

Met nutriënten verrijkt grondwater bedreigt kwelafhankelijke ecosystemen

Camiel Aggenbach, Jelmer Nijp, Arnaut van Loon, Edu Dorland (KWR), Rudy van Diggelen (Universiteit Antwerpen)

De duurzaamheid van waardevolle natuurtypen staat onder druk, doordat kwelafhankelijke ecosystemen in beekdalen gevoed worden door grondwater met hoge nitraat- en/of sulfaatconcentraties. Dit wordt veroorzaakt door landgebruik en verhoogde atmosferische stikstofdepositie in intrekgebieden. De toevoer van stikstof door grondwater is vaak veel hoger dan kritische waarden voor atmosferische depositie en de belasting met sulfaat kan ook zeer hoog zijn. Dergelijke hoge stoffluxen kunnen leiden tot een sterke afbraak van organisch materiaal, sterke eutrofiëring en opbouw van een hoge verzuringscapaciteit. Vervuiling van grondwater met nitraat en sulfaat is daarom voor beekdalnatuur een van de grote knelpunten en vereist meer aandacht in beleid en herstel van natuurgebieden.

Gebieden waar grondwater uittreedt (kwelzones) komen onder andere voor in beekdalen. Ze worden gevoed met grondwater dat vanaf de hoger gelegen infiltratiegebieden toestroomt en onderweg door bodempassage van samenstelling kan veranderen (zie afbeelding 1). Grondwater uit zoete grondwatersystemen is onder natuurlijke omstandigheden veelal arm aan nitraat en sulfaat, heeft een lage tot matige zuurgraad (hoge pH), en bevat verhoogde gehalten aan kationen als calcium, magnesium, en ijzer. Op plekken waar het grondwater de wortelzone bereikt, komt vaak waardevolle natuur voor met plantensoorten die gebonden zijn aan ondiepe, weinig fluctuerende grondwaterstanden en een basenrijke, nutriëntenarme bodem.

'Kwel'

De term 'kwel' wordt op uiteenlopende manieren gedefinieerd. In dit artikel wordt hiermee bedoeld een opwaartse toestroming van grondwater naar de bodemtoplaag. Kwelafhankelijke natuurtypen zijn dan ook typen die afhankelijk zijn van de toestroming van grondwater tot in de wortelzone.

De precieze chemische samenstelling van grondwater wordt beïnvloed door allerlei natuurlijke en antropogene processen. In de afgelopen decennia zijn agrarisch gebruikte infiltratiegebieden aanzienlijk bemest en ook in de huidige agrarische praktijk spoelen stoffen als nitraat en sulfaat naar het grondwater uit. Deze bereiken op termijn de kwelzone, of ze reageren in de ondergrond, waardoor de grondwaterkwaliteit verandert. Vaak resulteert de uitspoeling van nitraat bijvoorbeeld in een hoge sulfaatconcentratie. Wanneer grondwater met hoge nitraat- en/of sulfaatconcentraties de kwelzone bereikt, kunnen voedselarme en basische condities en de daaraan gebonden natuurtypen verdwijnen. De aard en omvang van deze risico's zijn onderzocht [1] op basis van een literatuurstudie en analyse van bestaande data.

Het besef neemt toe dat antropogene invloeden in infiltratiegebieden waardevolle natuur in kwelgebieden kunnen bedreigen. Een duidelijk kader om te beoordelen bij welke kwaliteit het toestromend grondwater schadelijk is ontbreekt echter. Een belangrijke oorzaak hiervoor is dat er geen eenduidige relatie is tussen stofconcentraties in het grondwater in infiltratiegebieden en effecten op kwelafhankelijke natuurtypen. Dit komt doordat 1) de grondwaterkwaliteit in de ondergrond verandert; 2) deze omzettingsprocessen zelf ook kunnen veranderen door chemische uitloging van watervoerende pakketten; 3) niet alleen de stof*concentratie*, maar vooral ook de stof*belasting* (concentratie x kwelflux) bepalend is; 4) ook in de reactieve bodem van kwelgebieden chemische omzettingen kunnen plaatsvinden. Door deze complexe interacties is het lastig om generieke grenswaarden van stofconcentraties voor de bescherming van kwelafhankelijke natuurtypen op te stellen.

2

Verblijftijden en aanvoerfluxen van grondwater

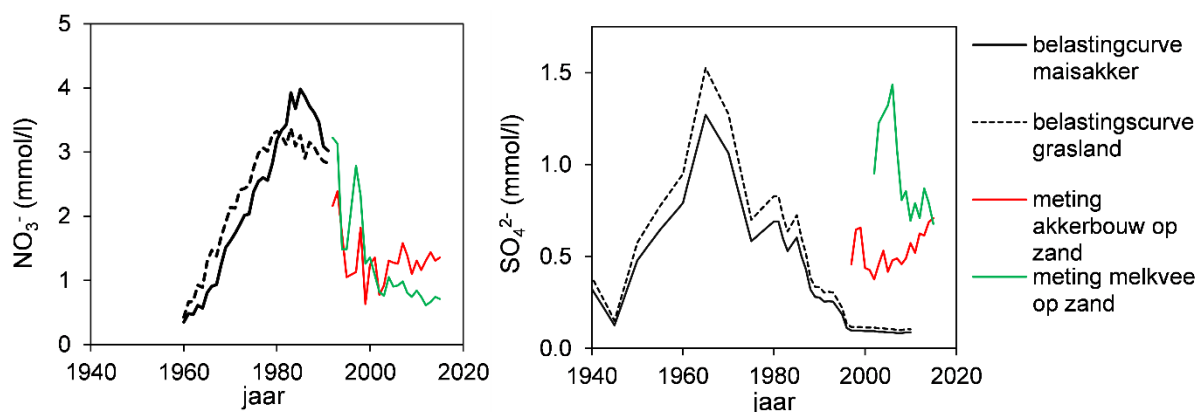
De tijdsduur van het grondwatertransport, vanaf het moment dat regenwater de bodem van het infiltratiegebied indringt totdat het uittreedt in een kwelzone (de reistijd), is vaak korter dan 50 tot 100 jaar en kan sterk verschillen tussen gebieden. Beekdalen met een klein intrekgebied (tot enkele honderden meters breed) hebben vaak een geringe reistijd, van enkele jaren tot ongeveer 30 jaar. Ook beekdalen met sterke ontwatering in het beekdal en/of infiltratiegebied hebben overwegend geringe reistijden (tot enkele tientallen jaren). Beekdalen die gevoed worden uit grotere infiltratiegebieden (breedte > 1 km) ontvangen echter naast jong grondwater ook grondwater dat ouder is dan 50 jaar.

Ook wat de omvang van kwelfluxen betreft, bestaat er grote variatie tussen gebieden. In regio's met weinig reliëf komen kwelfluxen voor van 0.1 tot ongeveer 10 mm/dag. In landschappen met grote hoogteverschillen kan de kwelflux lokaal tot enkele tientallen mm/d bedragen. De hoogste kwelfluxen treden op langs beekdalflanken en aan randen van laagten. In beekdalzones met sterke kwel (> 5 mm/d) treedt permanent of een groot deel van het jaar kwel op. Dit resulteert in veel transport van stoffen naar de bodemtoplaag. Ook in beekdalen met een periodieke kwel kan echter een aanzienlijke aanvoer van stoffen naar de bodemtoplaag plaatsvinden.

Nitraat- en sulfaatconcentraties in het grondwater

Nitraatconcentraties (NO_3^-) in het uitspoelingswater van infiltratiegebieden hangen niet alleen sterk af van de uitspoeling van stikstof uit de wortelzone, maar ook van de grondwaterstand in het infiltratiegebied. Droge bodems zijn gevoeliger voor nitraatuitspoeling dan bodems met een hoge grondwaterstand waar denitrificatie, de omzetting van NO_3^- in stikstofgas (N_2), plaatsvindt. Sinds het maximum in de jaren 1980 is de NO_3^- -concentratie in het ondiepe grondwater sterk gedaald (afbeelding 2). Op dit moment zorgen akkerbouwbedrijven gemiddeld voor een hogere nitraatuitspoeling dan melkveebedrijven [2]. Ammoniumconcentraties in het grondwater op de hoge zandgronden zijn doorgaans laag in verhouding tot NO_3^- -concentraties.

Het historische verloop van de atmosferische zwaveldepositie heeft grote invloed gehad op de concentratie sulfaat (SO_4^{2-}) in het grondwater [3]. Omdat sulfaat, net als nitraat, gemakkelijk uitspoelt, droeg de hoge zwaveldepositie gedurende de jaren '50-'80 van de vorige eeuw sterk bij aan verhoogde SO_4^{2-} concentraties in het grondwater. Sulfaatconcentraties in het uitspoelingswater en ondiepe grondwater in infiltratiegebieden zijn sterk gerelateerd aan landgebruik en bodemtype. Hoge concentraties werden gemeten in het uitspoelingswater onder zandgronden met akkers, graslanden en boomgaarden (afbeelding 2). Gedurende de periode 2002-2015 zijn SO_4^{2-} -concentraties in het uitspoelingswater onder zandbodems hoger dan de concentraties die verwacht worden op basis van atmosferische zwavel-depositie, mogelijk door een bijdrage van bemesting.



Afbeelding 2. Gemiddelde meetwaarden voor het verloop van nitraat- en sulfaatconcentraties in de periode 1920-2020 in het uitspoelingswater bij agrarisch gebruik (akkerbouw en melkvee op zand). Historische belastingscurves (voor nitraat tot 2000 beschikbaar) zijn gebaseerd op stofbalansberekeningen en grondwateraanvulling voor grasland en maisakker [3]. Daarbij zijn voor nitraat alle stofstromen meegenomen en voor sulfaat alleen de atmosferische depositie [4]

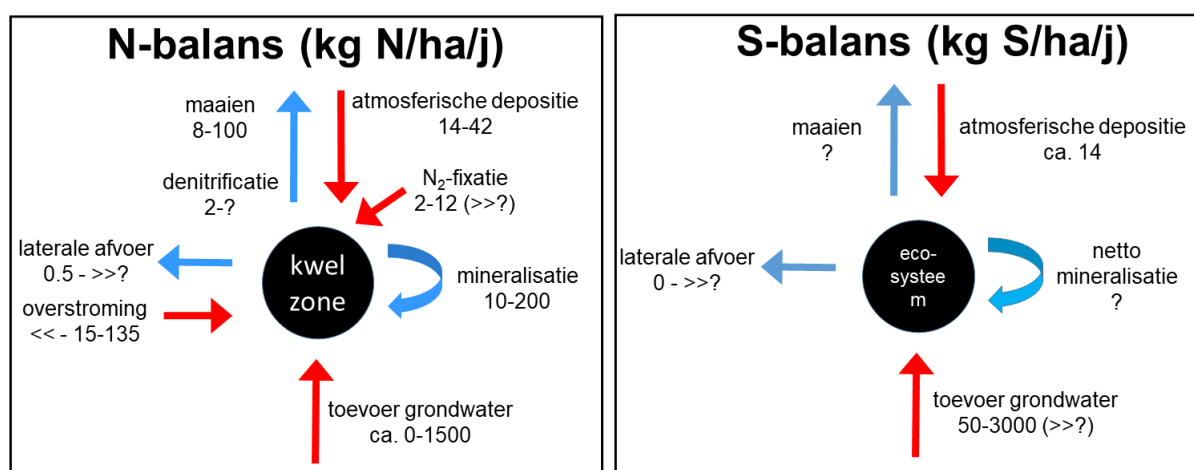
Belang chemisch bufferende vermogen van watervoerende pakketten

Niet al het NO_3^- en SO_4^{2-} in het uitspoelingswater wordt naar lager gelegen kwelzones gevoerd. Verschillende geochemische reacties in de ondergrond kunnen ervoor zorgen dat deze stoffen de kwelzone niet bereiken. Zo kan NO_3^- gedenitrificeerd worden (omgezet naar stikstofgas, N_2) door anaërobie afbraak van organisch materiaal en/of oxidatie van ijzersulfiden (bv. pyriet). In het tweede geval worden sulfaat en ijzer gevormd en met het grondwater meegevoerd naar de kwelzone. Sulfaat kan, zodra het verderop in een stroombaan in contact komt met organische stof en/of ijzerhydroxiden, gereduceerd worden tot sulfide. Deze redoxreacties vormen of consumeren zuur (H^+), en beïnvloeden daarmee de basenhuishouding en zuurgraad van het grondwater. Bij volledige pyrietoxidatie door nitraat komt zuur vrij, wat leidt tot oplossing van kalk. Als er geen kalk aanwezig is, of dit volledig is opgelost, leidt dit tot desorptie van basische kationen (Ca^{2+} en Mg^{2+}). Daarmee kan pyrietoxidatie leiden tot uitloging van kalk en basische kationen, waardoor een verhoogde calciumconcentratie van het grondwater tijdelijk is. Gezien de grote rol van zwavel in biochemische processen, is het voor de evaluatie van effecten van stofbelasting van kwelgebieden noodzakelijk om ook naar aanvoer van sulfaat te kijken.

De voorraad aan pyriet en reactieve organische stof, en daarmee het vermogen om nitraat- en sulfaatbelasting te bufferen, verschilt sterk per geologische afzetting [5]. Het bufferend vermogen voor nitraatreductie is laag in de zandregio's van midden-Nederland en Zuid-Limburg, waardoor nitraatrijk grondwater zich daar diep en ver langs de stroombaan kan verplaatsen. In de andere zandregio's (zuid, oost, noord) is het bufferend vermogen voor nitraatreductie groter. De omvang van het grondwatersysteem bepaalt ook hoeveel bufferend vermogen beschikbaar is, en, in combinatie met de belasting met reducerende stoffen, hoe lang het bufferend vermogen beschikbaar blijft.

Doorwerking van nitraat en sulfaat op beekdalen

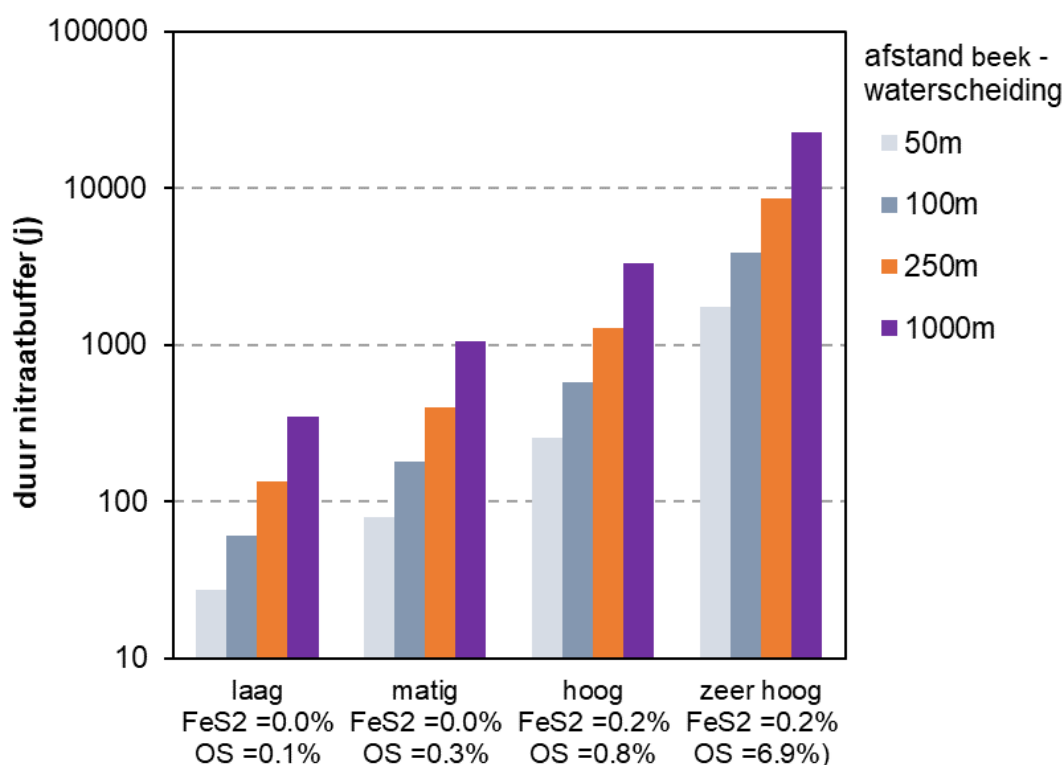
De aanvoer van nitraat en sulfaat naar kwelzones via grondwater uit landbouwgebied kan bij een combinatie van hoge concentraties en hoge kwelfluxen bijzonder groot zijn (afbeelding 3). In veel kwelzones is grondwater de grootste aanvoerpost van nitraat en sulfaat. In situaties met weinig denitrificatie in de ondergrond (i.e. lage gehalten pyriet en reactieve organische stof) is de N-belasting door toestroming van nitratrijk grondwater al bij kleine kwelfluxen enkele tot vele malen hoger dan de atmosferische N-depositie. De aanvoer van sulfaat is zelfs bij zeer lage kwelfluxen al veel groter dan de huidige atmosferische zwaveldepositie en wordt bij hogere kwelfluxen extreem hoog.



Afbeelding 3. De globale stofbalans van minerale stikstof en zwavel in kwelzones. Aanvoerfluxen door toestroming van grondwater zijn gebaseerd op dit onderzoek en kunnen zeer groot zijn. Andere stoffluxen zijn afkomstig uit diverse andere studies. Zo kan de stikstofbelasting door toevoer van grondwater vele malen groter zijn dan de atmosferische depositie. In grondwatersystemen waar de sulfaatconcentratie hoog is door denitrificatie, kan de zwavelbelasting extreem hoog zijn

Uitputten van de buffercapaciteit

Om eenvoudig en snel een globale inschatting te maken van de termijn (jaar, decennia, eeuwen, millennia) waarop de ondergrond niet meer in staat is om nitraat- en zuuraanvoer richting kwelzones te bufferen, is een eenvoudige, flexibele rekentool ontwikkeld [1]. Met basale informatie kan zo voor een hele range van grote tot kleine grondwatersystemen en geochemische eigenschappen (gehalte pyriet, organisch stof, kalk, klei) van watervoerende pakketten de ontwikkeling van de nitraat- en sulfaatconcentraties in het grondwater worden geschat. Met deze rekentool kan ook het effect van zuurvorming door oxidatie van pyriet op uitputting van de zuurbuffercapaciteit worden geëvalueerd. De modellering laat zien dat de nitraatbuffercapaciteit van de ondergrond veel eerder is verbruikt dan de zuurbuffercapaciteit. In kleine grondwatersystemen met een lage nitraatbuffercapaciteit, kan dit al na enkele decennia het geval zijn (afbeelding 4). Dit kan leiden tot een plotselinge toename van de nitraatconcentratie in de kwelzone. Bij grotere grondwatersystemen en grotere nitraatbuffercapaciteit door pyriet loopt die tijdsduur sterk op van circa één eeuw tot meerdere millennia. In die situaties zal een langdurige bijdrage van pyrietoxidatie aan denitrificatie gepaard gaan met een langdurig verhoogde sulfaatconcentratie. Een hoge nitraatbuffercapaciteit voorkomt daarmee dus niet dat er voor ecosystemen nadelige effecten van nitraatuitspoeling kunnen optreden.



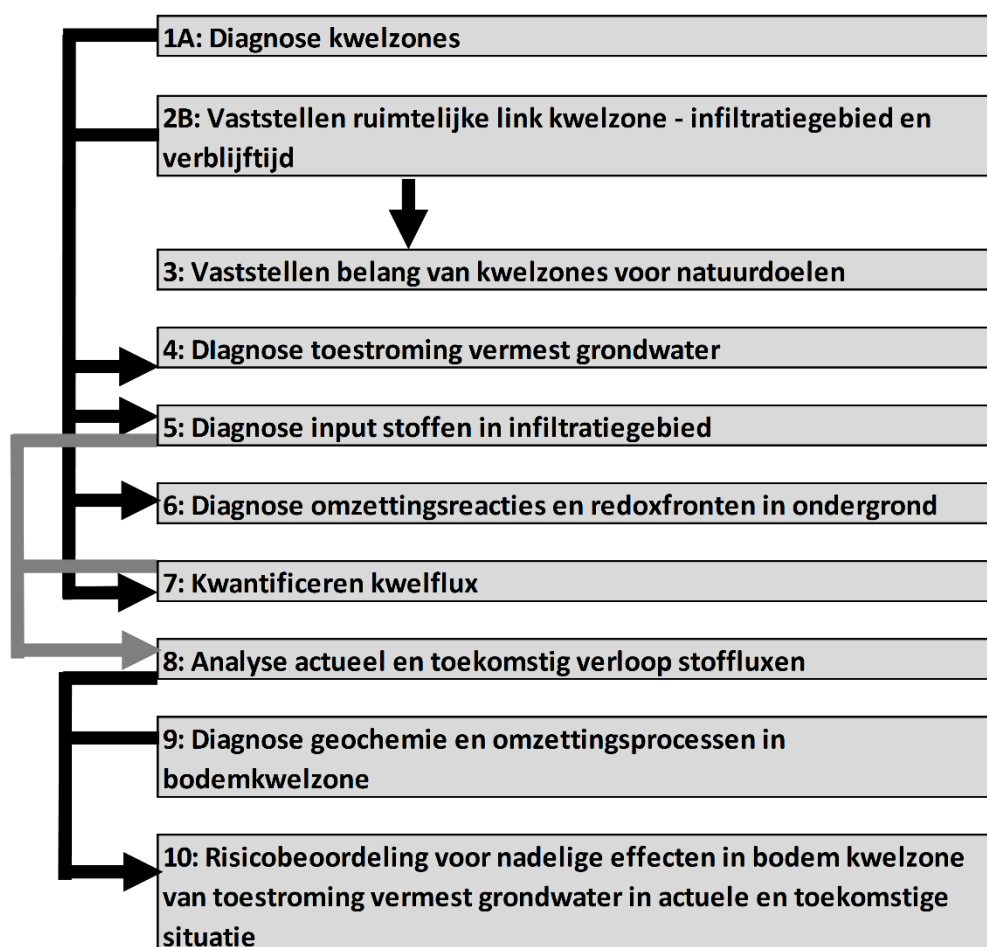
Afbeelding 4. Tijdduur voordat nitraatbuffering in de ondergrond is verbruikt voor situaties die verschillen in geochemie van de ondergrond en omvang van het grondwatersysteem. De nitraatbuffercapaciteit varieert van laag tot zeer hoog op basis van verschillen in gehalten van pyriet (FeS₂) en organische stof (OS)

Gevolgen aanvoer nitraat en sulfaat op condities van kwelzones

Uit chemische balansberekeningen blijkt dat nitraat- en sulfaatrijk grondwater potentieel grote effecten heeft op biochemische processen in bodems met kwel. In de eerste plaats zorgt de toevoer van de oxiderende stoffen nitraat en sulfaat voor een verhoogde afbraak van organische stof in de kwelzones zelf. Bij hogere kwelfluxen (> 5 mm/d) kan de voorraad organische stof in zand- en dunne veenbodems (< 50 cm) binnen 1 tot 100 jaar zijn verdwenen. Zulke snelle afbraak zorgt ook voor hoge stikstofmineralisatie en het vrijkomen van voedingsstoffen. Sulfaat dat de bodem van een kwelzone bereikt, kan daar worden gereduceerd tot sulfiden in combinatie met anaerobe afbraak van organische stof. Door de vorming van ijzersulfiden worden ijzerhydroxiden verbruikt, wat leidt tot een verhoogde beschikbaarheid van fosfaat dat daaraan was geadsorbeerd. In ijzerarme bodems kan de voorraad ijzerhydroxiden door toestroming van sulfaatrijk grondwater binnen enkele jaren uitgeput raken. In ijzerrijke bodems treedt zulke uitputting op een korte tot lange termijn op (enkele jaren tot eeuwen), afhankelijk van de aanvoerflux van grondwater. De vorming van ijzersulfiden kan bij een hoge aanvoerflux (> 5 mm/d) ook snel (1-20 jaar) zorgen voor een dusdanige opbouw van verzuringscapaciteit dat deze de zuurbuffercapaciteit van de bodem overschrijdt. In bodems met relatief weinig organische stof kan dat ook bij lagere aanvoerfluxen (1-5 mm/d) al snel gebeuren. De aanvoer van sulfaatrijk grondwater bouwt daarmee een 'zuurbom' op die in droge zomers 'afgaat' door zuurstofintreding bij diepere waterstanden. Dat leidt tot oxidatie van de opgehoopte sulfiden. Deze schattingen geven aan dat ecosystemen met veenvorming, die afhankelijk zijn van een hoge basenrijkdom en lage nutriëntenrijkdom, erg gevoelig zijn voor nitraatuitspoeling in het bovenstroomse infiltratiegebied.

Beoordelingsmethode effecten op kwelafhankelijke natuurtypen

Uit het bovenstaande blijkt dat bij de beoordeling van de effecten op natuur in kwelzones niet alleen stofconcentraties van nitraat en sulfaat van belang zijn, maar ook de stofbelasting op kwelzones. Daarom is het nodig te kunnen beoordelen wanneer er sprake is van een probleem met de toestroming van stoffen met het grondwater voor grondwaterafhankelijke natuurtypen in beekdalen. Hiervoor is een stroomdiagram opgesteld (afbeelding 5). Het belang van kwelzones voor natuurdoelen wordt op gebiedsniveau bepaald (stappen 1 t/m 3), terwijl de risicobeoordeling voor belastende stoffen in grondwater (stappen 4 t/m 8) betrekking heeft op de ondergrond op een groter schaalniveau. Dit stappenplan moet verder worden uitgewerkt en getest in concrete situaties.



Afbeelding 5. Stroomdiagram voor een risicobeoordeling voor de effecten van aangevoerde stoffen in grondwater op kwelafhankelijke natuur

Conclusies en aanbevelingen voor beleid

In kwelzones van beekdalen met een hoge kwelflux van grondwater uit agrarisch gebied is sprake van (zeer) hoge stoffluxen van nitraat en/of sulfaat. Toestroming van vervuild grondwater vormt de grootste aanvoer van stikstof en zwavel in kwelafhankelijke ecosystemen en is daarmee een groot knelpunt voor natuur in beekdalen. De hoge aanvoer van deze stoffen via grondwater heeft een groot effect op de bodemchemie in kwelzones en kan leiden tot sterke verzuring (zuurbom tijdens droge perioden) en het vrijkomen van voedingsstoffen (fosfaatmobilisatie en mineralisatie van organisch materiaal).

Vooralsnog ontbreekt een onderbouwing voor grenswaarden voor aanvoer van stoffen via grondwater op basis van metingen. De uitgevoerde balansberekeningen in deze studie houden er (nog) geen rekening mee dat een deel van het aangevoerde nitraat en sulfaat onveranderd de kwelzone verlaat. Bij de combinatie van een (relatief) trage omzettingssnelheid en hoge kwelflux kunnen nitraat en sulfaat immers worden afgevoerd met het uitgetreden grondwater en het oppervlaktewater belasten. De balansberekeningen geven daarom vooral een eerste indruk van de potentiële consequenties in kwelzones. Er is verdiepend onderzoek nodig naar de effecten van stofbelasting op biogeochemische processen en vegetatie in kwelzones.

De beoordeling van effecten van (veranderd) landgebruik op de geochemie en ecologie in kwelzones is complex. Dat komt door omzettingprocessen langs de stroombaan, de complexe waterhuishouding in beekdalen en grote ruimtelijke variabiliteit van kwelfluxen en geochemische eigenschappen in de ondergrond. Het bepalen van deze effecten vereist een gebiedspecifieke aanpak en lokale metingen. Een werkbare alternatieve aanpak kan zijn door met eenvoudige rekentools in combinatie met hydrologische modellen, zones in het infiltratiegebied te lokaliseren die sterk bijdragen aan de stofflux van nitraat en sulfaat naar beekdalen. Op basis hiervan kunnen lokale maatregelen worden genomen. Waar in en rond beekdalen noodzakelijke maatregelen worden genomen om de kwelflux te verhogen, is het ook belangrijk om verdrogingsbestrijding te combineren met maatregelen ter vermindering van de nitraat- en sulfaatuitspoeling naar het grondwater.

Actuele regelgeving ten aanzien van de grondwaterkwaliteit houdt onvoldoende rekening met de (potentiële) ecologische effecten van vervuild grondwater in kwelzones. De Kaderrichtlijn Water (KRW), stelt EU-lidstaten daartoe wel verplicht: alle grondwaterlichamen dienen uiterlijk in 2027 in 'goede toestand' verkeren. Dit onderzoek laat zien dat het gevolg van de toestroom van nitraat en sulfaat via het grondwater voor de natuur in kwelzones (zeer) groot kan zijn en die 'goede toestand' niet bereikt wordt. Met het oog op het behalen van KRW- en Natura 2000-doelstellingen in beekdalen, wordt bestuurders en beleidsmakers daarom aangeraden om aanvullende omgevingsvereisten voor landbouw-gerelateerde stoffen in grondwater op te stellen.

Dankwoord

Dit onderzoek is tot stand gekomen met een financiële bijdrage uit het OBN-onderzoeksprogramma en bijdragen van de provincies Drenthe, Limburg, en Overijssel.

Referenties

1. Aggenbach, C.J.S., Nijp. J.J., Huyghe, P., & Diggelen R. van (2020). *Invloed van met nutriënten verrijkt grondwater op kwelafhankelijke ecosystemen*. Rapport nummer 2020/OBN242-BE, VBNE, Driebergen.
2. Fraters, B. et al. (2020). *Landbouwpraktijk en waterkwaliteit in Nederland; toestand (2016-2019) en trend (1992-2019). De Nitraatrapportage 2020 met de resultaten van de monitoring van de effecten van de EU Nitraatrichtlijn actieprogramma's*. Rapport 2020-0121, RIVM, Bilthoven.
3. Jonge, M. de, Lagendijk, V., Raat, K.J. & Vink, C. (2007). *Testcase Respond. Goor, Herikerberg, Holten*. Rapport Vitens Watertechnologie.
4. <https://www.rivm.nl/landelijk-meetnet-effecten-mestbeleid>, juli, 2020.

5. Griffioen, J., Klaver, G. & Westerhoff, W. (2016). 'The mineralogy of suspended matter, fresh and Cenozoic sediments in the fluvio-deltaic Rhine–Meuse–Scheldt–Ems area, the Netherlands: An overview and review'. *Netherlands Journal of Geosciences*, 95, 23-107.