Rapport

Expertadvies sulfaatproblematiek Natura 2000 gebied Lemselermaten

KWR 2021.067

Datum
8 september 2021

Opdrachtgever
provincie Overijssel

Meer informatie
Drs. [redacted]
T +31 6 [redacted]
E [redacted]@kwrwater.nl

Auteur
Drs. [redacted]

Kwaliteitsborgers
Dr. [redacted] (vraag 1, 2 en 3) &
Dr. [redacted] (vraag 4)

Projectmanager
Dr. [redacted]

Dit expertoordeel is opgesteld in opdracht van de gemeente Dinkelland in het kader van de uitwerking van maatregelen voor Natura 2000 gebied de Lemselermaten. De aanleiding van dit expert-advies zijn vragen over de effecten van toestroming van grondwater met een hoge sulfaatconcentratie op kwelzones met grondwaterafhankelijke habitats. Toestroming van sulfaatrijk grondwater kan negatieven effecten hebben op het voorkomen en behoud van de habitattypen H6410 Blauwgraslanden, H7230 Kalkmoerassen en H91E0C Vochtige alluviale bossen (beekbegeleidende bossen) die in de Lemselermaten afhankelijk zijn van kwel met basenrijk grondwater. De vragen die in dit expertoordeel worden behandeld komen voort uit uiteenlopende beoordelingen over hoe betreffende habitats bij vernattingsmaatregelen kunnen worden behouden.

In dit expertadvies worden de volgende vragen behandeld:

1. Kan door toestroming van sulfaatconcentraties van 1200 µmol/L of meer veen c.q. organische stof afbreken? Gevraagd is om daarbij in te gaan op het expertoordeel van Harry Boukes (2021).
2. Kunnen kwelafhankelijke habitats in de Lemselermaten duurzaam voorkomen in kwelzones met toestroming van sulfaatrijk grondwater wanneer het water goed kan doorstromen? Deze vraag komt voort uit onderzoek van Lucassen en Roelofs (2016) waarin gesteld wordt dat betreffende kwelafhankelijke habitats kunnen voorkomen bij toestroming van sulfaatrijk grondwater mits er een goede doorstroming van water plaatsvindt en een notitie van [redacted] d.d. 30-04-2021 waarin gesteld wordt dat onder die omstandigheden behoud van de habitats niet mogelijk is.
3. Is stoppen van bemesting in het intrekgebied in de zone met een verblijftijd van 0-30 jaar nodig?
4. Hoeveel draagt het stoppen van bemesting in het intrekgebied met een verblijftijd van 0-30 jaar bij aan vermindering van de sulfaattoevoer naar kwelzones in de Lemselermaten ten opzichte van het stoppen van bemesting in het intrekgebied met een verblijftijd van 0-10 jaar?

Dit expertadvies is opgesteld op basis van bestudering van genoemde onderzoeken en notitie, eigen geochemisch onderzoek in het gebied (Aggenbach 2021), bevindingen uit de wetenschappelijke onderzoek, onderzoeksrapporten over Lemselermaten en resultaten van de hydrologische modelstudie t.b.v. de uitwerking van de maatregelen voor vernatting.

Antwoord op vraag 1: Kan door toestroming van sulfaatconcentraties van 1200 µmol/L of meer veen c.q. afbreken?

Deze vraag houdt verband met een expertoordeel van Harry Boukes (2021) waarin gesteld wordt dat het risico van netto veenafbraak pas speelt bij veel hogere sulfaatbelastingen (veel hoger dan 1200 µmol/L). Hieronder wordt een reactie gegeven op het expertoordeel van [redacted]

Reacties op opmerkingen van [redacted]

[redacted] *"Hoewel ik toch al een flink aantal jaren meedraai in de hydrologie en af en toe bij pyrietgerelateerde projecten betrokken ben, is het voor mij nieuwe informatie dat sulfaat veen zou afbreken."*

Reactie:
Het is algemene, hydrogeochemische kennis dat bij organische stof kan worden afgebroken onder invloed van sulfaat waarbij sulfides worden geproduceerd (= dissimilatieve sulfaatreductie). De aanwezigheid van reactieve organische stof is essentieel voor de omzetting van sulfaat naar sulfides en de afbraak kan dan plaatsvinden onder zuurstofloze omstandigheden. De afbraak van organische stof door reductie van sulfaat kan als volgt plaats vinden:

$$2\ SO_4^{2-} + 3.5\ CH_2O + Fe^{2+} \rightarrow FeS_2 + 2\ HCO_3^- + 1.5\ CO_2 + 2.5\ H_2O$$

Deze reactie kan in deelstappen plaatsvinden waarbij eerst ijzer monosulfiden (FeS) wordt gevormd en vervolgens ijzerdisulfide (pyriet, FeS_2) (Appelo & Postma 1993). Deze chemische omzetting is in bodems een biogeochemisch proces waarbij bacteriën zijn betrokken die zorgen voor de afbraak van organisch materiaal (Hausmann et al. 2016).

Er is veel chemische en microbiologische literatuur over dissimilatieve sulfaat reductie in organische bodems (bv venen, kwelders, onderwaterbodems in meren). Een duidelijk voorbeeld voor veenafbraak door toestroming van sulfaatrijk grondwater betreft het Meeuwenkampje (Cirkel et al. 2013) en de Hazelbekke (Smolders et al. 2017). Dus vanuit de bestaande kennis is het niet nieuw dat aanvoer van sulfaatrijk grondwater in potentie veen kan afbreken.

[redacted] [redacted] *verwijst ter onderbouwing naar een onderzoek van* [redacted] *uit 2020. Omdat veenafbraak onder invloed van sulfaat voor mij een nieuw fenomeen is, ga ik op zoek of ik die studie kan vinden. Gelukkig blijkt dit rapport te downloaden. Op blz. 56 staat de chemische formule op welke manier sulfaatreductie onder invloed van organische stof verloopt. Twee ionen sulfaat breekt 3,5 'moleculen' organische stof (CH2O) af. Als ik uitga van een flux van 300 mm/jaar (300 l/m3) met een concentratie van 1 mmol/l (96 mg/l, afgerond 100) gaat het om jaarlijks 30 gram per vierkante meter sulfaat. De molecuulverhouding is 2:3,5 en het molecuulgewicht van organische stof 30, dan kom ik op 15 gram per m2 per jaar afbraak van organische stof. Als ik voor het gemak een soortelijk gewicht van 1,0 kg/liter aanneem, zou het om 0,015 mm/jaar veenafbraak gaan."*

Reactie:
De berekening die door [redacted] is uitgevoerd, klopt met de gekozen aannames die zijn gedaan, maar de gekozen aannames leiden tot een onderschatting van de afbraak van organisch materiaal. In deze berekening is aangenomen dat al het sulfaat in het grondwater wordt gereduceerd tijdens bodempassage in het beekdal. Bij twee aannames kunnen kanttekeningen worden geplaatst:

- [redacted] gaat uit van 300 mm/j kwel (=0,8 mm/d) wat een lage schatting is voor de kwelflux in terrestrische kwelzones van Lemselermaten. Onderzoek aan ontwikkeling van de basenchemie in relatie tot de ontwikkeling van de basenchemie in de geplagde delen van het Oude en Nieuwe Maatje duidt er op dat de jaargemiddelde kwelflux naar de bodemtoplaag minimaal 0,4 tot 2,4 mm/d bedraagt [redacted] 2021). Deze minimale kwelflux is afgeleid en uit de gemeten toename van de voorraden calcium en magnesium in de bovenste 10 cm van de bodem op vier locaties gedurende een periode van 1991 t/m 2009. In werkelijkheid was in die periode de kwelflux groter omdat niet al het door het grondwater aangevoerde calcium en magnesium adsorbeerde in de bodem wegens een constant hoge basenverzadiging van de bodem. De aanvoerflux van basische kationen is dan groter dan de bodem kan adsorberen en de toename van het kationadsorptiecomplex is gelimiteerd door de accumulatiesnelheid van organische stof. Een expertschatting voor de kwelflux in de kwelzones van Lemselermaten is dat deze voor Nederlandse beekdalen relatief groot is en in de range van enkele tot ca. 10 mm/d zal liggen. Verder is de verwachting wanneer door vernattingsmaatregelen actueel verdroogde locaties langdurige een stijghoogte van het grondwater krijgen aan of net boven maaiveld, de kwelflux hoog zal zijn omdat dan een groot deel van het jaar grondwater zal uittreden.
- [redacted] gaat uit van een bulkdichtheid voor veen van 1,0 kg/l voor veen wat veel te hoog is en ook hoog is voor de toplaag van organisch-stofrijke minerale bodems. Reëlere waarden voor veen liggen in de range van 0.1 tot 0.6 kg/l.

Tabel 1 geeft samen met de uitkomsten van [redacted] eigen berekeningen van afbraaksnelheid voor een range van kwelfluxen (1, 2, 5, 10 mm/d) en een range van bulkdichtheden (0,1 en 0,6 kg/l). Deze berekeningen geven een ca. factor 10 tot 100 hogere potentiele afbraak van organische stof door sulfaat-toevoer. De afbraak, uitgedrukt in de bodemdaling door het verdwijnen van veen bedraagt bij een bulkdichtheid van 0,1 kg/l, 0,18 tot 1,8 mm/j voor een kwelflux van respectievelijk 1 en 10 mm/d. Bij een bulkdichtheid van 0,6 kg/l is dat respectievelijk 0,03 tot 0,3 mm/j. Wanneer men bedenkt dat 1 mm/j veenvorming voor de gematigde klimaatzone al een hoge veengroeisnelheid is zijn de berekende waarden voor de potentiële afbraak substantieel en dus zeker niet verwaarloosbaar.

Tabel 1: Berekening van de potentiële afbraaksnelheid van organische stof door dissimilatieve sulfaat reductie bij een sulfaatconcentratie van het toestromende grondwater van 1,0 mmol/l en verschillende aannames voor de kwelflux in kwelzones en voor de bulkdichtheid van de bodem. Tevens is de tijdsduur berekend wanneer 0,5 m veen is verdwenen door zulke afbraak.

Item	Eenheid	expertadvies [redacted] J	dit expertadvies							
aannames										
SO4 concentratie toestromende grondwater	mmol/l	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
reductie SO4 door org.stof: ratio C-min/SO4 = 3.5/2 (mol/mol) conform reactie 2 SO42- + 3.5 CH2O + Fe2+ → FeS2 + 2 HCO3- + 1.5 CO2 + 2.5 H2O	mol/mol	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
kwelflux (Lemselermaten heeft hoge kwelflux, in actuele situatie is 5 mm/d in kwelzones aannemelijk)	mm/d	0.82	1	2	5	10	1	2	5	10
kwelflux	mm/j	300	365	730	1825	3650	365	730	1825	3650
ratio C/organische stof	g/g	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
bulkdichtheid veen (weinig veraard veen range 0.05-0.20 kg/l, elzenbroek met veen tot ca. 0.6 kg/l)	kg/l	1.00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.6	0.6	0.6
berekening										
SO4 aanvoer	mmol/j/m2	300	365	730	1825	3650	365	730	1825	3650
SO4 aanvoer	g SO4/j/m2	28.82	35.1	70.1	175.3	350.6	35.1	70.1	175.3	350.6
C-mineralisatie	mmol/j/m2	525.00	639	1278	3194	6388	639	1278	3194	6388
C-mineralisatie	g/j/m2	6.31	7.67	15.34	38.36	76.72	7.67	15.34	38.36	76.72
hoeveelheid decompositie veen	g/j/m2	15.00	18.3	36.5	91.3	182.5	18.3	36.5	91.3	182.5
hoeveelheid decompositie veen (1 mm/j veengroei is hoog)	l/j/m2 = mm/j	0.015	0.183	0.365	0.913	1.825	0.030	0.061	0.152	0.304
duur decompositie 0.50 m veen	j	33333	1370	685	274	137	8219	4110	1644	822

[redacted] J *"Maar zegt [redacted] J dit ook? In tabel 2-15 op blz. 92 wordt uitgerekend hoe snel een veenlaag afbreekt bij een SO4-max (ik weet niet precies hoeveel dat is). Over de periode 2001-2015 leidt dat bij een flux van 1 mm/dag tot een afbraak van 18 gram/m2/jaar, dus volgens mij zit ik behoorlijk goed. Dat leidt er toe dat een veenlaag van 0,5 m dik in 6226 jaar wordt afgebroken. Dan duurt het dus nog wel even voor die elzen op stelten staan."*

Reactie:
Hier wordt de uitkomst sterk bepaald door de aannames van kwelflux en bulkdichtheid van het veen. Als je uitgaat van een kwelflux van 5 mm/d en een bulkdichtheid van 0,1 kg/l wordt een veenlaag van 0,5 m dikte in 274 jaar afgebroken. Dat is ca. twee keer zo snel als de tijd van 500 jaar die nodig was voor de vorming van dit veen uitgaande van een hoge veengroeisnelheid van 1 mm/j.

[redacted] J *"Met andere woorden: er vindt ook aanvoer van organische stof plaats, ik neem aan in de vorm van DOC of zo. Het risico van netto veenafbraak speelt dus pas bij veel hogere sulfaatbelastingen dan waar we het hier over hebben.*
Ik vond het ook al een vreemd verhaal. Als het werkelijk zo zou zijn dat het veen in Nederland wegsmelt onder invloed van sulfaat, zouden met meer dan een eeuw verhoogde sulfaatdepositie en vijftig jaar overbemesting toch al lang geen veen meer over moeten hebben?

Mijn beeld is dan ook dat de notitie van [redacted] geen onderbouwing levert van het advies om de maatregel 'stoppen met bemesten' toe te passen op de 0-10 jaarszone. "

Reactie:
De eindconclusie van [redacted] is gebaseerd op enkele onjuiste aannames waardoor hij de potentiële afbraaksnelheid onderschat. Door onzekerheid in zaken als bulkdichtheid van de bodem en de werkelijk (toekomstige) kwelflux is het niet mogelijk om de afbraak met een grote zekerheid te kwantificeren. De afbraak van organisch materiaal door sulfaataanvoer hangt bovendien niet alleen af van de sulfaatconcentratie van het toestromende grondwater en de hoeveelheid grondwater die wordt aangevoerd (kwelflux). Potentieel kan die toevoer sterk bijdragen aan afbraak van organische stof, maar de daadwerkelijke bijdrage van sulfaattoevoer aan afbraak hangt ook af van de hoeveelheid van de aangevoerde sulfaat in de bodem kan worden gereduceerd. Sulfaat dat niet reduceert, kan namelijk met uittredend grondwater en afstroming van oppervlaktewater worden afgevoerd uit de kwelzone. De hoeveelheid sulfaat die in de bodem kan worden afgebroken, wordt onder andere bepaald door de beschikbaarheid van gemakkelijk afbreekbaar organische stof, de kwaliteit van nieuw gevormde biomassa, de beschikbaarheid van reactief ijzer en het temperatuurregime van de bodem. Bij hoge kwelflux is deze mogelijk limiterend voor de omzetting van sulfaat omdat dan de verblijftijd van het grondwater in de bodem te kort is in verhouding tot de reactiesnelheid. Preferente stroombanen (bv naar greppeltjes) kan daar ook aan bijdragen. Aan de hoeveelheid sulfaat die in een bodem kan worden afgebroken, is weinig kwantitatief empirisch onderzoek verricht. In één studie (Meeuwenkampje; Cirkel et al. 2013) met toevoer van sulfaatrijk water met een concentratie van ca. 2 mmol/l en een kwelflux van ca. 1-3 mm/d in een veenbodem reduceerde het overgrote deel van de aangevoerde sulfaat tot ijzersulfiden in de bodem in combinatie met afbraak van organische stof. Het grondwater dat de bodemtoplaag bereikte was hierdoor sulfaatarm. Dit voorbeeld geeft aan dat bij een hoge sulfaatbelasting de meeste aangevoerde sulfaat kan reduceren en sterk kan bijdragen aan veenafbraak.

<u>Aanvullende opmerkingen over de invloed van sulfaat</u>

Aanvullend op het bovenstaande nog het volgende. De langdurige (decennia) verdroging van de veenbodems zal sterk hebben bijgedragen aan de afbraak van organische stof en dus ook veen. Het feit dat de elzen op stelten staan (Eysink 2021) kan daarom niet alleen worden toegeschreven aan anaerobe afbraak door reductie van sulfaat. In zijn algemeen verloopt afbraak onder zuurstofhoudende omstandigheden in een gedraineerde bodem veel sneller dan in een natte anaerobe bodem. In de huidige situaties zakt de grondwaterstand in de veen- en sterk organische minerale bodems langdurig diep weg en zal aerobe afbraak dus sterk bijdragen aan verlies van organische stof. Vooral in de toplaag van de bodem tijdens lage grondwaterstanden zal aerobe afbraak sterk op treden. Tegelijk kan in dezelfde bodem ook sulfaattoevoer een belangrijke bijdrage kan leveren aan de afbraak en dan vooral in diepere zones van de bodem waar geen of weinig zuurstof komt. Ook kan sulfaattoevoer er voor zorgen dat juist recent gevormde biomassa in de toplaag bij hoge grondwaterstanden versneld kan worden afgebroken, waardoor veenvorming stagneert. Ook kan het de structuur van bestaand veen aantasten, waarbij veen met een vaste structuur slap wordt (Smolders et al. 2017).

Naast het bevorderen van anaerobe afbraak heeft sulfaattoevoer ook nog andere biogeochemische effecten die juist veroorzaakt worden door de dissimilatieve reductie van sulfaat. Andere potentieel negatieve biogeochemische processen betreffen:

1. het ontstaan van hoge concentraties vrij-sulfiden die toxisch zijn voor allerlei plantensoorten;
2. mobilisatie van fosfaat dat gebonden was aan ijzerhydroxiden die verbruikt zijn voor de vorming van ijzersulfiden; dit zorgt voor een betere fosfaatbeschikbaarheid voor de vegetatie;

3. extra mineralisatie van fosfaat en stikstof door verhoogde afbraak van organische stof waardoor de beschikbaarheid van deze voedingsstoffen voor de vegetatie toenemen; de extra stikstofmineralisatie kan potentieel aanzienlijk zijn (Aggenbach et al. 2020);
4. in geval van basenarme condities hoge ammoniumconcentraties in het porievocht; bij afbraak van organisch materiaal komt ammonium vrij door stikstofmineralisatie; in relatief zure bodems zal de gevormde ammonium goed adsorberen aan het kationadsorptiecomplex; hierdoor kunnen concentraties in het porievocht ook hoog oplopen; in basenrijke bodems absorbeert maar weinig ammonium aan het kationadsoptiecomplex en kan dan met de afvoer van grondwater verdwijnen uit de bodem;
5. opbouw van verzuringscapaciteit door de accumulatie van ijzersulfiden waardoor het risico op bodemverzuring toeneemt.

Juist deze biogeochemische effecten kunnen de duurzaamheid van grondwaterafhankelijke habitats aantasten. In de Lemselermaten is de opbouw van verzuringscapaciteit veel nadeliger voor het behoud van kwelafhankelijke basenminnende habitattypen (zie onder) dan de extra afbraak van organische stof als gevolg van sulfaattoevoer. Wanneer er door sulfaataanvoer netto afbraak van organische stof optreedt, leidt dat tot een verkleining van de kationadsorptiecapaciteit en daarmee de zuurbuffercapaciteit van de bodem verlagen (Aggenbach et al. 2021). De bodem wordt dan gevoeliger voor verzuring. Een verondersteld gering effect van sulfaattoevoer op de afbraaksnelheid van veen is daarom geen sluitende argumentatie dat er geen ecologische onderbouwing is voor het stoppen of beperken van bemesting in het intrekgebied van de Lemselermaten.

Antwoord op vraag 2: Kunnen kwelafhankelijke habitats in de Lemselermaten duurzaam voorkomen in kwelzones met toestroming van sulfaatrijk grondwater wanneer het water goed kan doorstromen?

Aanleiding voor deze vraag is dat kwelzones in de Lemselermaten toestroming hebben van sulfaatrijk grondwater. In het zuidelijke deel van de Lemselermaten zijn de concentraties het hoogst (Lucassen & Roelofs 2016). Uit chemisch onderzoek is gebleken dat de hoge sulfaatconcentraties worden veroorzaakt door uitspoeling van nitraat in agrarische percelen in het intrekgebied van de kwelzones. In de ondergrond zorgt omzetting van nitraat (NO_3^-) in stikstofgas (N_2) voor oxidatie van ijzersulfiden (FeS en FeS_2) en dat leidt tot de vorming van sulfaat (SO_4^{2-}). Deze omzetting vindt plaats in pyriet houdende lagen (Verstijnen & Roelofs 2019). Naast de bijdrage van pyrietoxidatie aan een hoge sulfaatconcentratie vindt in landbouwgronden ook aanzienlijke directe uitspoeling van sulfaat plaats in de Nederlandse zandgebieden. De concentraties in het ondiepe grondwater bedragen gemiddeld ca. 50 mg/l (= ca. 500 µmol/l) (Fraters & De Goffau 2014). De directe uitspoeling hangt samen met toevoer door bemesting en atmosferische zwaveldepositie. Metingen in twee landbouwpercelen aan de zuidzijde van de Lemselermaten laten zien dat de sulfaatconcentratie van het porievocht in de bovenste 30 cm van de bodem ca. 400 µmol/l bedraagt (Verstijnen & Roelofs 2019) wat vergelijkbaar is met het genoemde gemiddelde in Nederlandse zandbodems. Bestaande kwelzones in de Lemselermaten ontvangen dus sulfaatrijk grondwater door bovengenoemde omzetting van pyriet naar sulfaat én door directe uitspoeling van sulfaat. Nadere analyse van de gemeten diepteprofielen van de porievocht sulfaatconcentratie van het onderzoek van Verstijnen & Roelofs (2019), uitgaande van een bijdrage van de huidige atmosferische zwaveldepositie aan de porievocht sulfaatconcentratie van ca. 95 µmol/l, laat zien dat atmosferische zwaveldepositie ca. 7 %, sulfaattoevoer door bemesting ca. 22 % en pyrietoxidatie door nitraatuitspoeling ca. 71 % bijdragen aan hoge sulfaatconcentraties (zie bijlage 1 voor de berekening).

Vernattingsmaatregelen zullen de toevoer van grondwater naar terrestrische kwelzones vergroten omdat er minder grondwater wordt gedraineerd door het verondiepen van waterlopen. Dit zal daarom ook tot meer toevoer van sulfaat naar terrestrische kwelzones leiden. In eerste instantie is aangenomen bij de uitwerking van maatregelen voor de Natura 2000 doelen in Lemselermaten dat behoud van kwelafhankelijke habitattypen in kwelzones met toestroming van sulfaatrijk grondwater mogelijk is bij een goede doorstroming van water in de kwelzone. Wanneer deze vraag positief kan worden beantwoord, zou voor behoud van de habitats geen maatregel nodig zijn die de oorzaak van de verhoogde sulfaatconcentraties wegneemt (stoppen van bemesting in intrekgebied). Een goede doorstroming van water is daarbij gedefinieerd als een snelle afvoer van oppervlaktewater op het maaiveld, waardoor uitgetreden grondwater snel wordt afgevoerd en dit water niet langdurig kan stagneren op het maaiveld. Dit voorkomt dan dat in kwelzones met toevoer van sulfaatrijk grondwater langdurig oppervlaktewater stagneert met hoge concentraties van vrije sulfiden, fosfaat en/of ammonium, waarvan bekend is dat dit negatief doorwerkt op de vegetatie van habitattype H91E0C Vochtige alluviale bossen (beekbegeleidende bossen) (Lucassen et al. 2005).

Er zijn een aantal redenen waarom het erg onzeker is of kwelafhankelijke habitats kunnen worden behouden bij toestroming van sulfaatrijk grondwater. Die betreffen:

- De bodemtoplaag van actueel relatief natte broeklocaties hebben een lage Fe:S ratio (<1) (Lucassen & Roelofs 2016) en zijn daardoor bij langdurige hoge waterstanden gevoelig voor hoge concentraties van fosfaat, ammonium en vrije sulfiden in het porievocht wat toxische effecten heeft op de vegetatie. Het risico op mobilisatie van fosfaat is mogelijk gering omdat de aanvoer van fosfaat door grondwater gering is (Lucassen & Roelofs 2016). De mobilisatie van ammonium is gering, mits de bodem een hoge basenverzadiging heeft of door aanvoer van basenrijk grondwater een hoge basenverzadiging krijgt en behoudt. De vorming van vrije sulfiden is een risico wanneer reactieve ijzerhydroxiden verbruikt zijn door de vorming van ijzersulfiden. Onduidelijk is of dit effect wordt voorkomen bij een goede afvoer van water over maaiveld. Omdat het toestromende grondwater een lage ijzerconcentratie heeft en de bodemtoplaag in kwelzones een laag ijzergehalte (Lucassen & Roelofs 2016) is er een aanzienlijk risico op hoge sulfiden-concentraties in het porievocht van de bodemtoplaag. De na te streven kwelafhankelijke habitattypen hebben voor een goede kwaliteit en duurzaam voorkomen langdurig hoge waterstanden aan of boven maaiveld nodig. Dit geldt het sterkst voor de habitattypen H7230 Kalkmoerassen en H91E0C Vochtige alluviale bossen (beekbegeleidende bossen). Langdurig waterstanden aan maaiveld is voor deze habitattypen ook noodzakelijk om een hoge basenrijkdom waarvan deze habitats afhankelijk zijn te handhaven. Omdat het Natura 2000 gebied last heeft van structurele verdroging worden ook juist de vernattingsmaatregelen uitgevoerd. Vernatting kan daardoor nadelige biogeochemische effecten veroorzaken door 1) meer toestroming van sulfaatrijk grondwater en 2) door nattere condities in de bodem van kwelzones waardoor deze meer anaeroob worden en de sulfaatreductie wordt bevorderd. Uit een vergelijking van berekeningen van het grondwatermodel in de huidige situatie (referentiescenario 12) en de situatie na uitvoering van de PAS-maatregelen (scenario 12) blijkt dat in het dal van de Weerselerbeek de kwelflux in het winterhalfjaar toeneemt van ca. 0,8-0,9 mm/d naar 2,5-2,9 mm/d. In het dal van de Dollandbeek treedt ook veelal meer dan een verdubbeling op van ca. 2 naar 4 mm/d en treden ook hoge kwelfluxen tot ca. 10 mm/d op. Hieruit kan worden afgeleid dat bij vernatting zonder maatregelen die de sulfaatconcentratie in het grondwater verlagen, de sulfaattoevoer met een factor van ca. 2 tot 3 zal toenemen.

- Er wordt geen aandacht besteed aan het risico van opbouw van verzuringscapaciteit in de bodem als gevolg van accumulatie van ijzersulfiden door reductie van door grondwater aangevoerd sulfaat. IJzersulfiden die in nattere jaren accumuleren kunnen bij zeer lage waterstanden in (extreem) droge jaren oxideren, wat zorgt voor de interne vorming van zwavelzuur ('zuurbom-effect'). Recent onderzoek van Aggenbach (2021) aan de ontwikkeling van kalkmoeras en blauwgrasland in het Nieuwe en Oude Maatje laat zien dat van de bodemtoplaag in de periode 2009-2020 sterk is uitgeloogd voor basische kationen. Deze uitloging is waarschijnlijk opgetreden door de oxidatie ijzersulfiden in droge jaren. Betreffende periode had relatief veel droge jaren waaronder ook de extreem droge zomers van 2018 en 2019. In de periode 2009-2020 zijn geen structurele veranderingen in de waterhuishouding opgetreden die een verlaging van de waterstand kunnen verklaren. Aggenbach (2021) veronderstelt dat de zuurvorming optreedt in een bodemlaag onder de bodemtoplaag waar de meeste ijzersulfiden door (vroegere) sulfaatbelasting waren geaccumuleerd. Dit is aannemelijk omdat de bodemtoplaag in de zomer in de meeste jaren droogvalt, terwijl de diepere organisch-stofrijke bodemlaag wel langdurig anaeroob is en ijzersulfiden kan accumuleren. Bij zeer lage grondwaterstand oxideren in deze diepere laag de ijzersulfiden. Daar ontstaat zuur porievocht dat via capillaire opstijging de bodemtoplaag bereikt en daar geadsorbeerde basische kationen kan oplossen. Accumulatie van ijzersulfiden door aanvoer van sulfaatrijk grondwater is daarmee een bedreiging voor de duurzame buffering van een hoge basenrijkdom en pH van de bodem. Dit is vooral het geval wanneer de opgebouwde verzuringscapaciteit de zuurbuffercapaciteit gaat overschrijden, wat kan plaatsvinden in systemen die geen of een beperkte toename hebben van de zuurbuffercapaciteit (Aggenbach et al. 2020). De reductie van sulfaat kan overigens door vorming bicarbonaat (HCO_3^-) en het bevorderen van kalkvorming in de bodem zorgen voor toename van de zuurbuffercapaciteit (Cirkel et al. 2014). Ook bevordert de vorming van bicarbonaat de adsorptie van door het grondwater aangevoerde basische kationen en draagt daarmee ook bij aan een toename van de zuurbuffercapaciteit. Uit metingen van Aggenbach et al. (2021) blijkt dat in de Lemselermaten kalkvorming niet of nauwelijks optreedt. De vorming van alkaliniteit draagt in geringe mate bij aan de totale zuurbuffercapaciteit van de bodem omdat de buffercapaciteit van het kationadsorptiecomplex in de bodems van de Maatjes vele malen hoger is dan die van bicarbonaat in het porievocht. In de onderzochte Maatjes is de opbouw van zuurbuffercapaciteit van het kationadsorptiecomplex in de bodemtoplaag beperkt door de accumulatiesnelheid van organische stof (Aggenbach 2021). Hierdoor is het mogelijk dat er in het bodemprofiel een verzuringscapaciteit (in mol+) opbouwt vergelijkbaar of hoger wordt dan de zuurbuffercapaciteit (in mol+). Accumulatie van ijzersulfiden kan daardoor een risico zijn voor de duurzame instandhouding van een hoge basenverzadiging en pH van de bodemtoplaag voor de basenminnende habitattypen H6410 Blauwgraslanden, H7230 Kalkmoerassen en H91E0C Vochtige alluviale bossen (beekbegeleidende bossen). In het onderzoek van Aggenbach et al. (2021) werd sterke uitloging gemeten in de Maatjes in het Weerselerbeekdal, waar actueel matig hoge sulfaatconcentraties zijn gemeten (164-297 µmol/l; Lucassen, E. & J. Roelofs 2016). In het dal van de Dollandbeek zijn de sulfaatconcentraties van het toestromende grondwater veel hoger (1200-1292 µmol/l; Lucassen, E. & J. Roelofs 2016). Daarnaast blijkt uit de grondwatermodellering in de huidige situatie (referentiescenario 12) dat de kwelflux in het Dollandbeekdal hoger is (ca. 2 mm/d en hogere uitschieters tot ca. 10 mm/d) dan het Weerselerbeekdal (0,8-0,9 mm/d). De sulfaatflux in kwelzones in het Dollandbeekdal kan daardoor een factor 10 en meer hoger zijn dan die in het Weerselerbeekdal. De risico's van opbouw van verzuringscapaciteit zijn daardoor voor het Dollandbeekdal zeer groot.

- Vernattingsmaatregelen kunnen het diep uitzakken van de grondwaterstand in de zomer verminderen en daarmee het optreden van interne zuurvorming. Uit de modellering van maatregelscenario's (Eysink 2021) blijkt dat de hydrologische maatregelen vooral resulteren in een langere duur van hoge waterstanden en weinig in het verhogen van de waterstand in de zomer. Verwacht wordt dat na uitvoering van de hydrologische maatregelen in extreem droge zomers de waterstand nog steeds zodanig diep kan uitzakken dat in de bodem interne zuurvorming kan optreden door oxidatie van geaccumuleerde sulfiden. Dit is een snel proces waardoor er ook in korte periodes met diepe grondwaterstand toch een grote hoeveelheid zuur kan worden geproduceerd ('zuurbomeffect'). Door klimaatverandering neemt de kans op extreem droge perioden en dus zeer lage grondwaterstanden met zuurvorming bovendien toe.
- In het onderzoek van Aggenbach (2021) werd de afname van de basenvoorraad in de bodemtoplaag gemeten op plekken op zowel de beekdalhelling met een snelle afvoer van oppervlaktewater en zonder diepe inundatie, als lager in het dal waar mogelijk de afvoer van kwel- en neerslagwater minder goed is en enigszins stagneert in natte perioden. Dit impliceert dat een goede doorstroming van water over maaiveld de negatieve effecten van aanvoer van sulfaatrijk grondwater via opbouw van verzuringscapaciteit niet kan voorkomen. De reden hiervoor is namelijk dat de accumulatie van ijzersulfiden in de bodem niet alleen beïnvloed wordt door de mate van stagnatie van water op maaiveld. De voorraad van reduceerbare ijzerhydroxiden en beschikbaarheid van gemakkelijk afbreekbare organische stof zijn ook belangrijke factoren voor de accumulatie van sulfiden en deze zijn vermoedelijk in belangrijke mate onafhankelijk van de mate waarin actueel oppervlaktewater over maaiveld wordt afgevoerd.
- Opgemerkt wordt dat het uitgevoerde recente chemische onderzoek in de Lemselermaten (Lucassen & Roelofs 2016) het risico van interne zuurvorming door oxidatie van ijzersulfiden niet kan uitsluiten. In dit onderzoek wordt geconcludeerd *"dat er geen sprake is van zwavelophoping in de bodem"*. Deze conclusie is gebaseerd op bodemchemische bepalingen in de bodemtoplaag van drie locaties (waarvan twee vermoedelijk in een kwelzone en één op een plek zonder kwel). Er is in dit onderzoek niet gemeten in diepere bodemlagen waar de vorming van ijzersulfiden meer waarschijnlijk is. Onderzoek van Cirkel et al. (2013) in de sulfaat belaste kwelzone van het Meeuwenkampje laat bijvoorbeeld zien dat sterke sulfidenvorming op 0,4-0,9 m diepte in de bodem optrad.

Antwoord op vraag 3: Is stoppen van bemesting in het intrekgebied in de zone met een verblijftijd van 0-30 jaar nodig?

Om de risico's voor achteruitgang van kwelafhankelijke habitattypen sterk te verkleinen is de enige en meest effectieve maatregel het stoppen van bemesting in agrarische percelen die sterk bijdragen aan de inzijging van water dat opkwelt in de Lemselermaten. Het stoppen van bemesting zorgt voor 1) minder directe uitspoeling van sulfaat naar het grondwater door bemesting en 2) voor minder uitspoeling van nitraat en daarmee minder omzetting van pyriet naar sulfaat in pyriet houdende lagen van het watervoerende pakket. Het stoppen van de toevoer van sulfaat en nitraat door bemesting zorgt daarmee voor een sterke verlaging van de sulfaatconcentratie. Voor het bepalen welke delen van het inzijggebied belangrijk zijn, kan gebruikt worden gemaakt voor van berekende stroombaan- en verblijftijden met het grondwatermodel van Tauw, gebaseerd op een gemiddelde hoogte van de waterstanden en stijghoogten (Bor et al. 2019). Uit deze berekeningen blijkt dat veel van de stroombanen die eindigen in kwelzones van de Lemselermaten afkomstig zijn uit infiltratiegebied aan de zuidoostzijde van de Lemselermaten en

een verblijftijd hebben van 0 tot 30 jaar (zie bijlage 2). Het stoppen van de bemesting in de zone met een verblijftijd tot en met 30 jaar in intrekgebied aan de zuid- en oostzijde is daarom een maatregel die noodzakelijk is voor vermindering van de sulfaatbelasting van kwelzones en daarmee voor een duurzame instandhouding van kwelafhankelijke habitats. Kwelzones die vooral gevoed worden door grondwater met een relatief korte verblijftijd zullen eerder een verlaging van de sulfaatconcentratie geven terwijl dit voor kwelzones die gevoed worden door ouder grondwater, langer zal duren. Begrenzing van een kleinere oppervlakte intrekgebied zonder bemesting tot een zone met een minder lange verblijftijd heeft het risico dat de maatregel onvoldoende effect heeft. Wanneer dan blijkt dat voor duurzame instandhouding van kwelafhankelijke habitats alsnog een grote intrekgebied zonder bemesting nodig is, duurt het langer voordat voldoende verlaging van de sulfaatconcentratie wordt bereikt en zal het daarmee betreffende habitats ook langer nadelig beïnvloeden.

Antwoord op vraag 4: Hoeveel draagt het stoppen van bemesting in het intrekgebied met een verblijftijd van 0-30 jaar bij aan vermindering van de sulfaattoevoer naar kwelzones in de Lemselermaten ten opzichte van het stoppen van bemesting in het intrekgebied met een verblijftijd van 0-10 jaar?

Voor het beantwoorden van deze vraag zijn de volgende stappen uitgevoerd:

a. het kwantificeren van de relatieve bijdrage aan de kwel van grondwater in de Lemselermaten vanuit de verschillende verblijftijdzones binnen het intrekgebied;
b. het uitwerken van aannames voor berekening van de sulfaatconcentratie van het grondwater dat kwelzones bereikt in relatie tot landgebruik en vegetatie;
c. het berekenen van hoe verschillende scenario's voor het stoppen van bemesting in de vernatte situatie na uitvoering van de vernattingsmaatregelen bijdragen aan de vermindering van de sulfaatconcentratie van het toestromende grondwater. De berekende vermindering van de sulfaatconcentratie wordt gebruikt als een proxy variabele voor vermindering van de sulfaattoevoer naar kwelzones.

De in stap c. beschouwde scenario's zijn:

1. De bemesting van intrekgebied buiten Natura 2000 gebied wordt niet gestopt;
2. De bemesting stopt in het intrekgebied buiten Natura 2000 gebied in de zone waar de verblijftijd van het opkwellende grondwater 0-10 jaar is (0-10 jaarzone);
3. De bemesting stopt in het intrekgebied buiten Natura 2000 gebied in de zone waar de verblijftijd van het opkwellende grondwater 0-30 is (0-30 jaarzone);
4. De bemesting stopt buiten Natura 2000 gebied stopt in het hele intrekgebied.

Ten einde deze scenario's te onderscheiden is het nodig buiten het Natura 2000 gebied onderscheid te maken in intrekzones met een verblijftijd van 0-10 jaar, 11-30 jaar en > 30 jaar.

Deels bevindt het intrekgebied voor de kwelzones zich binnen het Natura 2000 gebied zelf. In verband met het berekenen van de sulfaatconcentratie van grondwater dat uit dit intrekgebied naar de kwelzones stroomt, worden hier twee type intrekzones onderscheiden:

1. intrekgebied binnen Natura 2000 gebied met korte vegetatie (vooral grasland, deels heide) en zonder bemesting;
2. intrekgebied binnen Natura 2000 gebied met bos en zonder bemesting.

Beschrijving van stap a) het kwantificeren van de relatieve bijdrage aan de toestroming van grondwater kwelzones in de Lemselermaten van diverse zones in het intrekgebied

Aanpak:
De berekeningen voor de relatieve bijdrage wordt uitgegaan van de situatie waarin de vernattingsmaatregelen van het PAS-maatregelenpakket zijn uitgevoerd. Reden hiervoor is dat vernattingsmaatregelen nodig zijn om structurele verdroging weg te nemen. De stroombanen, de verblijftijdverdeling en de ligging van de verblijftijdszones zullen in de vernatte situatie afwijken van de bestaande situatie. De ligging van kwel- en infiltratiezones en verblijftijd van het grondwater zijn gebaseerd op stroombaanberekeningen voor scenario 12 met het door Tauw opgestelde grondwatermodel (Bor et al. 2019). Deze stroombanen zijn berekend op basis van 'backward particle tracking'. Dat betekent dat voor kwelzones in het Natura 2000 gebied is berekend welke weg het toestromende grondwater ondergronds heeft afgelegd. Daarmee kan bepaald worden waar het water is geïnfiltreerd en hoe lang het water onderweg is geweest. Voor elke 25x25 m cel binnen het Natura 2000 is backward een stroombaan berekend. De stroombaanberekeningen zijn gebaseerd op gemiddelde standen en stijghoogten van het grondwater.

Voor de kwantificering van de relatieve bijdrage van de onderscheiden zones in het intrekgebied aan de hoeveelheid grondwater dat kwelzones voedt, wordt uitgegaan van de oppervlakte van deze zones. Dit is op basis van de aanname dat het intrekgebied overal dezelfde grondwateraanvulling plaatsvindt (mm/j). Deze aanname is gedaan omdat in de korte doorlooptijd van deze evaluatie de ruimtelijke variatie in grondwateraanvulling niet kon worden meegenomen in de berekening. Bos in de Lemselermaten kan een geringere grondwateraanvulling hebben dan grasland in de Lemselermaten en agrarische grasland en mais. Vegetatie op een vochtige bodem verdampt meer dan vegetatie op een droge bodem met een diepe grondwaterstand. Vooral in het Natura 2000 gebied zullen zulke verschillen in grondwateraanvulling voorkomen. Deze verschillen werken echter maar in geringe mate door in de scenario-analyse omdat het Natura 2000 gebied niet bemest wordt. Door de aanname van uniforme grondwateraanvulling is de relatieve bijdrage van een type intrekgebied aan grondwatervoeding van kwelzones gelijk aan de oppervlakte van het intrekgebied gedeeld door de totale oppervlakte van het intrekgebied.

Resultaten:
In bijlage 2 zijn figuren opgenomen voor de bestaande situatie (referentie) en de vernatte situatie (scenario 12 van de hydrologische modellering) met zowel de kwelpunten als de infiltratiepunten van de stroombanen. Deze figuren laten zien dat door de vernattingsmaatregelen de volgende veranderingen optreden:
ten aanzien van kwelzones (figuur B2.1 in bijlage 2):

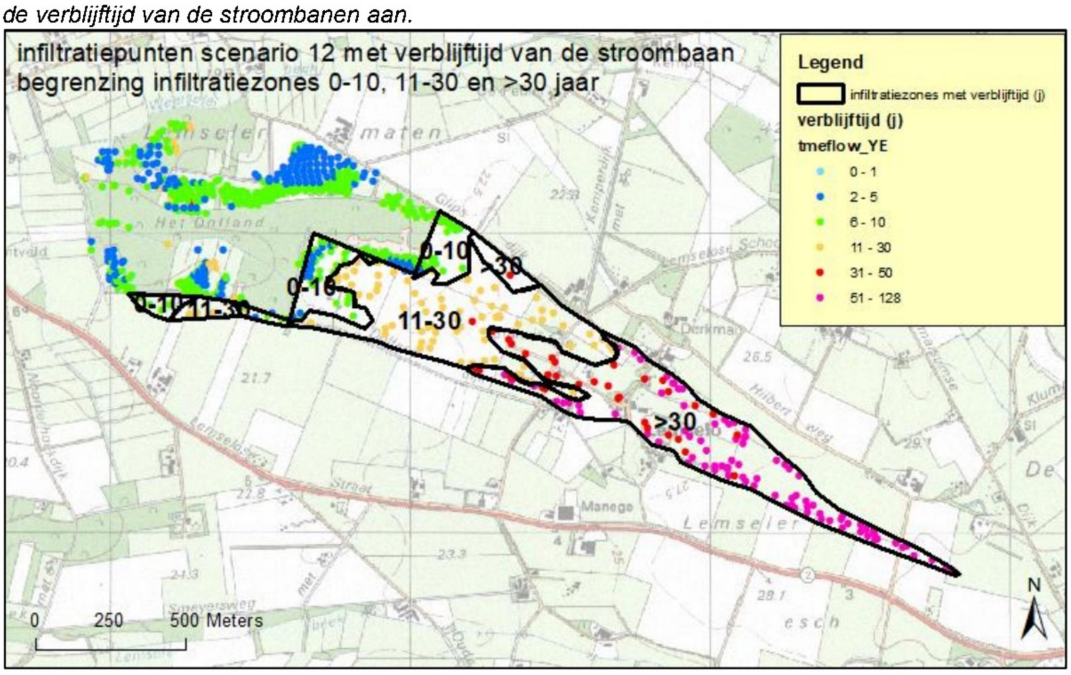
- In het algemeen: het aandeel van kwel van grondwater met een langere verblijftijd neemt toe in een groot deel van de Lemselermaten.
- In het Dollandbeekdal blijft toestroming van grondwater ouder dan 10 jaar belangrijk en het aandeel van toestroming grondwater ouder dan 30 jaar neemt toe.
- In een zone in en rond de Maatjes in het Weerselerbeekdal gaat op meer plekken grondwater met een verblijftijd van 11 tot 30 jaar en ook ouder dan 30 jaar toestromen.

ten aanzien van infiltratiezones (figuur B2.2 in bijlage 2):

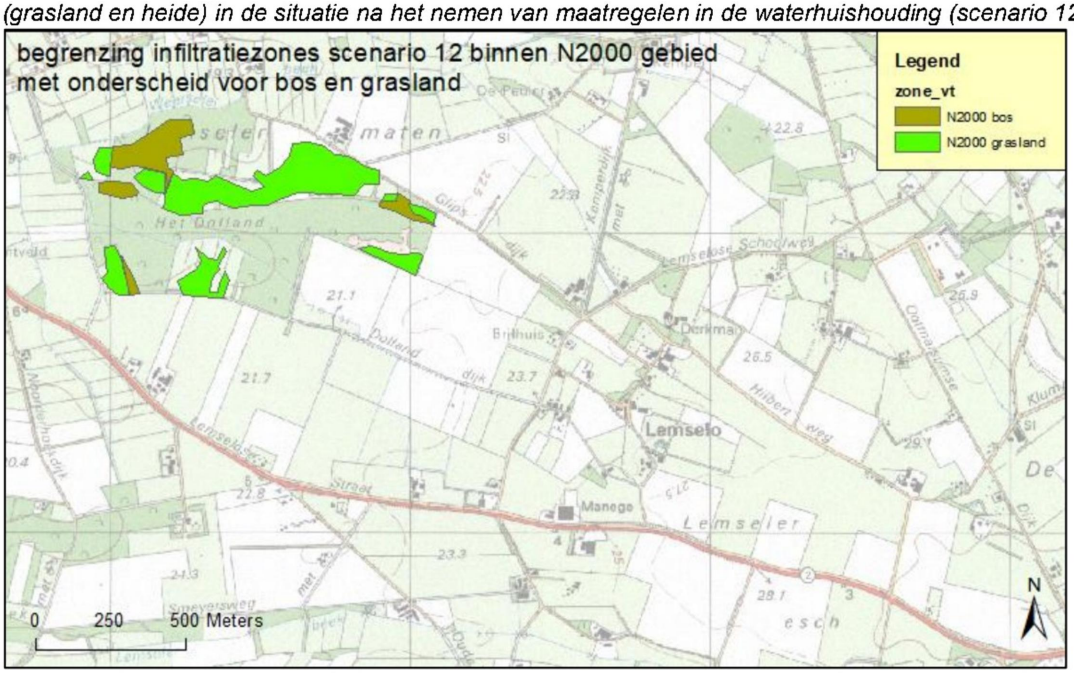
- Het totale intrekgebied wordt groter t.o.v. de bestaande situatie, vooral door verbreding van het staartvormige intrekgebied. De lengte van het intrekgebied blijft ca. gelijk.
- De westelijke grenzen van de 11-30, 31-50 en > 50 jaarszone verschuiven in westelijke richting.

In figuur 1 worden de verschillende verblijftijdzones (0-10, 11-30, >30 jaar) buiten het Natura 2000 gebied onderscheiden op basis van de ligging van de infiltratiepunten en de verblijftijd van de berekende stroombanen in de situatie met vernatting. In figuur 2 zijn de infiltratiezones binnen het Natura 2000 onderscheiden, ook weer voor de situatie met vernatting.

Figuur 1: Begrenzing van infiltratiezones buiten het Natura 2000 gebied met onderverdeling in de verblijftijd van het grondwater voor 0-10, 11-30 en >30 jaar in de situatie na het nemen van maatregelen in de waterhuishouding (scenario 12). De gekleurde bollen betreffen de infiltratiepunten van de berekende stroombanen, de kleuren geven de verblijftijd van de stroombanen aan.



Figuur 2: Begrenzing van infiltratiezones binnen de Natura 2000 begrenzing met onderverdeling in bos en 'grasland' (grasland en heide) in de situatie na het nemen van maatregelen in de waterhuishouding (scenario 12).



In tabel 2 staan de oppervlakten van de typen intrekzones en hun relatieve aandeel in de totale oppervlakte van het intrekgebied.

Tabel 2: Oppervlakten van de type intrekzones in het intrekgebied dat kwelzones in de Lemselermaten voedt. Tevens wordt in procenten het oppervlakteaandeel in het totale intrekgebied gegeven.

type intrekzone	**oppervlakte (ha)**	**aandeel oppervlakte t.o.v. totale intrekgebied (%)**
buiten N2000, landbouw 0-10 jaarszone	8.7	12
buiten N2000, landbouw 11-30 jaarszone	23.2	31
buiten N2000, landbouw >30 jaarszone	25.6	35
Natura 2000 gebied, bos	4.2	6
Natura 2000 gebied, grasland en heide	12.4	17
totaal	**74.0**	**100**

Beschrijving van stap b). aannames voor berekening van de sulfaatconcentratie van het grondwater dat kwelzones bereikt

Aanpak
Voor elke type intrekzone wordt de sulfaatconcentratie berekend van het grondwater dat de kwelzones bereikt. Daarvoor zijn aannames gedaan over de bijdrage van zwaveldepositie en voor intrekgebied met agrarisch gebruik ook van toevoer van sulfaat door bemesting, en het sulfaat dat ontstaat door de omzetting van nitraat in het infiltrerende grondwater door pyriet-oxidatie naar stikstofgas.

Voor de drie onderscheiden intrekzones buiten Natura 2000 gebied is uitgegaan van intensief agrarisch gebruik met bemeste grasland- en maispercelen. Aannames zijn hier:

- De toekomstige atmosferische zwaveldepositie draagt 95 µmol/l bij aan de sulfaatconcentratie van het grondwater (zie bijlage 1).
- De directe toevoer van sulfaat door bemesting bedraagt 300 µmol/l bij aan de sulfaatconcentratie (zie bijlage 1). Dit is ook in lijn met sulfaatconcentraties die in het LMM-programma worden gemeten (Fraters & De Goffau 2014).
- Voor het nitraatgehalte van het grondwater, voordat pyrietoxidatie optreedt, wordt uitgegaan van een landelijk gemiddelde voor het nitraatconcentratie van ondiep grondwater op zand. Daarbij wordt rekening gehouden met de invloed van de grondwaterstand op de nitraatconcentratie conform de getallen die Loon & Fraters (2018) geven per grondwatertrap en hebben afgeleid uit LMM-data van de periode 2010-2014 voor akker en grasland op zandgrond voor verschillende grondwatertrappen. In het gebied geeft de bodemkaart bodems met grondwatertrap V en VI. Volgens Loon & Fraters (2018) hebben deze grondwatertrappen respectievelijk gemiddeld een nitraatconcentratie van het ondiepe grondwater van 677 en 871 µmol/l voor grasland en respectievelijk 935 en 1226 µmol voor akkers. Uitgaande van een 50/50% oppervlakteverdeling van beide grondwatertrappen en een 50/50% oppervlakteverdeling van grasland en akkers (mais) bedraagt de gemiddelde nitraatconcentratie 927 µmol/l. Deze concentratie zit in de range die door B-Ware is gemeten in porievocht van de bodemtoplaag van bemest grasland (Verstijnen & Roelofs 2019).
- In anoxisch en sterk gedenitrificeerd grondwater bedraagt de nitraatconcentratie 34,5 µmol/l op basis van metingen in porievocht op twee meetpunten in intrekgebied van Lemselermaten met agrarische gebruik door Verstijnen & Roelofs (2019).
- Het verschil tussen de nitraatconcentratie in het ondiepe grondwater voor oxidatie van pyriet en het dieper sterk gedenitrificeerd grondwater kan berekend worden hoeveel nitraat denitrificeert: 927-34,5 = 893 µmol/L.
- Er wordt uitgegaan dat alle denitrificatie van nitraat optreedt door volledige oxidatie van pyriet, volledige denitrificatie van nitraat naar stikstofgas conform onderstaande chemische omzetting: $10\ FeS_2 + 30\ NO_3^- + 20\ H_2O \rightarrow 10\ Fe(OH)_3 + 15\ N_2 + 20\ SO_4^{2-} + 10\ H^+$.

  In het onderzoek van Verstijnen & Roelofs (2019) is in het porievocht van lagen met sterke denitrificatie de Fe-concentratie laag, wat een aanwijzing is dat ook het gereduceerde ijzer in pyriet (Fe^{2+}) door nitraat wordt geoxideerd en resulteert in de neerslag van hydroxiden van geoxideerd ijzer (Fe^{3+}). 1 mol nitraat (NO_3^-) geeft dan 2/3 mol sulfaat (SO_4^{2-}). Dan geeft 893 µmol/L denitrificatie van nitraat een bijdrage aan de sulfaatconcentratie van 595 µmol/l.
- Intrekgebied met agrarisch gebruik levert dan een totaal sulfaatconcentratie van het grondwater op volgens de optelling bijdrage van zwaveldepositie + directe input van sulfaat door bemesting + sulfaatvorming door denitrificatie = 95 + 300 + 595 = 990 µmol/L.
- Als bij de vorming van sulfaat door pyrietoxidatie Fe^{2+} niet oxideert, maar wordt vastgelegd in gereduceerde ijzermineralen (bv sideriet), dan is de sulfaatproductie per gereduceerde nitraat

nog wat hoger. Er wordt verder geen rekening gehouden met verschillen in de mate van denitrificatie door verschillen in verblijftijd en diepte van de stroombanen. Ondiepe stroombanen met een korte verblijftijd zouden minder denitrificatie kunnen hebben dan diepe stroombanen met een lange verblijftijd. Omdat pyriet houdende lagen ondiep voorkomen in het gebied (Verstijnen & Roelofs 2019) zal ook in stroombanen met een relatief korte verblijftijd sterke denitrificatie optreden. Verder wordt er omwille van de eenvoud en gebrek aan gedetailleerde metingen van organisch-stofgehalte in het watervoerende pakket bij de berekening geen rekening gehouden met de mogelijke bijdrage van anaerobe afbraak van organische stof aan de denitrificatie waardoor vorming van sulfaat door denitrificatie lager zou uitvallen. Omdat de berekende totale sulfaatconcentratie in de range ligt van de sulfaatconcentratie die is gemeten in pyriet houdende lagen met sterk gedenitrificeerd grondwater door Verstijnen & Roelofs (2019) lijken de aannames redelijk te zijn.

Voor natuurgrasland en andere korte vegetatie (heide) in het Natura 2000 gebied wordt uitgegaan van dat alleen atmosferische depositie bijdraagt aan de sulfaat concentratie van het grondwater (95 µmol/l; zie bijlage 1). Voor bos in het Natura 2000 gebied wordt uitgegaan van een sulfaatconcentratie van 200 µmol/l in het wegzijgende grondwater. Door afwezigheid van bemesting hoeft hier geen rekening gehouden te worden met input van nitraat en sulfaat door bemesting.

Verder wordt ervan uitgegaan dat op de transportroute van het grondwater tot aan de bodem van kwelzones pakketten geen reductie van sulfaat optreedt. De sulfaatconcentratie kan daardoor worden overschat

Resultaten
In Tabel 3 staat een overzicht van de sulfaatconcentraties met onderscheid voor de type intrekzones en de vier scenario's voor bemestingsmaatregelen waarvan het effect op de sulfaatconcentratie van het grondwater dat kwelzones voedt, wordt geëvalueerd.

Tabel 3: Samenvatting van de sulfaatconcentratie in grondwater in relatie met landgebruik en verblijftijdzones. Sulfaatconcentraties zijn afgerond op 100-tallen. Tevens is het de oppervlakte van elk type intrekzone (ha en tussen haakjes %) weergegeven.

zones	oppervlakte intrekgebied na nemen vernattings-maatregelen (ha en tussenhaakjes aandeel in %)	huidige belasting (umol/l)	nieuw met stoppen bemesting 0-10 jaarszone	nieuw met stoppen bemesting 0-30 jaarszone	nieuw met stoppen bemesting in hele intrekgebied
buiten N2000, landbouw 0-10 jaarszone	8.7 (12)	1000	100	100	100
buiten N2000, landbouw 11-30 jaarszone	23.2 (31)	1000	1000	100	100
buiten N2000, landbouw >30 jaarszone	25.6 (35)	1000	1000	1000	100
N2000 bos	4.2 (6)	200	200	200	200
N2000, natuur, geen bos	12.4 (17)	100	100	100	100

Beschrijving van stap c. berekening van de bijdrage van scenario's voor stoppen van bemesting aan vermindering van de sulfaatconcentratie van het toestromende grondwater

Aanpak
Voor de vier scenario's zijn twee variabelen berekend voor de sulfaatbelasting van kwelzones in de Lemselermaten. Op basis van de relatieve bijdrage van de diverse intrekzones aan toestroming van het volume grondwater is de gemiddelde sulfaatconcentratie berekend van het toestromende grondwater naar kwelzones (gemiddelde gewogen voor oppervlakte). Tevens is berekend hoe groot het volumeaandeel is van grondwater met een hoge sulfaatconcentratie (1000 µmol/l). De berekeningen gaan uit van het tijdstip waarop grondwater de kwelzone bereikt dat is geïnfiltreerd in de situatie met het nieuwe grondgebruik. De resultaten staan in tabel 4.

Resultaten
Uit de berekeningen kan het volgende worden afgeleid:

- Zonder maatregelen t.a.v. bemesting zal de sulfaatconcentratie van het toestromende grondwater gemiddeld gezien hoog blijven (804 µmol/l) en heeft 80 volumeprocent van het toestromende grondwater een dusdanig hoge sulfaatconcentratie (1000 µmol/l) dat dit leidt tot een sterke belasting van kwelzones met sulfaat. De sulfaattoevoer is daarbij afhankelijk van de kwelflux die in de vernatte situatie varieert van ca. 2 tot 10 mm/d. De hoge sulfaatbelasting die de combinatie van de hoge sulfaatconcentratie en zulke kwelfluxen oplevert, leidt tot accumulatie van veel pyriet en daarmee tot opbouw van een hoge zuurbuffercapaciteit in de bodem van kwelzones (Aggenbach et al. 2020). Dit veroorzaakt in kwelzones met de basenminnende kwelafhankelijk habitattypen in droge perioden met een lage grondwaterstand een afname van de basenvoorraad en verzuring van de bodem door oxidatie van pyriet. In de Lemselermaten is

in het afgelopen decennium met extreem droge zomers door interne zuurvorming sterke uitloging van basen opgetreden in de Maatjes (Aggenbach 2021). Dat vond plaats in een zone waar actueel de sulfaatconcentratie van het toestromende grondwater relatief laag is (ca. 164-297 µmol/l; Lucassen, E. & J. Roelofs 2016). Daarnaast kan de hoge sulfaatflux leiden tot de vorming van voor planten toxische vrije sulfiden in het bodemvocht (zie ook bij antwoord op vraag 2). Gezien de overwegend hoge sulfaatbelasting kunnen in het scenario zonder maatregelen t.a.v. bemesting in het intrekgebied de kwelafhankelijk habitattypen niet behouden worden.

- Met het stoppen van de bemesting in de 0-10 jaarszone in intrekgebied buiten het Natura 2000 gebied neemt de gemiddelde sulfaatconcentratie iets af (13%) t.o.v. het scenario zonder stoppen van bemesting, maar blijft absoluut gezien hoog (689 µmol/l). Ook is het volume-aandeel van toestromend grondwater met hoge sulfaatconcentratie (1000 µmol/l) nog steeds hoog (ca. 70%). In een groot deel van de kwelzones zal daardoor de sulfaatbelasting nog steeds hoog zijn en leiden tot de nadelige effecten genoemd bij het scenario zonder maatregelen t.a.v. bemesting. Bij het scenario met het stoppen van de bemesting in de 0-10 jaarszone is evenals in het bovenstaande scenario behoud van de kwelafhankelijke habitats in het gebied niet mogelijk.
- Met het stoppen van de bemesting in de 0-30 jaarszone in intrekgebied buiten het Natura 2000 gebied neemt de gemiddelde sulfaatconcentratie (417 µmol/l) wel sterk af met 48 % ten opzichte van het scenario zonder stoppen van bemesting. Het volume-aandeel van toestromend grondwater met hoge sulfaatconcentratie (1000 µmol/l) neemt ook sterk af van 78 % naar 35%. Het stoppen van bemesting in de 11-30 jaarszone draagt 35% bij aan vermindering van de gemiddelde sulfaatconcentratie en een vermindering van het volume aandeel grondwater met een hoge sulfaatconcentratie van ca. 25%. Daarmee wordt in een aanzienlijk deel van de kwelzones de sulfaatbelasting laag en biedt dit scenario perspectief voor behoud van habitats in betreffende kwelzones (zie figuur B2.1 in bijlage 2).
- Bij het scenario met stoppen van bemesting in de 0-30 jaarszone blijft sulfaatrijk grondwater (1000 µmol/l) nog steeds een aanzienlijk deel van de kwetsbare habitats voeden en zorgt in combinatie met de kwelfluxen in de vernatte situatie voor een hoge sulfaatbelasting. Dat betreft een deel van het Dollandbeekdal en de zone in en rond de Maatjes. Deze zones ontvangen namelijk in de situatie na het nemen van de maatregelen grondwater met een verblijftijd van meer dan 30 jaar (zie figuur B2.1 in bijlage 2). Kwelafhankelijke habitats in deze kwelzones gaan daardoor nog achteruit door de processen genoemd bij het scenario zonder het stoppen van bemesting.
- Het stoppen van bemesting in het hele intrekgebied leidt tot een gemiddeld lage sulfaatconcentratie van 106 µmol/l die nadert aan de achtergrondconcentratie zonder invloed van vervuiling. De kwelzones ontvangen dan geen sulfaatrijk grondwater meer met een concentratie van 1000 µmol/l. Deze situatie is voor de lange termijn het meest duurzaam voor kwelafhankelijke habitats in het hele Natura 2000 gebied.

Tabel 4: De sulfaatbelasting van kwelzones in de Lemselermaten voor diverse scenario's voor de situatie met vernattingsmaatregelen: de situatie zonder maatregelen t.a.v. bemesting, stoppen met bemesting in agrarisch gebied met de 0-10 jaarszone, stoppen met bemesting in agrarisch gebied met 0-30 jaarszone, stoppen met bemesting in hele intrekgebied met agrarisch gebruik.

variabele	zonder maatregelen t.a.v. bemesting	nieuw met stoppen bemesting 0-10 jaarszone	nieuw met stoppen bemesting 0-30 jaarszone	nieuw met stoppen bemesting in hele intrekgebied
gemiddelde sulfaatconcentratie toestromend grondwater (µmol/l)	804	699	417	106
gemiddelde sulfaatconcentratie toestromend grondwater t.o.v. de concentratie in de huidige situatie (%)	100	87	52	13
volumeaandeel toestromend grondwater met sulfaatconcentratie 1000 µmol/l t.o.v. totale hoeveelheid toestromend grondwater (%)	78	66	35	0

Conclusies

In de Lemselermaten is er groot risico op achteruitgang van kwelafhankelijke habitattypen bij toestroming van sulfaatrijk grondwater. Dat is ook het geval wanneer er sprake zou zijn van een goede afvoer van oppervlaktewater in kwelzones. Het stoppen van bemesting in het deel van het intrekgebied dat belangrijk is voor de grondwatervoeding van kwelzones kan behoud van zulke habitattypen wel waarborgen.

Meer specifiek:

1. De noodzaak van structurele vernatting om achteruitgang van kwelafhankelijke habitats tegen te gaan en de negatieve effecten toestroming van sulfaatrijk grondwater maken de marges voor behoud van kwelafhankelijke vegetaties gering. Zonder maatregelen die de sulfaatconcentratie in het toestromende grondwater verlagen, gaan kwelafhankelijke habitats achteruit. De toestroming van sulfaatrijk grondwater legt ook beperkingen op aan herstelpotentie van de nattere vormen van betreffende habitats.
2. De toestroming van sulfaatrijk grondwater vormt een blijvend risico voor bodemverzuring en daarmee voor achteruitgang van de kwelafhankelijke habitats in de Lemselermaten. Een goede doorstroming van water over maaiveld kan dit risico niet wegnemen.
3. Het stoppen van bemesting in het intrekgebied aan de zuid- en oostzijde van het Natura 2000 gebied de Lemselermaten met een verblijftijd tot en met 30 jaar zal sterk bijdragen aan de verlaging van de sulfaatconcentratie van het grondwater dat kwelzones voedt. Deze maatregel draagt daarmee bij aan de instandhouding van kwelafhankelijke habitats op de lange termijn. Het stoppen van bemesting in de 11-30 jaarszone boven op het stoppen van bemesting in de 0-10 jaarzone levert een substantiële verlaging van de sulfaatconcentratie van het toestromende grondwater en zorgt er voor dat in een aanzienlijk deel van de kwelzones de sulfaatbelasting

laag wordt. Daarmee wordt het risico op achteruitgang van de kwelafhankelijke habitats in de Lemselermaten sterk verlaagd.

4. Bij het stoppen van bemesting in de 0-30 jaarzone blijft wel een deel van de kwelzones en daarmee kwelafhankelijke habitats nog sulfaatrijk grondwater ontvangen dat toestroomt via stroombanen met een verblijftijd van meer dan 30 jaar. De effecten van het stoppen van bemesting in de 0-30 jaarzone zal daarom in een deel van de kwelzones doorwerken. Geadviseerd wordt om met monitoring de effecten van de uitgevoerde maatregelen te evalueren voor diverse kwelzones die variëren in verblijftijd van het toestromende grondwater. Relevante meetvariabelen voor deze monitoring betreffen a) de sulfaatconcentratie van het toestromende grondwater voordat het de bodem van de kwelzone bereikt, b) de chemie van de bodem en het bodemvocht in de kwelzone en c) de soortensamenstelling van de vegetatie in de kwelzone.

Referenties

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

Aggenbach, C.J.S, P. Huyghe, J. Nijp & R. van Diggelen (2020). Invloed van vermest grondwater op kwelafhankelijke ecosystemen. Rapport nummer 2020/OBN242-BE, Vereniging van Bos- en Natuureigenaren, Driebergen.

Appelo, C.A.J., & D. Postma (1993). Geochemistry, Groundwater and Pollution. xvi + 536 pp. Rotterdam, Brookfield.

Bor, M, H. van Gurp, G. Willems & W. Capel (2019). Hydrologische effectberekeningen PAS-maatregelen Lemselermaten. Tauw adviesbureau, Deventer.

Cirkel, D. G., C. G. E. M. Van Beek, J. P. M. Witte & S. E. A. T. M. Van der Zee (2013). Sulphate reduction and calcite precipitation in relation to internal eutrophication of groundwater fed alkaline fens. Biogeochemistry, DOI 10.1007/s10533-013-9879-4.

Eysink, F. (2021). Lemselermaten. Knelpunt sulfaat oplossen door bemestingsmaatregelen. Notitie Bosgroepen d.d. 30-04-2021.

Fraters, B. & A. de Goffau (2014). Sulfaat in grondwater en oppervlaktewater in Nederland Overzicht van meetresultaten van nationale meetnetten. RIVM Briefrapport 2014-0120, RIVM.

Hausmann, B., K.H. Knorr; K. Schreck, S.G. Tringe, T.G. del Rio, A. Loy & M. Pester. Consortia of low-abundance bacteria drive sulfate reduction-dependent degradation of fermentation products in peat soil microcosms. ISME JOURNAL 10(10): 2365-2375.

Lucassen, E., A. J. P. Smolders, L. P. M. Lamers & J. G. M. Roelofs (2005). Water table fluctuations and groundwater supply are important in preventing phosphate-eutrophication in sulphate-rich fens: Consequences for wetland restoration. Plant and Soil 269:109-115.

Lucassen, E. & J. Roelofs (2016). Eindrapportage Uitwerking onderzoeksvragen in het kader van Natura 2000 gerelateerd aan bodemonderzoek, grondwaterkwaliteit en inschatting interne eutrofiëring. Rapport nummer: RP-16.044, B-Ware.

Smolders, F., E. Bohnen-Verbaarschot & B. van Delft (2017). Ecopedologisch en biogeochemisch onderzoek Hazelbekke. Rapportnummer: RP-16.101.16.65, B-Ware/ WUR.

Van Loon, A. & D. Fraters (2018). De gevolgen van mestgebruik voor drinkwaterwinning. Een tussenbalans. KWR 2016.023b, KWR Water Research Institute/ RIVM.

Verstijnen, Y & J. Roelofs (2019). Aanvullend sulfaatonderzoek Lemselermaten. Conceptrapport, B-Ware.

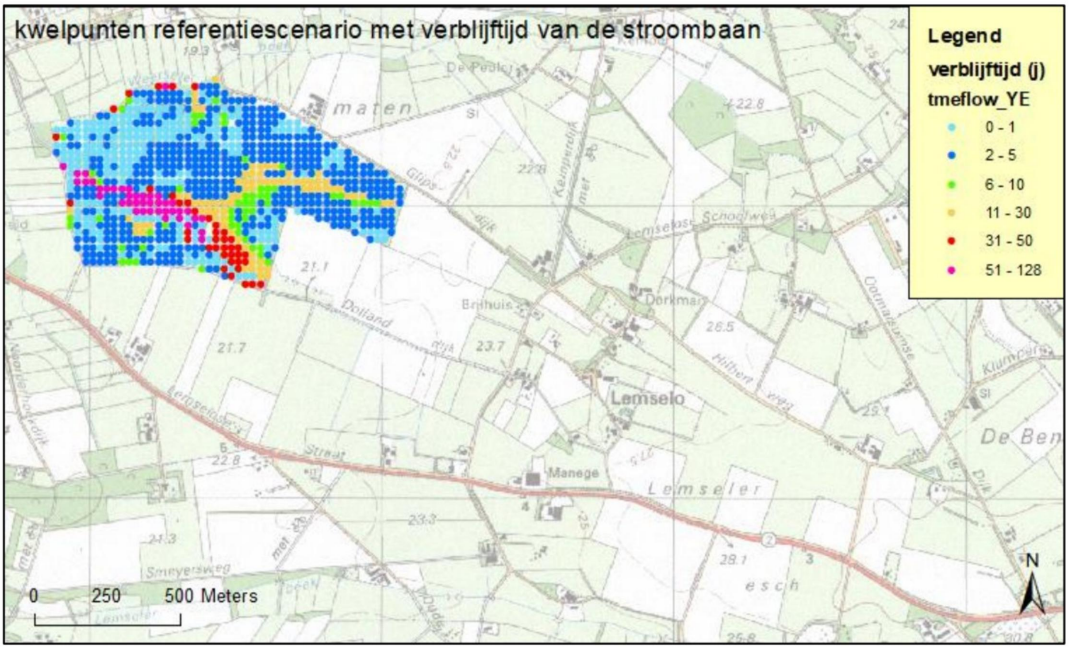
Bijlage 1: Berekening van de relatieve bijdragen aan hoge sulfaatconcentraties in het grondwater van Lemselermaten

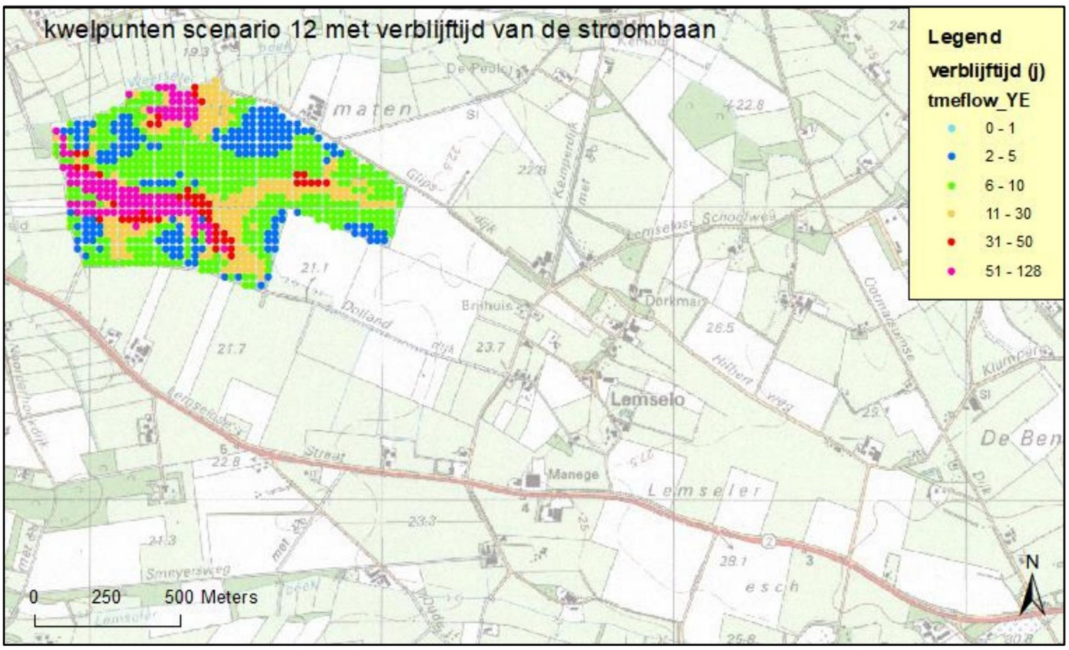
In het onderzoek van Verstijnen en Roelofs (2019) zijn in twee landbouwpercelen grenzend aan de Lemselermaten sulfaat-, nitraat- en ijzerconcentraties in het porievocht gemeten in diepteprofielen (0, 2, 4, 6, 8 en 10 m). Tevens is ook het zwaveltotaal- en ijzertotaal gehalte van de bodem gemeten. Op basis van deze metingen concluderen Verstijnen en Roelofs (2019) dat de omzetting van nitraat naar stikstofgas en gelijktijdige omzetting van pyriet in sulfaat verantwoordelijk is voor de hoge sulfaatconcentraties in het toestromende grondwater. In beide diepteprofielen worden ook al aanzienlijke sulfaatconcentraties in het porievocht van de toplaag gemeten waar geen pyriet zit (ca. 400 µmol/l). De sulfaat in het porievocht van de toplaag is hoofdzakelijk afkomstig van atmosferische zwaveldepositie en sulfaat in de mest en kunstmest. De gemeten diepteprofielen kunnen in combinatie met een berekening van de bijdrage van de huidige atmosferische zwaveldepositie gebruikt worden om de relatieve bijdrage van zwaveldepositie, directe aanvoer van sulfaat door bemesting en door oxidatie van pyriet aan de sulfaatconcentratie van het grondwater te schatten. Daarbij zijn de volgende aannames gemaakt:

- voor berekening van de bijdrage van zwaveldepositie aan de sulfaatconcentratie van het porievocht is uitgegaan van een actuele atmosferische zwaveldepositie van 8 kg/ha/j en een grondwateraanvulling van 275 mm/j; dit levert een bijdrage van zwaveldepositie aan de porievochtconcentratie van 95 µmol/l;
- de bijdrage van bemesting aan de porievochtconcentratie is berekend door het verschil van de porievochtconcentratie in de bodemtoplaag (0 m diepte) en de bijdrage van de zwaveldepositie aan de porievochtconcentratie; deze bedraagt ca. 300 µmol/l;
- de bijdrage van pyrietoxidatie aan de sulfaatconcentratie in het porievocht is berekend door de porievochtconcentratie in de pyriet houdende lagen te verminderen met de bijdragen van zwaveldepositie en bemesting;
- vervolgens is voor de gemeten sulfaatconcentraties van het porievocht in pyriet houdende lagen de procentuele bijdrage berekend van zwaveldepositie, sulfaattoevoer door bemesting en pyrietoxidatie.

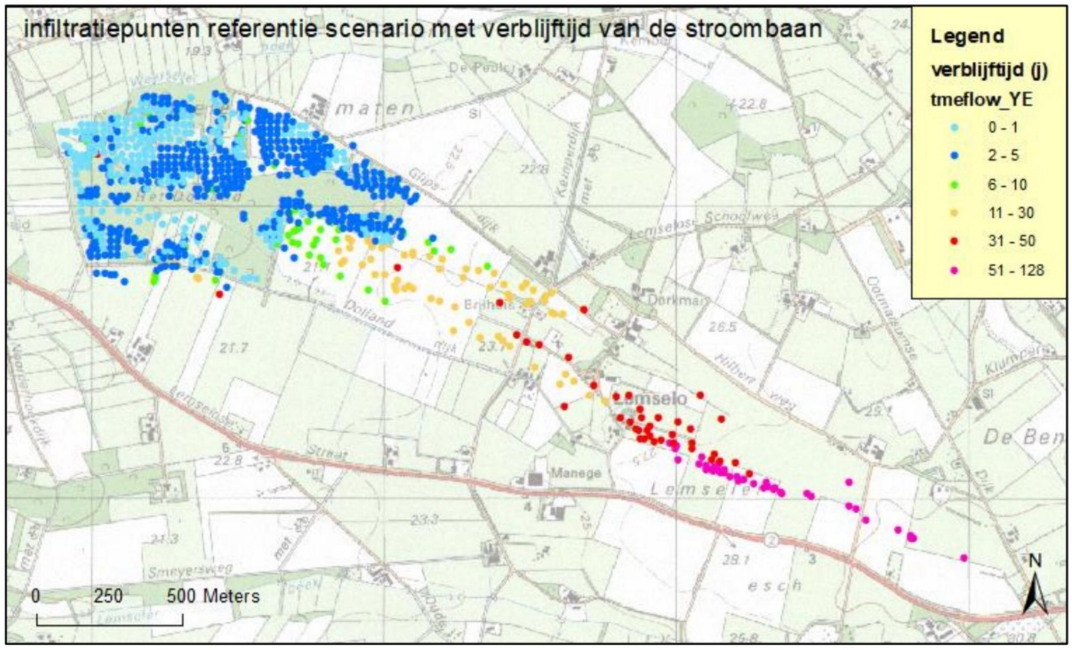
Bijlage 2: kwel- en intrekgebieden in de bestaande situatie en de situatie met vernattingsmaatregelen

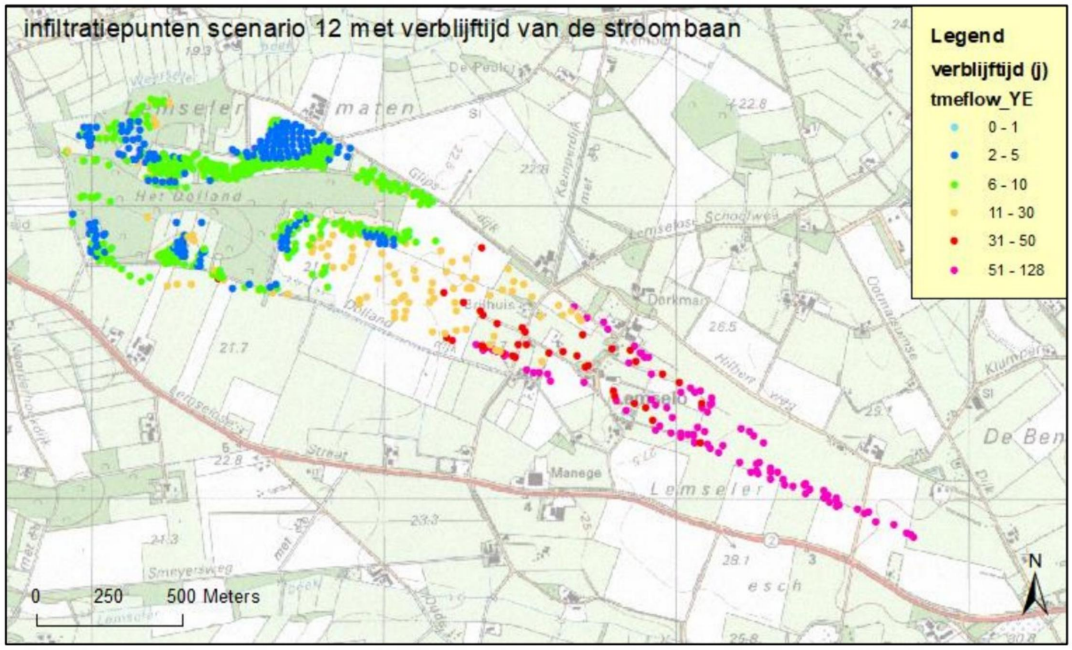
Figuur B2.1: Punten waar grondwater uittreedt met de verblijftijd van het grondwater in de bestaande situatie (referentiescenario) en na het nemen van maatregelen in de waterhuishouding (scenario 12) op basis van backward berekende stroombanen.





Figuur B2.2: Punten waar grondwater infiltreert met de verblijftijd van het grondwater in de bestaande situatie (referentiescenario) en na het nemen van maatregelen in de waterhuishouding (scenario 12) op basis van backward berekende stroombanen.





Jaar van publicatie
2021

Meer informatie
Drs. [redacted]
T +31 6 [redacted]
E [redacted]@kwrwater.nl

Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR 2021.067 | 8 september 2021 ©KWR

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Toelichting grondslagen

In dit document kunt u secties vinden die onleesbaar zijn gemaakt. Deze informatie is achterwege gelaten op basis van de Wet open overheid (Woo). De letter die hierbij is vermeld correspondeert met de bijbehorende grondslag in onderstaand overzicht.

J Art. 5.1 lid 2 sub e

Het belang van de openbaarmaking van deze informatie weegt niet op tegen het belang van de eerbiediging van de persoonlijke levenssfeer van betrokkenen