Beoordeling sulfaatproblematiek Lemselermaten

NOTITIE
28 DECEMBER 2021

Prof. Dr. R. van Diggelen
Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer
Universiteit Antwerpen
Universiteitsplein 1-C
B-2610 Wilrijk België

Universiteit Antwerpen

ECOSYSTEM MANAGEMENT RESEARCH GROUP

Aanleiding en problematiek

In het kader van de uitwerking van maatregelen voor het Natura 2000 gebied *De Lemselermaten* zijn een tweetal expertenadviezen[1,2] opgesteld om vragen te beantwoorden over de effecten van toestroming van grondwater met een verhoogde sulfaatconcentratie op de aanwezige beschermde habitattypen. De Lemselermaten zijn van groot belang door het voorkomen van de ook internationaal ernstig bedreigde habitattypen H6410 *Blauwgraslanden*, H7230 *Kalkmoerassen* en H91E0C *Vochtige alluviale bossen* (beekbegeleidende bossen) en zijn 'one of the three most important sites for the habitat type Alkaline fens (7230; subtype Junco-Molinion)' (https://natura2000.eea.europa.eu/Natura2000/SDF.aspx?site=NL2003027#4).

Deze habitats hebben hoge tot zeer hoge grondwaterstanden nodig gedurende het hele jaar, met daarnaast zowel nutriëntenarme als ook basen- of kalkrijke condities in de wortelzone. In de Lemselermaten worden deze standplaatscondities op peil gehouden door opkwellend basenrijk grondwater. Recent ecologisch en hydrologisch onderzoek heeft echter laten zien dat op dit moment zowel de waterstanden als ook de kwaliteit van het grondwater niet aan de vereiste voorwaarden voldoen. Zeker in de zomer zakken de grondwaterstanden te diep uit (Bor et al. 2019) waardoor zuurstof uit de lucht in de bodem kan indringen en het veen door oxidatie kan afbreken. Daarnaast heeft het toestromende grondwater een verhoogde concentratie aan sulfaat, direct en indirect het gevolg van mestuitspoeling in het landbouwkundig gebruikte deel van het infiltratiegebied (Roelofs 2019; Aggenbach 2021a). Door een aantal, deels gekoppelde, processen kan sulfaatrijk grondwater sterk negatieve effecten hebben op de genoemde habitattypen (Zak et al. 2021): a) anaerobe oxidatie van organische stof leidt zowel tot afbraak van de veenbodem onder de waterspiegel als tot het ontstaan van toxisch sulfide; b) verdringing van aan ijzer geadsorbeerd fosfor door het bij a) gevormde sulfide waardoor eutrofiëring van de standplaats plaatsvindt; c) oxidatie van bij a) en b) gevormde ijzersulfiden in perioden met lage waterstanden hetgeen leidt tot zuurvorming met als gevolg verzuring van de standplaatsen.

Beide hiervoor genoemde expertenadviezen komen tot een verschillende beoordeling van de mate van bedreiging van het toestromende sulfaathoudende grondwater op de genoemde habitatypes. Derhalve is aan de Universiteit Antwerpen als niet bij dit project betrokken instelling gevraagd beide expertenadviezen door te lichten en te beoordelen. De voorliggende beoordeling is opgesteld op basis van bestudering van de hiervoor genoemde expertadviezen, onderzoeksrapporten over de Lemselermaten, resultaten uit de wetenschappelijke literatuur, eigen inschattingen en een online gesprek met Boukes en Aggenbach[3]

Grondslag van dit advies

Uit het gesprek met Boukes bleek dat er onduidelijkheid bestaat over de degelijkheid van de onderbouwing van de voorliggende beoordeling als ook over de mate van noodzaak voor aanvullend onderzoek. Een korte verduidelijking is daarmee op zijn plaats.

[1] Boukes, H., 19 september 2021. Bevindingen sulfaatproblematiek Lemselermaten Notitie Adviesbureau Harry Boukes, 5 pag.

[2] Aggenbach, C.J.S., 8 september 2021. Expertadvies sulfaatproblematiek Natura 2000 gebied Lemselermaten. Rapport KWR 2021.067. 24 pag.

[3] Verslag 'Overleg bespreken sulfaatadvies Lemselermaten Van Diggelen' d.d. 22-12-2021, notulen van Miriam Leferink

Externe beoordelingen zijn gebaseerd op een interpretatie van beschikbare data en uitgevoerd onderzoek met behulp van de op dat moment beschikbare wetenschappelijke kennis. Dat geldt ook voor de huidige beoordeling. Buiten kijf staat dat additioneel onderzoek meer detail aan het licht zou kunnen brengen dan op dit moment beschikbaar is. Beleidsmatig is echter een andere vraag relevant. Waar het om gaat is of de toegevoegde waarde van nieuw onderzoek dermate groot is dat een aanzienlijke investering gerechtvaardigd is of dat de betreffende beleidsvraag ook met de bestaande data en kennis beantwoord kan worden. Mijns insziens is dat laatste hier het geval. Een analyse van de bestaande wetenschappelijke literatuur in combinatie met de berekeningen van Aggenbach verschaffen zoveel inzicht in het systeem dat het uiterst onwaarschijnlijk is dat onderstaande vragen anders beantwoord zouden worden wanneer er (nog) meer detaildata beschikbaar zouden zijn. Wel maakt dat een betere monitoring van de effecten van maatregelen mogelijk.

Vragen

1. Is bij de Lemselermaten sprake van een negatief effect op de aangewezen habitats als gevolg van de toestroom van sulfaat uit de 30-jaarszone?
2. Is het juist dat dit effect wordt opgeheven op basis van voldoende doorstroming door de habitats na uitvoering van de hydrologische maatregelen?
3. Is het, indien het effect is aangetoond en de doorstroming dit niet opheft, verantwoord om als experimentele maatregel in de 30-jaarszone een evenwichtsbemesting in te stellen òf is het noodzakelijk deze volledig bemestingsvrij te maken?

Samenvattend oordeel:

1. *Sulfaatrijk grondwater vormt een groot risico voor de te beschermen habitattypen.*
2. *Vergroten van de kwelflux en de daaraan gekoppelde doorstromsnelheid alleen lost de sulfaatproblematiek niet op. Ook het sulfaatgehalte van het grondwater moet worden verlaagd.*
3. *Een landgebruik, waarbij niet wordt bemest, is voor de kwetsbare habitats de meest duurzame oplossing. Evenwichtsbemesting kan de uitspoeling van meststoffen en sulfaat naar het grondwater in theorie ook verminderen maar dit vereist een zeer strak gedoseerde en gecontroleerde mestgift. De toepassing is technisch complex en zeer kwetsbaar voor weersfluctuaties. Deze maatregel wordt daarom niet aangeraden.*

Motivering van de beoordeling

1. *Is bij de Lemselermaten sprake van een negatief effect op de aangewezen habitats als gevolg van de toestroom van sulfaat uit de 30-jaarszone?*

Deze vraag wordt opgesplitst in een aantal deelvragen:

a. *In hoeverre is het waarschijnlijk dat er sprake is van significante veenafbraak bij toestroming van met sulfaat verrijkt grondwater?*

De reden voor deze deelvraag is een discussie tussen Boukes en Aggenbach waarbij Boukes oorspronkelijk uitging van een beduidend hogere bulkdichtheid en veel lagere kwelfluxen dan

Aggenbach. De konsekwentie van de aannames van Boukes was dat de berekende toestroom van reactief sulfaat tamelijk laag wordt ingeschat en de hoeveelheid afgebroken veen slechts beperkt is. Bovendien stelt hij dat er in het Elzenbroekbos ook veen gevormd wordt en dat dit de afbraak meer dan compenseert.

Tijdens het reeds genoemde overleg bleek dat Boukes het bij nader inzien eens is met de door Aggenbach gebruikte waarden voor de aanvoer van sulfaat maar niet met de mate waarin sulfaat wordt gereduceerd. De discussie over het effect van sulfaat vervalt daarmee en wordt vervangen door een discussie over de mate waarin dit optreedt. Boukes acht sulfaatreductie en bijbehorende veenafbraak kwantitatief weinig relevant omdat dit in zijn ogen een traag proces is. De berekeningen van Aggenbach -waarbij wordt uitgegaan van 100% reductie van het toegestroomde sulfaat- acht hij dan ook onrealistisch.

Enig zoekwerk in de internationale wetenschappelijke literatuur laat echter zien dat sulfaatreductie in veengebieden wel degelijk snel kan gaan. Schotse onderzoekers (Chapman & Davidson 2001) kwantificeerden sulfaatreductie in veenbodems en vonden voor natte bodems waardes tussen 1.2 en 12000 µg S/dag per kg vers (nat) veen met een gemiddelde van ruim 2800 µg[4]. Enig rekenwerk[5] laat zien dat dit betekent dat er op jaarbasis ruim 300 g sulfaat per m^2 per veenlaag van 10 cm kan worden gereduceerd. Voor een veenlaag van 50 cm dus 1500 g. Een vergelijking met de in de modelberekeningen van Aggenbach gebruikte uitersten voor sulfaataanvoer van 35 tot 250 g per m^2 (NB. Dit impliceert een aanvoer van 350 tot 2500 kg sulfaat per ha per jaar!) laat zien dat de berekende aanvoer nog steeds onder de reductiekapaciteit van de bodem ligt, zelfs voor de hoogste berekende fluxen. Ook andere studies (Lamers et al. 1998; Cirkel et al. 2014) laten een snelle sulfaatreductie zien van hooguit enkele maanden waarbij Lamers et al. (1998) zelfs opmerken: "Sulfate availability was rate limiting" (*cit*.), met andere woorden: hoe hoger de sulfaatflux, hoe hoger de reductiesnelheid. De aanname van Aggenbach dat de bodem het aangevoerde sulfaat kompleet reduceert is daarmee realistisch.

Tot slot de aangenomen veengroei onder Elzenbroekbossen. Duitse studies (bv. Barthelmes et al. 2012) laten gemiddelde waarden zien van rond de 0.05 mm per jaar onder optimaal natte omstandigheden, bij verdroging zoals in de Lemselermaten is er sprake van netto afname van organische stof (Wichtmann & Wichtmann, 2009), overigens voor het grootste deel vanwege veenafbraak door in de bodem indringende zuurstof. Deze metingen zijn in overeenstemming met de waarneming dat in de Lemselermaten veel elzen 'op stelten' staan, dat wil zeggen, het veen is tussen hun wortels verdwenen.

Al met al is er voldoende reden om te stellen dat ook in de Lemselermaten een serieus risico bestaat op significante veenafbraak bij toestroming van met sulfaat verrijkt grondwater. Deze afbraak wordt niet gecompenseerd door veenvorming in het Elzenbroekbos.

[4] De lagere afbraakwaardes werden gevonden in bodems met een (zeer) lage sulfaatconcentratie, de hogere waardes bij hogere concentraties. Deze laatste waren echter nog steeds 50 maal lager dan de laagste door Aggenbach gebruikte waardes. De positieve correlatie tussen concentratie en reductiesnelheid (zie ook Lamers et al., 1998) maakt aannemelijk dat de in onderstaande berekening gebuikte waardes een onderschatting zijn.

[5] Het volume van een kg vers veen met een Dry Bulk Density van 0.07 (Chapman & Davidson 2001) wordt gelijk gesteld aan dat van een kg water (1 kg = 1 dm^3). De berekening van de jaarlijkse sulfaatreductie per m^2 en 10 cm diepte wordt dan als volgt: 365 dagen * 100 dm^3 * 2800 µg S * 96/32 (omrekening naar sulfaat) = 306 000 mg sulfaat.

b. *In hoeverre is er risico op verdringing van aan ijzer geadsorbeerd fosfor door het bij a) gevormde sulfide waardoor eutrofiëring van de standplaats plaatsvindt?*

Bij de reductie van sulfaat door organische stof wordt sulfide gevormd, een stof die zelfs in vrij lage concentraties toxisch is voor levende organismen (Lamers et al. 2013). In veel gevallen wordt het gevormde sulfaat meteen afgevangen door binding aan ijzer en geïmmobiliseerd in ijzersulfiden. Pas wanneer die hoeveelheid ijzer uitgeput is blijft sulfide in oplossing en kan de wortelzone bereiken. Omdat de bovenste bodemlaag in de Lemselermaten een laag ijzergehalte heeft (Lucassen & Roelofs 2016) zal binnen afzienbare tijd minstens een deel van het gevormde sulfide de wortelzone bereiken. In hoeverre dit een bedreiging is van de daar aanwezige vegetatie is niet bekend. Veel moerasplanten hebben aanpassingen aan het groeien in een zuurstofloos nat milieu ontwikkeld (Jackson & Armstrong 1999), en zijn tot op zekere hoogte tolerant tegen (licht) verhoogde sulfide concentraties. Het is niet bekend of dat ook voor de doelvegetatie geldt. Veel zgn. Rode Lijstsoorten zijn juist extra gevoelig voor verstoring. Bij vorming van ijzersulfiden wordt aan ijzer geadsorbeerd fosfor verdrongen en komt vrij in oplossing. Metingen in de Lemselermaten (Lucassen & Roelofs 2016) laten zien dat de hoeveelheid fosfor betrekkelijk laag is in relatie tot de totale hoeveelheid ijzer. Vooraleerst lijkt er daarom niet een groot gevaar te bestaan op interne eutrofiëring als gevolg van verdringing van geadsorbeerd fosfor door ijzer.

Bij een gelijkblijvende aanvoer van sulfaat valt in de nabije toekomst een toename van toxisch sulfide in de wortelzone te verwachten. In hoeverre dat een bedreiging is voor de aanwezige doelvegetatietypen is niet bekend. De kans op interne eutrofiëring als gevolg van verhoogde fosfaatbeschikbaarheid wordt als laag ingeschat.

c. *In hoeverre is er sprake van risico op oxidatie van gevormde ijzersulfiden in perioden met lage waterstanden waardoor zuurvorming en op termijn verzuring van de standplaatsen optreedt?*

De ijzersulfiden die onstaan bij sulfaatreductie in een ijzerrijke omgeving bestaan vrijwel uitsluitend uit tamelijk instabiele ijzermonosulfides (FeS) terwijl neerslag van het veel stabielere pyriet (FeS_2) niet of nauwelijks optreedt (Zak et al. 2021). Bij (ook tijdelijke) verlaging van de waterstand worden deze verbindingen snel geoxideerd en ontstaan ijzeroxides (‘roest’) en zuur (zwavelzuur H_2SO_4). In eerste instantie wordt dit zuur gebufferd door bodemprocessen zoals basenuitwisseling (Appelo & Postma 2005.) maar wanneer de uitgewisselde basen niet worden aangevuld, bv. door onvoldoende aanvoer van basenrijk grondwater, is dit een eindig proces dat binnen enkele decennia onherroepelijk eindigt in een zure bodem waar de doelvegetaties niet overleven. De metingen van Aggenbach (2021b) laten zien dat de basenverzadiging in de bodem van zowel het Blauwgrasland (H6410) als het Kalkmoeras (H7230) in 2020 bijzonder laag is geworden. Hij wijt dit aan de oxidatie van ijzersulfides als gevolg van enkele recente zeer droge jaren in combinatie met structureel te lage grondwaterstanden. Ondanks het feit dat beide genoemde gebieden in 1992 zijn geplagd en eventueel aanwezige lagen met ijzersulfides grotendeels zijn verwijderd, is kennelijk in de afgelopen drie decennia voldoende verzuringskapaciteit opgebouwd om de aanwezige buffering binnen twee droge jaren teniet te doen. Dit betekent dat er zowel een grote opbouw van verzuringscapaciteit is als ook dat de toename van de zuurbuffercapaciteit niet voldoende is om verzuring in droge jaren tegen te gaan. Dit is zorgwekkend want het betekent dat de kalk- en basenminnende vegetatie, die internationaal de grootste waarde van het gebied bepalen,

uiterst kwetsbaar zijn geworden voor droge periodes. Deze precaire situatie kan alleen worden verbeterd wanneer zowel de aanvoer van zuurvormers (lees: sulfaat) sterk wordt verminderd als ook de waterstanden constant tot dicht bij of zelfs op maaiveld worden gehouden.

Het risico op verdere bodemverzuring als gevolg van oxidatie van zwavel-ijzer verbindingen in droge jaren is zeer reëel en vormt een grote bedreiging voor de bescherming van de doelvegetaties van de Lemselermaten. Een sterke afname van de aanvoer van sulfaat in combinatie met strukturele vernatting kan dit risico inperken.

Antwoord op vraag 1: *Is bij de Lemselermaten sprake van een negatief effect op de aangewezen habitats als gevolg van de toestroom van met sulfaat verrijkt grondwater uit de 30-jaarszone?*

Het risico op anaerobe afbraak van de aanwezige veenlaag als gevolg van sulfaatreductie is groot, evenals het risico op verzuring van de bovenlaag in droge jaren door oxidatie van zwavelhoudende ijzerverbindingen. Onder dergelijke omstandigheden neemt de overlevingskans van de doelvegetaties H6410 Blauwgraslanden, H7230 Kalkmoerassen en H91E0C Vochtige alluviale bossen in hoog tempo af en zal op afzienbare termijn zijn verdwenen.

2. *Is het juist dat dit effect wordt opgeheven op basis van voldoende doorstroming door de habitats na uitvoering van de hydrologische maatregelen?*

De aanleiding tot deze vraag is ongetwijfeld de opmerking van Roelofs (2019) “We gaan er vooralsnog vanuit dat de doorstroming voldoende zal zijn om problemen met veenafbraak en fosfaat vermesting te voorkomen” (*cit*.). Op basis van deze, niet kwantitatief onderbouwde, uitspraak concludeert Boukes “Daarmee is er geen aanleiding om de adviezen van B-Ware uit 2016, en bevestigd in 2019, te negeren” (*cit*.). Het probleem met de uitspraak van Roelofs (2019) is dat niet duidelijk is wat hij nu exact bedoelt met ‘doorstroming’. Zijn opmerking ‘De door de bosgroepen en ons voorgestelde ingrepen in de hydrologie zullen de doorstroming zeker bevorderen ….’ (*cit*.) wordt hier zo geïnterpreteerd dat hij bedoelt dat met de -uiterst noodzakelijke- verhoging van de drainagebasis ook de kwelflux zal vergroten.

Inderdaad voorspelt de hydrologische effectstudie (Bor et al., 2019) op veel plaatsen een toename van de kwelflux als gevolg van de voorgestelde maatregelen, lokaal met een factor 2 tot 3. Wanneer geen maatregelen worden getroffen om tegelijkertijd ook het sulfaatgehalte van het grondwater te verlagen betekent dit dat ook de sulfaatflux met een vergelijkbare factor zal toenemen. Bovendien leiden de voorgestelde maatregelen tot een verschuiving van de plaatsen waar kwelstromen uittreden. In plaats van de huidige situatie, waar deze stromen hoofdzakelijk op beken, sloten en greppels zijn gericht, treedt de kwel dan meer diffuus uit. Dit betekent dat er over aanzienlijk grotere oppervlaktes gedurende lange tijd anaerobe condities zullen heersen, wat op zich positief is voor de doelvegetaties, maar ook leidt tot een grotere kans op sulfaatreductie en dus opbouw van sulfiden.

In hoeverre de toename van de kwelflux zal leiden tot afname van de sulfaatreductie of integendeel juist zal leiden tot een vergroting van de problemen door de verhoogde sulfaatfluxen valt te bezien. De veenbodems in de Lemselermaten bevatten meer dan voldoende organische stof om hogere sulfaatfluxen te reduceren en de hiervoor genoemde studies (Chapman & Davidson 2001; Cirkel et al. 2014) suggereren dat de reactie snel genoeg

plaatsvindt om een hoge reductiegraad van vele 10-tallen tot vrijwel 100 procent te bereiken. Echter, ook wanneer de toegenomen sulfaatbelasting niet tot een vergroting van de totale reductie zal leiden is er geen enkele reden om aan te nemen dat er integendeel juist een verlaging zal optreden. Zelfs bij een hoge flux van 5 mm/dag heeft het grondwater altijd nog 200 dagen nodig om een profiel van 1 meter te doorstromen. Dat is ruim voldoende tijd voor sulfaatreductie in het water dat dat de bodem doorstroomt (zie hiervoor).

Al met al is het uiterst onwaarschijnlijk dat vernatting van de Lemselermaten zal leiden tot vermindering van de sulfaatproblematiek. De uitvoering van de geplande hydrologische maatregelen zal wél leiden tot verbetering van de hydrologische omstandigheden voor de doelvegetaties en ook het systeem robuuster maken tegen verzuring in droge periodes. Mogelijk zal het echter lokaal ook leiden tot stagnatie van oppervlaktewater. Een dergelijke situatie leidt bij kwel van sulfaatrijk grondwater onherroepelijk tot de vorming en ophoping van giftig sulfide als gevolg van sulfaatreductie (Lucassen et al. 2004). In zo'n geval kan een lichte versterking van de afwatering van het oppervlaktewatersysteem lokaal wellicht enig soelaas bieden, zij het dat dit conflicteert met de doelstelling van vernatting. Het risico van een dergelijke ingreep is dat er te sterk wordt ontwaterd en ook plekken worden gedraineerd waar geen stagnatie van oppervlaktewater optreedt, met als gevolg dat de kwelflux te laag wordt om de basenrijkdom van de bodem op peil te houden. Deze maatregel wordt daarom slechts in uiterste noodzaak -en dan ook nog voor korte tijd- aanbevolen. Bij een dergelijke ingreep is gedetailleerde monitoring van waterstanden en chemische condities essentieel en dient bij voorkeur gebruik te worden gemaakt van regelbare kunstwerken zodat snel ingegrepen kan worden bij ongewenste ontwikkelingen.

Antwoord op vraag 2: *Is het juist dat dit effect wordt opgeheven op basis van voldoende doorstroming door de habitats na uitvoering van de hydrologische maatregelen?*

Het uitvoeren van de geplande hydrologische maatregelen zal leiden tot verbeterde hydrologische hydrologische condities voor de doelvegetaties maar niét tot een verlaagde sulfaatreductie. Het negatieve effect van sulfaatrijk grondwater wordt dan ook niet opgeheven na uitvoering van de hydrologische maatregelen. Integendeel, stagnatie van oppervlaktewater kan juist leiden tot verhoogde sulfaatreductie en ophoping van sulfide. Een tijdelijke, lichte afwatering kan in zo'n situatie een oplossing bieden maar vanwege de conflicterende effecten op de knelpunten verdroging en verzuring wordt geadviseerd om deze maategel zeer terughoudend (en bij voorkeur niet) toe te passen.

3. *Is het, indien het effect is aangetoond en de doorstroming dit niet opheft, verantwoord om als experimentele maatregel in de 30-jaarszone een evenwichtsbemesting in te stellen òf is het noodzakelijk deze volledig bemestingsvrij te maken?*

Theoretisch is het mogelijk om het grondwater weer schoon te krijgen door middel van het instellen van een evenwichtsbemesting waarbij vanuit de landbouwpercelen geen uitspoeling van mineralen naar het bovenste grondwater plaatsvindt. In de praktijk betekent dit dat er noch nitraat noch sulfaat mag uitspoelen. Dit vergt een hoog technisch niveau, zoals een zeer nauwkeurige dosering van de mestgift, aangepast aan de weersomstandigheden (neerslag, temperatuur), en het gebruik van slow-release meststoffen, die ervoor zorgen dat de voedingsstoffen langzaam en gedoseerd vrijkomen. Drijf- of stalmest is in zo'n situatie volledig

uit den boze. Mogelijk zal de dosering van sulfaat nog het grootste probleem opleveren. Veel soorten kunstmest, maar ook stalmest, bevatten aanzienlijke hoeveelheden sulfaat (Zak et al. 2021, zie voor een berekening ook Aggenbach 2021a) en ook daarvan moet de inspoeling nihil zijn. Een nauwkeurige berekening in hoeverre onder dergelijke randvoorwaarden nog rendabel te boeren is voert voor de huidige beoordeling te ver maar is mogelijk wel een punt van zorg.

Beleidsmatig vereist evenwichtsbemesting een stricte en regelmatige (maandelijkse) controle van de chemie van het infiltrerende water. Hiervoor moet zowel een accuraat meetnet worden opgezet als ook financiering worden voorzien om deze metingen gedurende vele jaren te kunnen continueren.

Als alternatief voor evenwichtsbemesting zijn twee andere gebruiksopties denkbaar:

- Continuering van het gebruik voor landbouwkundige doeleinden maar dan met een sterk verlaagde bemesting (niveau 50er jaren). In de huidige praktijk betekent dat dat er geen rendabel boerenbedrijf mogelijk is en er een aanvullend inkomen gezocht moet worden (hobbyboeren). Ook in zo'n geval is een stringente controle van bemesting en grond- en oppervlaktewaterchemie vereist.
- Een bestemming van de gronden zonder deze te bemesten, zoals natuurgras of landschappelijk in te passen natuurbos. Een dergelijk gebruik biedt de meeste zekerheid op een significante verlaging van de belasting van het grondwater met voedingsstoffen en sulfaat .

Antwoord op vraag 3: *Is het verantwoord om als experimentele maatregel in de 30-jaarszone een evenwichtsbemesting in te stellen òf is het noodzakelijk deze volledig bemestingsvrij te maken?*

Een gebruik zonder bemesting biedt de meeste zekerheid voor een structurele verlaging van de sulfaatconcentratie in het grondwater. Evenwichtsbemesting kan hier in theorie ook toe leiden maar daarbij duiken een aantal praktische problemen op die eerst opgelost dienen te worden. Deze optie is technisch complex en zeer kwetsbaar voor afwijkende weersomstandigheden. Vanuit het voorzorgsbeginsel wordt deze maatregel daarom afgeraden.

Geciteerde literatuur

Aggenbach, C.J.S., 2021a. Expertadvies sulfaatproblematiek Natura 2000 gebied Lemselermaten. Rapport KWR 2021.067, KWR, Nieuwegein.

Aggenbach, C.J.S., 2021b. Duurzaamheid van basenminnende schraallanden in kwelzones. Monitoring 1989-2020 Stroothuizen, Punthuizen en Lemselermaten. Rapport monitoring OBN-28-BE, Vereniging van Bos- en Natuureigenaren, Driebergen.

Appelo, C.A.J. and Postma, D. (2005) Chemical Analysis of Groundwater, Geochemistry, Groundwater & Pollution. Balkema, Rotterdam.

Barthelmes, A., de Klerk, P., Prager, A., Theuerkauf, M., Unterseher, M., & Joosten, H. 2012. Expanding NPP analysis to eutrophic and forested sites: Significance of NPPs in a Holocene wood peat section (NE Germany). *Review of Palaeobotany and Palynology* 186: 22–37.

Bor, M., van Gurp, H., Willems, G. en Capel, W., 2019. Hydrologische effectberekeningen PAS-maatregelen Lemselermaten. Rapport R001-1244201BMP-mdg-V03-NL, Tauw, Utrecht.

Chapman, S.J., & Davidson, M.S. 2001. 35S-sulphate reduction and transformation in peat. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 593–602.

Cirkel, D.G., Van Beek, C.G.E.M., Witte, J.P.M., & Van der Zee, S.E. a. T.M. 2014. Sulphate reduction and calcite precipitation in relation to internal eutrophication of groundwater fed alkaline fens. *Biogeochemistry* 117: 375–393.

Jackson, M.B., & Armstrong, W. 1999. Formation of Aerenchyma and the Processes of Plant Ventilation in Relation to Soil Flooding and Submergence. *Plant Biology* 1: 274–287.

Lamers, L., Govers, L., Janssen, I., Geurts, J., Van der Welle, M., Van Katwijk, M., Van der Heide, T., Roelofs, J., & Smolders, A. 2013. Sulfide as a soil phytotoxin—a review. *Frontiers in Plant Science* 4: 268.

Lamers, L.P.M., Tomassen, H.B.M., & Roelofs, J.G.M. 1998. Sulfate-Induced Eutrophication and Phytotoxicity in Freshwater Wetlands. *Environmental Science & Technology* 32: 199–205.

Lucassen, E. & Roelofs, J., 2016. Uitwerking onderzoeksvragen in het kader van Natura 2000 gerelateerd aan bodemonderzoek, grondwaterkwaliteit en inschatting interne eutrofiëring. Rapport 2016.044, Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen.

Lucassen, E., Smolders, A.J.P., van de Crommenacker, J., & Roelofs, J.G.M. 2004. Effects of stagnating sulphate-rich groundwater on the mobility of phosphate in freshwater wetlands: a field experiment. *Archiv Fur Hydrobiologie* 160: 117–131.

Roelofs, J., 2019. De rol van sulfaat bij vermesting van alluviale bossen, blauwgraslanden, stagnante oppervlaktewateren en zeer zwakgebufferde vennen. Rapport RP-18.160A.19.31, Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen.

Wichmann, S. & Wichtmann, W. (Hrsg.) (2009): Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt Energie-biomasse aus Niedermooren (ENIM). Institut für Dauerhaft Umweltgerechte Entwicklung der Naturräume der Erde (DUENE), Greifswald. 190 S.

Zak, D., Hupfer, M., Cabezas, A., Jurasinski, G., Audet, J., Kleeberg, A., McInnes, R., Kristiansen, S.M., Petersen, R.J., Liu, H., & Goldhammer, T. 2021. Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycles, ecotoxicological effects and bioremediation. *Earth-Science Reviews* 212: 103446.