = reactive organic matter.

(hydr)oxides. Bij de afbraak van organisch materiaal in de onderwaterbodem komt tweewaardig ijzer (Fe^{2+}) vrij, alsmede het aan de ijzer(III)hydroxides gebonden fosfor. Tweewaardig ijzer kan boven in de waterbodem, dicht bij de zuurstofhoudende waterlaag, weer worden geoxideerd tot driewaardig ijzer waarbij fosfor kan worden vastgelegd (figuur 1). Hierdoor wordt nalevering van fosfor naar de waterlaag voorkomen, zolang de waterlaag zuurstofhoudend is (Smolders et al., 2006). De ijzercyclus beïnvloedt de beschikbaarheid van fosfor dus op twee manieren: via 1) afbraak van organisch materiaal en de mobilisatie van fosfor en/of 2) de immobilisatie van fosfor aan ijzer.

De beschikbaarheid van sulfaat kan de ijzercyclus echter sterk beïnvloeden. Wanneer de beschikbaarheid van ijzer(III)(hydr)oxides afneemt en het oppervlaktewater of aangevoerde grondwater veel sulfaat bevat, kan sulfaat als alternatieve elektronenacceptor optreden (figuur 1). Sulfaat stimuleert niet alleen de afbraak van organisch materiaal, maar via de interactie met ijzer ook de bindingscapaciteit voor fosfor in de onderwaterbodem. Sulfide (S^{2-}) dat in de waterbodem vrijkomt bij de reductie van sulfaat, bindt namelijk aan ijzer

waarbij slecht oplosbare ijzersulfides (FeS_x , waaronder pyriet) worden gevormd (Smolders & Roelofs, 1993). Wanneer meer sulfaat dan ijzer wordt aangevoerd, is na verloop van tijd het meeste ijzer in de waterbodems vastgelegd in de vorm van FeS_x -verbindingen. Hierdoor kunnen de ijzerconcentraties in het poriewater van de waterbodems zeer sterk afnemen terwijl de fosfaatconcentraties toenemen (figuur 1). Ook de nalevering van fosfaat naar de waterlaag zal hierdoor sterk toenemen. Wanneer er onvoldoende vrij ijzer over blijft om sulfide te binden kan er op termijn ook sulfide ophopen, wat giftig is voor veel waterplanten en bodemorganismen (Lamers et al., 2013). Tegelijkertijd kunnen de lage ijzerconcentraties in het poriewater zorgen voor ijzergebrek in waterplanten (Smolders et al., 2006). Sulfaat kan dus op verschillende manieren (eutrofiëring, sulfidotoxiciteit en ijzergebrek) de groei van waterplanten belemmeren (Smolders et al., 2003).

Bronnen van sulfaat

Een belangrijke sulfaatbron is, behalve mest, de oxidatie van zwavelhoudende (pyriet)lagen in terrestrische bodems. In laag-Nederland gaat het hierbij om zwavelrijke veen- en kleibodems die dicht bij het aardoppervlak liggen. Deze bodems bevatten vaak veel zwavel vanwege de voormalige invloed van de zee (o.a. overstromingen) en door de invloed van brak (sulfaatrijk) grondwater. Door ontwatering wordt de veenbodem blootgesteld aan zuurstof, waardoor het veen oxideert en hierin aanwezig gereduceerd en organisch zwavel wordt omgezet in sulfaat (figuur 1). Sulfaat is zeer mobiel en spoelt gemakkelijk uit naar het oppervlaktewater (Smolders et al., 2013; Vermaat et al., 2013). Dit zien we duidelijk terug in het West-Nederlandse oppervlaktewater. Figuur 2 laat als voorbeeld het verloop in de tijd zien van de sulfaat- en de fosforconcentratie voor de Hoge Boezem van de Overwaard (Alblasserwaard). Hier is sprake van een sterke toename van de sulfaat-

concentraties in de wintermaanden. Het gaat hierbij om sulfaat dat in de zomer door oxidatieprocessen vrijkomt in terrestrische delen en in de winter uitspoelt naar het aangrenzende oppervlaktewater. We zien dat na de droge zomers in de jaren 2018-2020 de sulfaatconcentraties hoger zijn. De grondwaterstanden in de landbodems zakten dieper uit dan de jaren ervoor, waardoor er meer oxidatie plaatsvond met meer sulfaatuitspoeling tot gevolg (Vermaat et al., 2013). In de zomer nemen de sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater juist af, dan vindt sulfaatreductie plaats in de onderwaterbodems en wordt er veel minder aangevoerd via uitspoeling. De fosforconcentraties in het oppervlaktewater nemen in de zomer juist sterk toe omdat de onderwaterbodems, waarin de fosforbeschikbaarheid groot is, dan veel fosfor naleveren. Gevolg is een slechte waterkwaliteit, waarbij vaak algenbloei optreedt (figuur 3).

De oxidatie van pyrietlagen kan ook het gevolg zijn van de uitspoeling van nitraat (NO_3^-) naar het grondwater. Dit proces zien we vooral in de hoger gelegen delen van Nederland, waar in de diepere ondergrond pyrietlagen aanwezig zijn in de vorm van oude mariene afzettingen. Wanneer nitraat, afkomstig van uitspoeling en/of stikstofdepositie, door deze lagen stroomt kan het reageren met het aanwezige pyriet. Daarbij wordt nitraat gereduceerd tot stikstofgas, terwijl zwavel wordt geoxideerd tot sulfaat (figuur 1). Dit proces leidt tot sulfaatrijk grondwater en een verhoogde sulfaatbelasting van kwelgevoede gebieden (Smolders et al., 2010). In de laatste helft van de vorige eeuw zijn de concentraties van nitraat in het ondiepere grondwater sterk toegenomen door bemesting van landbouwpercelen en invang van atmosferische stikstofdepositie door bossen (Di & Cameron; 2002). Sinds het begin van de jaren 1990 is nitraatuitspoeling afgenomen, maar toch liggen de nitraatconcentraties in het ondiepe grondwater vaak nog steeds (ruim) boven de EU-norm van 50 miligram per liter (= 790 $\mu\text{mol/l}$). Door deze hoge

nitraatconcentraties zijn de sulfaatconcentraties in het diepere grondwater in grote delen van Zuid- en Oost-Nederland sterk toegenomen (Smolders et al., 2010; De Mars et al., 2024). Dit sulfaatverrijkte grondwater kan in grondwatergevoede systemen voor eutrofiëring zorgen, zeker wanneer er veel meer sulfaat dan ijzer wordt aangevoerd (Bus et al, 2015).

In het vervolg van het artikel focussen we vooral op laag-Nederland.

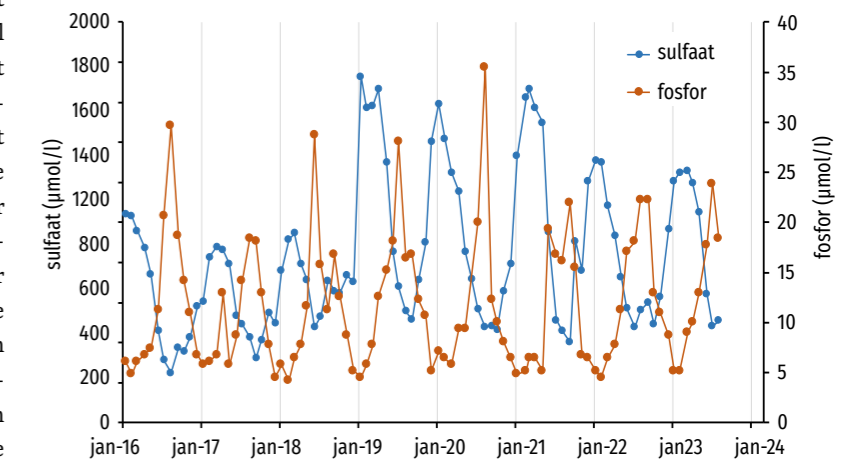
Herstellen van de ijzer/zwavelbalans?

In veel Nederlandse waterbodems zorgt de hoge sulfaatbelasting voor een ongunstige verhouding tussen ijzer en zwavel. Hierdoor neemt ook de ijzer/fosforratio in het poriewater van de waterbodems af (<1; hoge beschikbaarheid van fosfor) (figuur 4). Vaak gaat dit gepaard met een slechte waterkwaliteit.

Het herstellen van de ijzer/zwavelbalans van de waterbodems kan sterk bijdragen aan de verbetering van de waterkwaliteit. De ijzer/zwavelratio kan worden verhoogd door zwavel te verwijderen of ijzer toe te voegen. Zwavel kan uit bodems worden verwijderd door de bodems te laten oxideren. Wanneer waterbodems

Figuur 2 Het verloop van de sulfaat- en fosforconcentraties in het oppervlaktewater van de Hoge Boezem van de Overwaard (Lekdijk, Nieuw-Lekkerland, Alblasserwaard) (data Waterschap Rivierenland).

Figure 2 Sulphate and phosphorus concentrations in the surface water of the Hoge Boezem van de Overwaard (Lekdijk, Nieuw-Lekkerland, Alblasserwaard) (data Rivierenland Water Board).

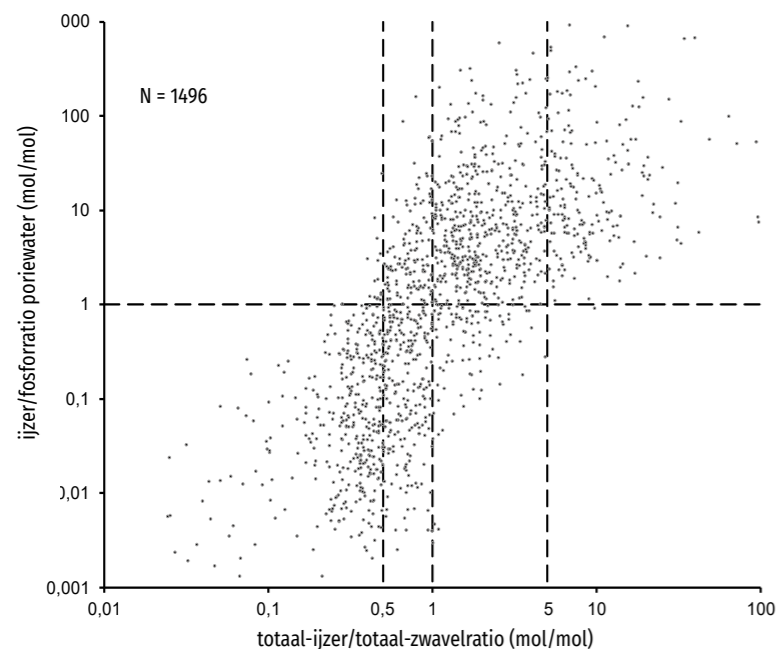


Figuur 3 Eutrofe sloot in de Lopikerwaard. Foto: Esther Lucassen

Figure 3 Eutrophic ditch in the Lopikerwaard area. Photo: Esther Lucassen

Figuur 4 Relatie tussen de totaal-ijzer/totaal-zwavelratio in waterbodems en de ijzer/fosforratio in het poriewater (data Onderzoekcentrum B-WARE).

Figure 4 Relationship between the total-iron/total-sulphur ratio in water bottoms and the iron/phosphorus ratio in the pore water (data B-WARE Research Centre).



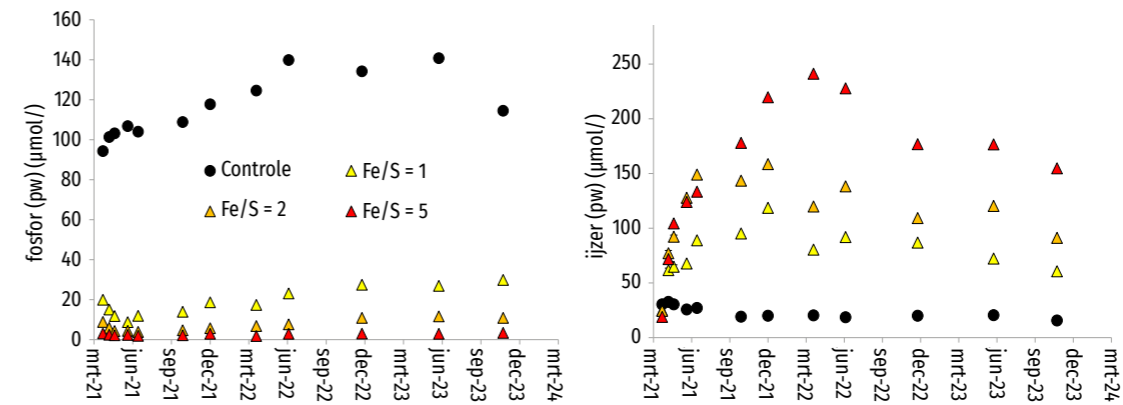
droogvallen komt er zuurstof in de bodem waarbij gereduceerd zwavel wordt geoxideerd tot sulfaat en het hieraan gebonden gereduceerd ijzer wordt geoxideerd tot ijzer(III)(hydr)oxide. Na vernatting kan het sulfaat worden afgevoerd door het systeem door te spoelen. Omdat het geoxideerde ijzer achterblijft neemt de ijzer/zwavelratio toe en verbetert de fosfaatbinding (Lucassen et al., 2005). Deze oxidatie van waterbodems is echter niet eenvoudig te realiseren en heeft als nadeel dat ook de omringende landbodems sterker verdrogen, wat weer kan leiden tot extra sulfaatuitspoeling. Bovendien kan het vrijkomende sulfaat natuurlijk elders voor een verslechtering zorgen.

Een andere manier om de ijzer/zwavelratio te verhogen is door de ijzergehalten van waterbodems te verhogen, bijvoorbeeld door het toedienen van ijzerchloride. Ijzer oxideert dan in de waterlaag waarna het uitzakt tot op de waterbodem. Nadeel is dat het lang



duurt voordat er voldoende ijzer is toegediend voor een significant effect. Hetzelfde geldt voor het injecteren van opgelost ijzerchloride in de bodem (Smolders et al., 1995). Daarbij zijn de positieve resultaten vaak maar van korte duur (Smolders et al., 1995; Münch et al., 2024). Een interessant alternatief is het toedienen van zogenoemd waterijzer: een restproduct van de drinkwaterwinning, bestaande uit een suspensie van ijzer(III)(hydr)oxide die vrijkomt bij de ontijzering van grondwater en coagulatie van oppervlaktewater. Hierbij kan in korte tijd een relatief grote hoeveelheid ijzer in de bodem worden gebracht.

In 2021 heeft Onderzoekcentrum B-WARE labexperimenten uitgevoerd met waterbodems uit Polder Westveen, Bodegraven-Noord en de Pot (Verstijnen et al., 2022). In deze gebieden zijn slib en waterbodemmonsters verzameld met een lage totaal-ijzer/totaal-zwavelratio (<1 mol/mol), waar waterijzer doorheen is gemengd van de drinkwaterproductielocatie in Andijk. Hierbij is voor elke waterbodem berekend hoeveel ijzer moest worden toegevoegd om de totaal-ijzer/totaal-zwavelratio te verhogen tot respectievelijk 1, 2 en 5 (mol/mol) (Verstijnen et al., 2022). Het mengen van waterijzer door het slib leidde tot een zeer sterke verlaging van de fosforconcentraties en tot een toename van de ijzerconcentraties in het poriewater van de wa-



terbodems (figuur 5). De fosforconcentraties van het poriewater namen na een jaar wel weer heel geleidelijk toe, wanneer de ijzer/zwavelratio (mol/mol) werd verhoogd tot 1 of 2 (figuur 5). Bij een ijzer/zwavelratio van 5 bleef de fosforconcentratie tot meer dan twee jaar na toediening zeer laag. De ijzer/fosforratio in het poriewater bleef in alle behandelingen gunstig ($>>1$ mol/mol). Dit in tegenstelling tot de controle waarin deze veel lager bleef dan 1 mol/mol. Verder lieten aanvullende experimenten in de kas zien dat het innemen van waterijzer leidde tot een afname van de nalevering van fosfor naar de waterlaag, het uitblijven van algenbloei en een veel betere groei van aangebrachte ondergedoken waterplanten (Verstijnen et al., 2022).

Uit dit onderzoek blijkt dat de suppletie van waterijzer de beschikbaarheid van fosfor sterk kan verlagen. Omdat de fosfaatbinding aan ijzer(III)(hydr)oxides redoxgevoelig is kan het gebonden fosfaat onder anaerobe omstandigheden echter weer geleidelijk vrijkomen (Smolders et al., 2006). Dit risico is lager naarmate er meer waterijzer wordt toegediend, omdat fosfaat dat vrijkomt bij de reductie van ijzer dan weer kan worden gebonden aan nog niet gereduceerde ijzer(III)(hydr)oxides. Bij een sterke overmaat aan ijzer kunnen op termijn ook tweewaardige ijzerfosforverbindingen zoals

vivianiet worden gevormd (Münch et al., 2024). Deze verbindingen zijn onder anaerobe omstandigheden stabiel en kunnen zorgen voor een langdurige immobilisatie van fosfor.

Dichtdraaien van de sulfaatkraan

Hoewel we in Nederland bij het effect van de landbouw op de waterkwaliteit vaak denken aan de directe uitspoeling van voedingsstoffen naar het oppervlaktewater, is er ook een grote indirecte invloed via mobilisatie van sulfaat als gevolg van oxidatieprocessen. In een groot deel van onze oppervlaktewateren draagt een hoge sulfaatbelasting sterk bij aan een slechte waterkwaliteit. Maatregelen als suppletie van waterijzer kunnen slechts op een beperkte schaal worden toegepast en zijn bovendien een vorm van dweilen met de kraan open. Om de waterkwaliteit te verbeteren zullen we ook iets aan de uitspoeling van sulfaat moeten doen door de mobilisatie van zwavel in percelen te beperken. Voor laag-Nederland geldt dat we de oxidatie van ondiepe zwavelhoudende veen- en kleibodems moeten verminderen. Dit is een uitdaging, omdat dit alleen mogelijk is met maatregelen die het uitzakken van grondwaterstanden in de zomer sterk verminderen. Dat maakt het voortzetten van de huidige vorm van

Figuur 5 Het verloop van de gemiddelde fosfor- en ijzerconcentraties in het poriewater van de waterbodems uit Polder Westveen waaraan verschillende hoeveelheden waterijzer zijn toegevoegd. Aan de controle is geen waterijzer toegevoegd.

Figure 5 The course of average phosphorus and iron concentrations in the pore water of soils from Polder Westveen to which different amounts of iron(hydr)oxides had been added. Controls were without additions.

landbouw lastig zonder bijvoorbeeld de aanleg van kostbare drukdrainagesystemen, die bovendien een hoge watervraag kennen (Smolders et al., 2019). Een andere optie is het kiezen voor alternatieve vormen van landbouw, waarbij wordt overgegaan op natte teelten. Momenteel wordt er in Nederland al geëxperimenteerd met o.a. lisdodde en veenmos (Smolders et al., 2019).

In veenbodems zorgen maatregelen die leiden tot een verminderde oxidatie en sulfaatmobilisatie niet alleen voor een verbetering van de waterkwaliteit, maar ook voor een sterke afname van de broeikasgasemissies en voor minder bodemdaling (Smolders et al., 2019; Van Dijk et al., dit nummer). Het mes snijdt hier dus aan drie kanten.

Voor grondwatergevoede systemen in de hoger gelegen delen van Nederland is voor een afname van de sulfaatmobilisatie een verdere afname van de nitraatuitspoeling vereist (Smolders et al., 2010). Ook dit is geen eenvoudige opgave.

Summary

Sulphurland. Sulphate as an obstacle to achieving the WFD goals

Fons Smolders, Yvon Verstijnen, José van Diggelen, Moni Poelen, Esther Lucassen en Gijs van Dijk

eutrophication, surface water, phosphate, iron, aquatic sediment

In the Netherlands deep as well as shallow soils can be rich in sulphur which can lead to a strong mobilisation of sulphate. Sulfate not only stimulates the decomposition of organic matter, but via its interaction with iron, it also affects the binding capacity for phosphorus in underwater soils. In many Dutch underwater soils high sulfate loads result in an unfavourable ratio of iron to sulphur. As a result, the ratio of iron to phosphorus in the pore water of the soils decreases. In order to meet WFD standards in the future, it will not be enough just to reduce nutrient leaching and run-off. Much more attention will have

Integrale aanpak

Om in de toekomst aan KRW-normen te kunnen voldoen, is het beperken van de uit- en afspoeling van nutriënten niet voldoende. Er zal veel meer aandacht moeten komen voor de effecten van een hoge sulfaatbelasting op de beschikbaarheid van fosfor in onze watersystemen. Deze 'sulfaatproblematiek' wordt veroorzaakt door keuzes die we hebben gemaakt voor ons landgebruik en heeft dus een belangrijke landschapelijke context. Het oplossen van deze problematiek hangt nauw samen met de aanpak van andere grote uitdagingen zoals klimaatverandering, bodemdaling en de stikstofproblematiek. Een integrale visie en aanpak van deze problemen is dan ook dringend gewenst. Veelbelovende technische maatregelen, zoals suppletie van waterijzer, kunnen slechts in beperkte mate bijdragen. De sleutel tot de oplossing ligt vooral in het aanpassen van ons landgebruik en kent dus ook een belangrijke sociaaleconomische component.

to be paid to the effects of high sulphate loads on phosphorus availability in aquatic systems. Restoring the iron/sulphur balance of water bottoms can contribute greatly to improving water quality. However, this is not straightforward. We need to reduce the oxidation of shallow terrestrial peat and clay soils. This is a challenge because we can only achieve this by taking measures that greatly reduce the decrease of groundwater levels in summer. Promising technical measures, such as water iron replenishment, can only contribute to a limited extent.

Literatuur

Bus, S., Van Dijk, G., Smolders, A. & Straathof N. (2015). De Kathager Beemden geohydrologisch onder de loep. *Natuurhistorisch Maandblad*. 104(2), 33-38.

Compendium voor de Leefomgeving (2022). Waterkwaliteit KRW, 2022. Geraadpleegd mei 2024, van <https://www.clo.nl/indicatoren/nl143809-wa-terkwaliteit-krw-2022>

De Mars, H., Van Dijk, G., Van der Weijden, B., Grootjans, A.P., Wolejko, L., Farr, G., ... Smolders, A.J.P. (2024). The threat of groundwater pollution for petrifying springs: defining nutrient threshold values for an endangered bryophyte dominated habitat. *Environmental Pollution* 344, 123324.

Di, H.J. & Cameron, K.C. (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 64 (3), 237-256.

Lamers, L.P.M., Van Diggelen, J.M.H., Op den Camp, H.J.M., Visser, E.J.W., Lucassen, E.C.H.E.T., Vile, M.A., ... Roelofs, J.G.M. (2012). Microbial transformations of nitrogen, sulfur and iron dictate vegetation composition in wetlands: a review. *Frontiers in Microbiology* 3, 156.

Lamers, L.P.M., Goverts, L.L., Janssen, I.C.J.M., Geurts, J.J.M., Van der Welle, M.E.W., Van Katwijk, M.M., ... Smolders, A.J.P. (2013). Sulfide as a soil phytotoxin - a review. *Frontiers in Plant Physiology* 4, 268.

Lucassen, E.C.H.E.T., Smolders, A.J.P. & Roelofs, J.G.M. (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.

Münch, M.A., Van Kaam, R., As, K., Peiffer, S., Ter Heerdt, G., Slomp, C.P. & Behrends, T. (2024). Impact of iron addition on phosphorus dynamics in sediments of a shallow peat lake 10 years after treatment. *Water Research* 248, 120844.

Smolders, A.J.P. & Roelofs, J.G.M. (1993). Sulphate mediated iron limitation and eutrophication in aquatic ecosystems. *Aquatic Botany* 46, 247-253.

Smolders, A.J.P., Nijboer, R.C. & Roelofs, J.G.M. (1995). Prevention of sulphide accumulation and phosphate mobilization by the addition of iron(II) chloride to a reduced sediment: an enclosure experiment. *Freshwater Biology* 34, 559-568.

Smolders, A.J.P., Lamers, L.P.M., Den Hartog, C. & Roelofs, J.G.M. (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., Lamers, L.P.M., Lucassen, E.C.H.E.T., Van der Velde, G. & Roelofs, J.G.M. (2006). Internal eutrophication: 'How it works and what to do about it', a review. *Chemistry and Ecology* 22, 93-111.

Smolders A., J.P., Lucassen, E.C.H.E.T., Bobbink, R., Roelofs, J.G.M. & Lamers, L.P.M. (2010). How nitrate leaching from agricultural lands provokes phosphate eutrophication in groundwater fed wetlands: the sulphur bridge. *Biogeochemistry* 98, 1-7.

Smolders, A.J.P., Van Diggelen, J.H.M., Geurts, J.J.M., Poelen, M.D.M., Roelofs, J.G.M., Lucassen, E.C.H.E.T. & Lamers, L.P.M. (2013). Waterkwaliteit in het veenweidegebied: de complexe interacties tussen oever, waterbodembodem en oppervlaktewater. *Landschap* 30(3), 145-153.

Smolders, A.J.P., Van Riet, B., Van Diggelen, J., Van Dijk, G., Geurts, J. & Lamers, L. (2019). De toekomst van ons veenweidelandschap: over vernatten, op-toppen en veenmosteelt. *Landschap* 36(3), 133-141.

Vermaat, J., Harmsen, J., Hellman, F., Van der Geest, H., De Klein, J., Kosten, S. & Ouboter M. (2013). Sulfaatbronnen in het Hollandse veenlandschap. *Landschap* 30(1), 5-13.

Verstijnen, Y., Tomassen, H., Van den Broek, T. & Smolders, A. (2022). *Effecten van de additie van waterijzer in polder Westveen*. Onderzoekcentrum B-WARE. Rapport RP-20.128.22.75.