

INTERMEZZO II

Effecten van voormalige zwaveldepositie en andere sulfaatbelasting

Beije, H., D. Bal, N.A.C. Smits, A.J.P. Smolders & R.H. Kemmers

II-1 INLEIDING

Hoewel de atmosferische zwaveldepositie (SO_2) tegenwoordig veel geringer is dan voorheen, kunnen nog steeds restanten aanwezig zijn of instromen in de bodem van de volgende systemen:

- Stagnante wateren (vennen) en venen. In dergelijke systemen heeft de voormalige zwaveldepositie moeilijk kunnen uit- of afspoelen. In het vaak anaerobe milieu fungeert sulfaat als alternatieve electronenacceptor voor anaerobe afbraak van organisch materiaal. Hierbij wordt bij aanwezigheid van voldoende ijzer FeS_x , waaronder pyriet (FeS_2) gevormd. De hoeveelheid pyriet die op deze manier gevormd kan worden in stagnante wateren en venen, bedraagt maximaal 9 gr FeS_2 per liter bodem (Delft et al. 2005)
- Aquatische en terrestrische milieus die onder invloed staan van (lokale) kwel. In deze kwelgebieden kunnen (bij geringe doorstroming) ook pyrietrestanten aanwezig zijn, zoals hierboven werd beschreven. Daarnaast echter kunnen deze gebieden vanuit hoger gelegen gronden gevoed worden met grondwater dat onnatuurlijke hoeveelheden sulfaat bevat die geheel of gedeeltelijk afkomstig zijn uit vroegere zwaveldepositie. Grondwater dat is belast met sulfaat is vaak decennia onderweg en heeft dus zo lang invloed op de kwaliteit van kwelwater. Vooral in bosgebieden is destijds veel zwaveldepositie ingevangen en in het grondwater terecht gekomen, waardoor er nog steeds hoge concentraties zwavel in het grondwater kunnen worden aangetroffen (tot 500 mg/l; Jansen 1989). Eenmaal via kwelstromen aangekomen in een nat natuurgebied, reageert ook dit sulfaat met organische stof en worden ijzersulfiden gevormd (FeS en FeS_2). In systemen die via lokaal inzijgend grondwater worden gevoed, heeft een forse belasting door atmosferisch sulfaat plaatsgevonden. Tegenwoordig is deze belasting flink afgenomen. De herkomst van ondiep aanwezige sulfiden in de bodem en sulfaat in het grondwater is meestal niet met zekerheid vast te stellen (Delft et al. 2005). Bij voorraden groter dan 9 gram FeS_2 per liter bodem is bijna altijd sprake van sulfaataanvoer via het grondwater, naast eventuele restanten van voormalige aanvoer vanuit de lucht.

In droge terrestrische milieus die niet onder invloed staan van kwel zijn in het algemeen geen concentraties van zwavelverbindingen meer aanwezig uit vroegere depositie. De verzurende gevolgen ervan kunnen nog wel aanwezig zijn, aangezien herstel van de zuurgraad via natuurlijke processen (verwerking van mineralen en depositie van basenhoudende stoffen) zeer langzaam verloopt.

II-2 PROCESSEN BIJ SULFAATAANVOER OF AANWEZIGHEID VAN PYRIET

Aanvoer van sulfaat via het grondwater kan in anaerobe situaties de volgende processen bewerkstelligen, zowel in onderwaterbodems als in terrestrische kwelmilieus:

- Anaerobe afbraak van organische stof waardoor onder andere stikstof vrijkomt. In dit proces fungeert sulfaat als alternatieve electronenacceptor en ontstaan reducerende omstandigheden. Deze omstandigheden gaan samen met zuurconsumptie waardoor de pH stijgt. Hierdoor wordt in van nature zwak gebufferde systemen de microbiële activiteit gestimuleerd, waardoor de (netto) N- (maar ook P-)mineralisatie verder toeneemt (Smolders et al. 2006b)
- Bij aanwezigheid van ijzer(hydr)oxiden wordt ijzersulfide (FeS) en pyriet (FeS₂) worden gevormd door de reactie van het bij de sulfaatreductie vrijkomende sulfide met de ijzer(hydr)oxiden. Hierbij kan fosfaat vrijkomen dat eerder aan de ijzeroxiden was gebonden. Vooral in relatief ijzerrijke systemen, waar veel aan ijzer gebonden fosfor voorkomt, kan de P-mobilisatie door pyrietvorming aanzienlijk zijn. In zeer ijzerrijke systemen is dit risico geringer, omdat er een grote overmaat aan ijzer(hydr)oxiden aanwezig is om het fosfaat te kunnen binden. Het gaat hierbij vooral om de grote hoeveelheden fossiele ijzeroxiden die in de loop van de tijd via kwel geaccumuleerd kunnen zijn in de bodem. De actuele aanvoer van gereduceerd ijzer met het kwelwater is minder van belang (med. R. Kemmers, Alterra)
- Vorming van (giftig) sulfide (H₂S of S₂⁻), indien alle ijzer wordt uitgeput (vastgelegd) door pyrietvorming. Dit speelt doorgaans alleen in systemen die arm zijn aan ijzer
- Remming van de methaanvorming in veenbodems. Dit speelt alleen een rol voor drijfzillen en trilvenen, waarvan het drijfvermogen afhankelijk is van voldoende gasbelletjes met methaan.

De twee eerstgenoemde processen zorgen voor vermesting; beide processen hebben echter ook als prettig neveneffect dat het zuurconsumerende processen zijn die bijdragen aan het handhaven van hogere pH- waarden in de bodem; het zou wel eens zo kunnen zijn dat veel ontwaterde gebieden daardoor tot nu toe minder verzuurd zijn dan zonder sulfaataanwezigheid het geval zou zijn geweest (med. R. Kemmers, Alterra). Aan de andere kant kan opgehoopt pyriet hier oxideren, waardoor alsnog verzuring gaat optreden (med. F. Smolders, B-ware). Het derde proces leidt bij veel water- en moerasplanten tot vergiftiging. Zure gebieden zijn in het algemeen erg gevoelig voor deze processen aangezien er weinig ijzer in bodem aanwezig is om fosfaat vast te houden en vorming van giftig sulfide tegen te gaan. De stijging van de pH als gevolg van sulfaatreductie leidt juist hier tot decompositie en N-mineralisatie. Ook gebufferde systemen kunnen gevoelig zijn (Smolders et al. 2006b). Weliswaar speelt hierbij dan niet zozeer de stijging van de pH een rol, maar wel de toename van sulfaat als alternatieve electronenacceptor en de interactie van sulfide met de ijzer(hydr)oxiden. Hierdoor kan in anaerobe bodems de afbraak aanzienlijk worden versneld, waardoor een zeer ernstige vermesting kan optreden (Lucassen et al. 2000; Smolders et al. 2003).

Kwelgebieden kunnen minder gevoelig zijn voor aanvoer van sulfaat, maar alleen als er voldoende ijzer binnenkomt. Het is niet waarschijnlijk dat calcium een belangrijke rol speelt bij de binding van fosfaat bij pH waarden < 7. In aanwezigheid van kalk is bovendien nog maar de vraag of inderdaad binding van P aan kalk plaatsvindt. Er zijn aanwijzingen dat in deze alkalische milieus fosfaat vooral wordt geïmmobiliseerd via micro-organismen door vorming van polyfosfaten (med. R. Kemmers, Alterra).

Aanwezigheid van pyriet hoeft op zichzelf geen probleem te zijn voor natuurwaarden. In pyrietrijke bodems echter, waar (veel) meer zwavelgebonden ijzer voorkomt dan niet aan zwavel gebonden ijzer, is de beschikbaarheid van fosfor erg hoog en bestaat risico op vermesting. Dat komt omdat de binding van fosfor aan pyriet beperkt is, waardoor weinig fosfor wordt geïmmobiliseerd. Aanwezigheid van pyriet heeft met name effecten als het oxideert, dus onder aerobe omstandigheden. Daarbij kunnen verschillende processen aan de orde zijn met uiteenlopende gevolgen:

- Oxidatie van pyriet (en ijzersulfide) leidt tot het vrijkomen van sulfaat en het ontstaan van ijzer(hydr)oxiden. In wisselvochtige milieus met periodieke afvoer van regenwater kan op deze manier sulfaat verdwijnen uit het systeem, terwijl het ijzer weer beter fosfaat kan binden. Hierdoor wordt de fosfaatbeschikbaarheid verlaagd en treedt dus voedselverarming op (hetgeen tegenwicht biedt aan de vermestende invloed van stikstof; zie ook [Smolders et al. 2003](#))
- Deze oxidatie van pyriet leidt in zwakgebufferde milieus ook tot verzuring. De kans daarop is het grootst bij droogval van oevers, maar kan ook onder water optreden als bijvoorbeeld Oeverkruid zich uitbreidt over de sliblaag. Deze soort transporteert zuurstof via zijn wortels naar de sliblaag ([med. F. Smolders, B-ware](#)). Op plaatsen met voldoende hoge basenverzadiging door kwel van basen- en ijzerrijk grondwater is geen risico op verzuring. In het algemeen kan gezegd worden dat er geen verzuring optreedt wanneer de $S/(Ca+Mg)$ ratio (mol/mol) van de bodem lager is dan 0,66 ([Smolders et al. 2006b](#))
- De voornoemde verzuring kan in bodems met weinig organische stof ook gemakkelijk leiden tot hoge concentraties zware metalen (vooral aluminium) die toxisch zijn voor plant en dier
- De gunstige keerzijde van de bovengenoemde pyrietoxidatie is dat het nitraatgehalte van het grondwater daardoor daalt. De voordelen daarvan zijn vooralsnog echter beperkt, mede omdat stikstoflimitatie op veel plaatsen voorlopig niet haalbaar is vanwege te hoge niveaus van stikstofdepositie. Verder werkt nitraat bufferend op de sulfaat- en ijzerreductie, waardoor ijzer in een geoxideerde staat in de bodem blijft en beter fosfaat kan binden. Sommige van de mooiste Elzenbroekbossen in Noord- en Midden-Limburg zijn op dit moment zelfs de bossen waar veel nitraat binnenkomt via het kwelwater en de fosfaatbeschikbaarheid daardoor laag blijft ([Smolders et al. 2006a](#)).

Samenvattend kan gezegd worden dat de aanwezigheid van zwavelverbindingen tegengestelde processen oproept tijdens natte en droge perioden. In natte perioden en bij vernatting neemt over het algemeen de buffercapaciteit toe, komt fosfaat vrij terwijl zware metalen juist worden geïmmobiliseerd. In droge perioden en bij verdroging bestaat enerzijds gevaar voor verzuring en vergiftiging door zware metalen, maar kan anderzijds ook fosfaat worden vastgelegd, waardoor de kans op eutrofiëring afneemt. In welke mate deze processen optreden is niet alleen afhankelijk van vochttoestand, maar ook van onder andere de buffercapaciteit en het organische stofgehalte van de bodem.

II-3 ANDERE OORZAKEN VAN SULFAATRIJK GRONDWATER

Andere (dan voormalige zwaveldepositie) oorzaken van sulfaatrijk grondwater kunnen zijn:

- Natuurlijke belasting. Accumulatie van sulfaat kan zijn gegenereerd door oxische (niet met nitraat belaste) regionale kwelsystemen over een periode van 500-1000 jaar als gevolg van

pyrietoxidatie door zuurstof. Dit speelt voornamelijk in het holocene deel van Nederland een rol (Delft et al. 2005)

- Verdroging van ondiepe, pyrietrijke afzettingen. Voor bijvoorbeeld De Bruuk (bij Groesbeek) is geopperd dat organische kleilagen die hier nabij de oppervlakte liggen wellicht zeer rijk zijn aan pyriet, waaruit sulfaat kan ontstaan bij verdroging en door aanvoer van nitraatrijk grondwater (Smolders et al. 2009)
- Uitspoeling van grote hoeveelheden nitraat uit landbouwgronden (door bemesting) en uit bossen (door verhoogde invang van ammonium en ammoniak dat in de bosbodem wordt geoxideerd in nitraat). Dit nitraat zorgt in de diepere ondergrond voor oxidatie van pyriet en andere ijzersulfiden die daar vooral in mariene afzettingen in grote hoeveelheden aanwezig kunnen zijn. Bij dit oxidatieproces komt sulfaat vrij, waardoor de sulfaatconcentratie van het grondwater inmiddels sterk is toegenomen (Smolders et al. 2006b). De gevolgen die dit kan hebben op natuur in kwelgebieden, zijn hierboven reeds beschreven. Andere ongunstige effecten van de reactie tussen pyriet en nitraat zijn dat kalk verdwijnt en ijzer neerslaat in onoplosbare vorm, zodat deze stoffen minder beschikbaar zijn voor buffering van de zuurgraad en de beschikbaarheid van fosfaat (Hoeks 1987). Het grondwater wordt hierdoor echter niet alleen rijker aan sulfaat maar ook rijker aan Ca en Mg. Uittredend sulfaat- en calciumrijk grondwater kan bufferend werken omdat sulfaatreductie tot bicarbonaatproductie kan leiden. In sommige milieus (kalkmoerassen) kan hierdoor oververzadiging aan CaCO_3 ontstaan waardoor dit neerslaat en co-precipitatie van fosfor plaatsvindt. Hierdoor kan ondanks de sulfaatbelasting de P-beschikbaarheid dalen (Cirkel & Van Beek 2012).
- Aanvoer van sulfaat via oppervlaktewater. In veel natuurgebieden vooral in laag-Nederland worden watertekorten in de zomer aangevuld door de inlaat van sulfaatrijk oppervlaktewater. Andere gebieden zoals beek- en rivierdalen en boezemgebieden worden of werden al dan niet van nature periodiek overstroomd met oppervlaktewater dat tegenwoordig sulfaatrijk is geworden. In laagveengebieden kan oxidatie van anaeroob zwavelrijk veen leiden tot een aanzienlijke belasting van het oppervlaktewater met sulfaat. Hier is het aanwezige veen dus een lokale bron van sulfaat.

II-4 CONCLUSIES

In de bodem en/of het grondwater van natuurterreinen kunnen zwavelverbindingen aanwezig zijn in de vorm van:

- Sulfaatverbindingen (mobiel)
- Sulfide-verbindingen met vooral ijzer. Deze zijn secundair gevormd uit sulfaat en zijn deels immobiel (pyriet) en deels mobiel (andere sulfiden).

De herkomst van sulfaat en sulfiden kan te maken hebben met:

- Geaccumuleerd zwavel uit historische zwaveldepositie, die ter plaatse is gedeponeerd dan wel via het grondwater is aangevoerd van elders. Dit speelt in stagnante wateren (vennen) en in situaties met lokale kwel
- aanvoer van sulfaat dat vrijkomt uit pyriet in de ondergrond, na oxidatie onder invloed van nitraat dat uitspoelt onder bossen en landbouwgronden. Dit speelt eveneens in veel situaties met lokale kwel

- aanvoer van sulfaat via oppervlaktewater (vooral in het holocene deel van Nederland, maar kan ook elders van belang zijn)
- oxidatie van zwavelrijk veen (vooral in West-Nederland)
- aanvoer van natuurlijke sulfaatconcentraties in het grondwater (bijna alleen in het holocene deel van Nederland).

Aanwezigheid van zwavelverbindingen in natuurterreinen kan leiden tot de volgende negatieve effecten, afhankelijk van de lokale omstandigheden:

Vermesting door N- en P-mobilisatie via sulfaatreductie en afbraak organische stof

Dit proces vindt plaats in situaties waar tegelijkertijd de volgende omstandigheden aanwezig zijn:

- anaerobe, natte bodem (zowel onderwaterbodems als terrestrische kwelmilieu)
- organisch materiaal aanwezig
- sulfaatrijk grondwater.

Dit proces vindt vooral plaats in zure ecosystemen met een sulfaatbelasting.

Vermesting door P-mobilisatie via vorming ijzersulfiden

Dit proces vindt plaats in aanvulling op het vorige proces, maar alleen in ijzerrijke systemen met veel ijzergebonden fosfaat. Dit is vooral het geval in sommige beekdalen. systemen met grote voorraden fossiele ijzeroxiden is P-mobilisatie minder aan de orde.

Sulfide toxiciteit

Ook dit proces vindt plaats in aanvulling op het proces dat onder 1 is genoemd, maar (in tegenstelling tot het proces onder 2) juist in ijzerarme situaties. Het gaat hierbij vooral om vennen.

Wegzinken drijftil door onvoldoende methaanvorming

Dit proces kan in anaerobe situaties optreden als gevolg van sulfaatreductie en afbraak van organische stof, maar is alleen relevant in systemen met een veenbodem en drijftillen, dus in hoogvenen en trilvenen.

Verzuring door pyrietoxidatie

Dit proces kan optreden in pyriethoudende, zwakgebufferde bodems, maar – in tegenstelling tot de voorgaande processen – alleen in aerobe omstandigheden. Aanwezigheid van zwavel in de vorm van pyriet biedt in sommige situaties echter ook een kans om vermesting te bestrijden. Deze kans doet zich voor in wisselvochtige milieus met periodieke afvoer van regenwater. Door het instellen van een vochtregime waarbij pyriet (en ijzersulfide) in de zomer oxideert, komt ijzer vrij dat (weinig mobiel) fosfaat kan binden terwijl het vrijkomende, mobielere sulfaat kan uitspoelen. Dit positieve effect bestaat dus uit P-immobilisatie door pyrietoxidatie. Dit proces kan gepaard gaan met het eerder genoemde proces van verzuring, maar niet op plaatsen met voldoende hoge basenverzadiging.

II-5 HABITATTYPEN EN LEEFGEBIEDEN WAAR ZWAVELBELASTING ROL SPEELT

Onderstaande tabel II-1 geeft aan in welke habitattypen zwavelbelasting belemmerend is zijn voor de natuurkwaliteit. Voor de leefgebieden is aangegeven in welke leefgebieden zwavelbelasting een rol speelt, en wordt voor de invloed van zwavelbelasting waar mogelijk verwezen naar vergelijkbare habitattypen in tabel II-2. Daarnaast kunnen habitattypen of leefgebieden nog de gevolgen ondervinden van verzuring die in het verleden heeft plaatsgehad door zwaveldepositie, maar waarvan de fysieke resten inmiddels zijn verdwenen. Deze zijn niet opgenomen in de tabellen. Naast de genoemde habitattypen is de belasting met zwavel niet (meer) relevant voor Duinheiden met Kraaihei (vochtig, 2140A), Vochtige heiden (laagveengebied H4010B), Stroomdalgraslanden (H6120; inundatie is namelijk weinig frequent), Zinkweiden (H6130; Inundatie is te weinig frequent voor een duidelijke invloed van sulfaat. Wel is regelmatige overstroming met pyrietrijk metaalrijk slib nodig om het systeem in stand te houden), Glanshaverhooilanden en Grote vossenstaarhooilanden (6510AB; te weinig aanvoer via inundatie en weinig gevoelig voor eutrofiering).

Tabel II-1. Habitattypen waar zwavelbelasting invloed heeft op de natuurkwaliteit.

	Habitatype	Herkomst sulfaat & sulfiden	Mogelijke effecten	Opmerkingen
H2170	Kruipwilgstruwelen	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof; P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit in ijzerarme systemen	Minder in ijzerrijke situaties
H2180B	Duinbossen (vochtig)	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof? P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit in ijzerarme systemen	Minder in ijzerrijke situaties
H2190A	Vochtige duinvalleien (open water)	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit in ijzerarme systemen; N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak van organische stof	Alleen in relatief voedselarme situaties
H2190B	Vochtige duinvalleien (Kalkrijk)	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	Sulfide toxiciteit	Relatief weinig gevoelig voor vermestende effecten

	Habitattype	Herkomst sulfaat & sulfiden	Mogelijke effecten	Opmerkingen
H2190C	Vochtige duinvalleien (kalkarm)	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof; P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit in ijzerarme systemen	Minder in ijzerrijke situaties
H3110	Zeer zwak gebufferde vennen	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof	
			P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden? Sulfide toxiciteit?	Minder in ijzerrijke situaties
			Verzuring door pyrietoxidatie	Oxidatie van organische S verbindingen bij droogval of bij uitbreiding Oeverkruid
H3130	Zwak gebufferde vennen	Via grondwater na oxidatie pyriet door nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie; toestroom sulfaat via oppervlaktewater	N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof? P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden?	
			Sulfide toxiciteit	In ijzerarme situaties
			Verzuring door pyrietoxidatie	Oxidatie van organische S verbindingen bij droogval of bij uitbreiding Oeverkruid
H3140	Kranswierwateren	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie; via oppervlaktewater	N-mobilisatie door sulfaatreductie; P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit	Op hogere zandgronden en in laagveengebieden; met name in ijzerarme situaties
H3150	Meren met Krabbenscheer	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit	N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof; P-mobilisatie	Met name in (laag)veengebieden

	Habitattype	Herkomst sulfaat & sulfiden	Mogelijke effecten	Opmerkingen
		historische depositie; via oppervlaktewater	door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit	
H3160	Zure vennen	Geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	Verzuring door pyrietoxydatie	Bij droogval, maar in zuur ven weinig belangrijk
H4010A	Vochtige heiden (hogere zandgronden)	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie (geldt potentieel ook voor heidevennetjes. Hier vaak toestroming van grondwater)	Verzuring door pyrietoxydatie; Sulfide toxiciteit	Bij verdroging
H6410	Blauwgraslanden	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie; via oppervlaktewater	N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof? P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit	Minder in ijzerrijke situaties
H7110A	Actieve hoogvenen (hoogveenland schap)	Geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	Verzuring door pyrietoxydatie	Bij verdroging, maar effect van verdroging op zich is zeer waarschijnlijk ernstiger
			Sulfide toxiciteit; wegzinken drijftil door onvoldoende methaanvorming	Bij afspoeling S naar laagte met drijftil
H7110B	Actieve hoogvenen (heideveentjes)	Geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	Verzuring door pyrietoxydatie	Bij verdroging
			Sulfide toxiciteit; wegzinken drijftil door onvoldoende methaanvorming	
H7120	Herstellende hoogvenen	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie (geldt potentieel ook voor heidevennetjes. Hier vaak toestroming van grondwater)	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden	Minder van belang
			Sulfide toxiciteit; wegzinken drijftil door onvoldoende methaanvorming	Bij afspoeling S naar laagte met drijftil
			Verzuring door pyrietoxydatie	Bij verdroging

	Habitattype	Herkomst sulfaat & sulfiden	Mogelijke effecten	Opmerkingen
H7140A	Overgangs- en trilvenen (trilvenen)	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie; via oppervlaktewater	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit; wegzinken drijftil door onvoldoende methaanvorming	
H7140B	Overgangs- en trilvenen (veenmosrietlanden)	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie; via oppervlaktewater	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; Sulfide toxiciteit	
H7150	Pioniervegetatie met snavelbiezen	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie (geldt potentieel ook voor heidevennetjes. Hier vaak toestroming van grondwater)	Verzuring door pyrietoxidatie	Bij verdroging
			Sulfide toxiciteit; wegzinken drijftil door onvoldoende methaanvorming	Bij afspoeling S naar laagte met drijftil
H7210	Galigaanmoerassen	Via grondwater na oxidatie pyriet door nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie; via oppervlaktewater	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden	minder in ijzerrijke situaties
H7220	Kalktufbronnen	Via grondwater na oxidatie pyriet door nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden	Mogelijk zeer lokaal waar organisch materiaal accumuleert. Blijkt in ieder geval in Bunderbos niet op te treden (meded. Smolders, Bware). Weinig van belang
H7230	Kalkmoerassen	Via grondwater na oxidatie pyriet door verdroging, nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie; via oppervlaktewater	N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof? P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit	

	Habitatype	Herkomst sulfaat & sulfiden	Mogelijke effecten	Opmerkingen
H9160A	Eiken- haagbeukenbos- sen (hogere zandgronden)	Via grondwater na oxidatie pyriet door nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden	Alleen in beekdalen; Minder in ijzerrijke situaties
H91D0	Hoogveen- bossen	Geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	Verzuring door pyrietoxidatie	Bij verdroging
H91E0B	Vochtige alluviale bossen (essen- iepenbossen)	Via grondwater na oxidatie pyriet door nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof?	Minder in ijzerrijke situaties
H91E0C	Vochtige alluviale bossen (beekbegelei- dende bossen)	Via grondwater na oxidatie pyriet door nitraatuitspoeling en/of uit geaccumuleerd zwavel uit historische depositie; via oppervlaktewater	P-mobilisatie door vorming ijzersulfiden; sulfide toxiciteit	Minder in ijzerrijke situaties
			N-mobilisatie door sulfaatreductie en afbraak organische stof	

Tabel II-2. Leefgebieden waar zwavelbelasting invloed heeft op de natuurkwaliteit.

Leefgebied	Habitatype
1. Permanente bron & langzaam stromende bovenloop	Nvt
2. Geïsoleerde meander en petgat	Zie 3150
3. Zwakgebufferde sloot	Nvt
4. Zuur ven	Zie 3160
5. Grote-zeggenmoeras	Nvt
6. Dotterbloemgrasland van beekdalen	Zie 6410
7. Dotterbloemgrasland van veen en klei	Nvt
8. Nat, matig voedselrijk grasland	Nvt

II-6 LITERATUUR

- Cirkel, G. & K. van Beek 2012. Sulfaat, bedreiging of zegen voor vorming kalkmoeras? H2O 1: 31-33.
- Delft, S.P.J., R.H. Kemmers & A.G. Jongman 2005. Pyrietvorming in relatie tot interne eutrofiering en verzuring. Alterra rapport 1161.
- Hoeks, J. 1987. Effecten van de vuilstortplaats Dukenburg op het natuurreservaat De Bruuk. ICW.
- Jansen, P.C. 1989. Belang van de strooisellaag voor de totale depositie in een dennenbos. Landschap 6: 147-161.
- Lucassen E.C.H.E.T., A.J.P. Smolders & J.G.M. Roelofs 2000. De effecten van verhoogde sulfaatgehalten op grondwater gevoede ecosystemen. H2O 33: 28-31.
- Smolders A.J.P., Lucassen, E.C.H.E.T. & Roelofs, J.G.M. 2003. Waterpeilregulatie in broekbossen: bron van aanhoudende zorg. H2O 36: 17-19.
- Smolders, A., E. Lucassen, H. Tomassen, L. Lamers & J. Roelofs 2006a. De problematiek van fosfaat voor natuurbeheer. Vakblad Natuur Bos Landschap 3: 5-11.
- Smolders A.J.P., L.P.M Lamers, E.C.H.E.T. Lucassen G. van der Velde & J.G.M. Roelofs 2006b. 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., Poelen M. & Brouwer E. 2009. Bodem- en hydrochemisch onderzoek de Bruuk. Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen. Rapport 2009-23.

