



Bronnetjesbos Terziet, april 2016. Foto: Hans de Mars.

Nederlandse kalktufbronnen, de meest vervuilde bronnen van Europa

Kalktufbronnen zijn in Nederland alleen in Zuid-Limburg te vinden. Ze vormen een intrigerend type bronmilieus omdat daarin sprake is van de neerslag van kalk op alles wat met het bronwater in aanraking komt (kader 1). In ons land, maar ook in de rest van Europa, wordt dit bijzondere brontype bedreigd door grondwatervervuiling, verdroging en verstoring. Daarom is het in Europees verband aangewezen als een Prioritair Habitatype. Het biedt onder meer plaats aan een bijzondere mosflora. Dit artikel gaat vooral in op de nitraat- en fosfaatbelasting van de Zuid-Limburgse kalktufbronnen in vergelijking met kalktufbronnen in ons omringende landen.

Hans de Mars, Gijs van Dijk, Bas van der Weijden, Ab Grootjans & Fons Smolders

Vooralsinds de aanwijzing als habitatype staan de kalktufbronnen in Europa in de belangstelling. Het is een habitatype dat in ons land alleen in het Zuid-Limburgse heuvelland voorkomt. Al snel werd hier ook de forse nitraatvervuiling van het grondwater aan de orde gesteld dat deze bronnen voedt (Hendrix & Meinardi, 2004; Smolders et al., 2014; De Mars et al., 2015). Metingen van het nitraatgehalte in het bronwater in Zuid-Limburg lieten vanaf 1975 een sterke stijging zien (Hendrix & Meinardi, 2004; De Mars et al., 2015). Het hoogtepunt qua belasting werd bereikt rond 1990-2000. Nadien leek de nitraatvervuiling van het bronwater weer af te nemen. Helaas is deze

dalende trend omstreeks 2010 tot stilstand gekomen op een niveau dat nog steeds veel hoger ligt dan voor 1975. In het licht van de geformuleerde instandhoudingsdoelen voor dit habitatype en de daarvoor benodigde herstelmaatregelen, rees de vraag dan ook of de huidige belastingniveaus van het bronwater een serieuze bedreiging zijn voor dit habitatype en bovenal, welke nitraatconcentratie voor de mosflora (kader 2) in de Zuid-Limburgse kalktufbronnen dan nog wel acceptabel zou zijn.

Voorkomen in Zuid-Limburg

Kalktufbronnen komen vooral voor in de N2000 gebieden van het Bunder- en

Elslooërbos, de Noorbeemden en plaatselijk in het stroomgebied van de Geul en de Geleenbeek. Voor elk van deze gebieden zijn instandhoudingsdoelen vastgesteld (tabel 1).

Lang niet alle kalktufbronnen in die gebieden zijn ook daadwerkelijk aangewezen als habitatype. Al slaat er kalktuf neer, vaak zijn de betreffende mossoorten er niet of nauwelijks aanwezig of is het oppervlak te beperkt.

Opvallend is dat de meeste kalktufbronnen in het Löss-district liggen. Hier worden de bronnen gevoed vanuit grindhoudende Pleistocene afzettingen die zijn afgedekt met een dikke lösslaag. Hierbij fungeert de

Kader 1. Kalktufbronnen en kalktufvorming

Kalktufbronnen zijn bronnen waarin kalk (CaCO_3) neerslaat op alles dat met het bronwater in aanraking komt. Die neerslag wordt aangeduid als kalktuf. Kalktufvorming doet zich alleen voor op plaatsen waar basisch grondwater (pH 7-8,5) aan de oppervlakte treedt met een overmaat aan calcium (Ca^{2+}) en bicarbonaat (HCO_3^-). Deze componenten vormen een labiel evenwicht met het ook in het water opgeloste kooldioxide en vaste kalk (CaCO_3) volgens de onderstaande chemische evenwichtsreactie:

$$\text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-) \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}.$$

Bij kalktufbronnen is de kooldioxide concentratie in het grondwater altijd beduidend hoger dan die in onze atmosfeer. Ondergronds kan kooldioxide, dat ontstaat door biogeochemische afbraakprocessen, namelijk niet meer ontwijken naar de atmosfeer, bijvoorbeeld door een bovenliggend dik lösspakket dat dit verhindert. Het hoopt zich daardoor op in het grondwater in de vorm van koolzuur (H_2CO_3). Zoals de naam al aangeeft lost dit zuur daarbij ook kalk op en wordt zo deels geneutraliseerd. Het resultaat zijn de hoge calcium- en bicarbonaatgehalten in het grondwater. Treedt dat water aan de oppervlakte dan begint kooldioxide (CO_2) alsnog te ontwijken naar de atmosfeer. Het gevolg is dat het bronwater oververzadigd raakt met kalk dat vervolgens neerslaat. Het resultaat is een afname van de calcium- en bicarbonaatconcentratie, terwijl de pH oploopt (Arp et al., 2010). Afhankelijk van de plaatselijke situatie kan dat zich soms opvallend snel voltrekken. Op de steilere hellingen waar het afstromende bronwater door de turbulentie sterker wordt belucht, kan kooldioxide snel ontwijken. Over een afstand van minder dan tien meter leidt dat dan al tot meetbare verschillen in pH en bicarbonaatconcentratie.

löss als de kalkleverancier voor de kalktufbronnen (Beckers, 1924; Smolders et al., 2014). Kalksteenlagen zijn in dit gebied afwezig. Alleen de bronnen in de Noorbeemden, die op de Putberg (Kunrade) en bij Terziet (Epen) worden gevoed vanuit een kalksteenpakket.

Meestal ligt het habitatype ingebed tussen Alluviale (bron)bossen, eveneens een bedreigd habitatype. In het buitenland worden kalktufbronnen daarnaast ook wel aangetroffen in basenrijke veenmoerassen waaronder kalkmoeras. Zuid-Limburg

N2000-GEBIED	DOEL AREAAL	DOEL KWALITEIT
Bunder- & Elslooërbos	Behoud	Verbetering
Noorbeemden & Hoogbos	Behoud	Verbetering
Geuldal (o.a. Terziet, Ravensbos)	Behoud	Behoud
Kunderberg (Putberg)	Behoud	Behoud

Tabel 1. Instandhoudingsdoelen Kalktufbronnen (H7220) in de daarvoor aangewezen Nederlandse N2000-gebieden.

herbergt hiervan slechts enkele fragmentaire voorbeelden (Weustenrade, Ravensbos). Dat heeft er ook toe geleid dat voor de identificatie van het habitatype kalktufbron in de omliggende Europese landen ook mossoorten worden opgegeven die wij in ons land uitsluitend kennen van het basenrijke (veen)moeras en duinvallen (tabel 2). De kleinschaligheid en de verwevenheid met andere habitats heeft er in Nederland voor gezorgd dat dit bijzondere habitatype pas betrekkelijk laat is onderkend (Van Gennip et al., 2008; De Mars et al., 2016).

Onderzoek bronwaterkwaliteit

Voor de instandhouding en het herstel van de kalktufbronnen is het belangrijk om te weten welke nitraat- maar ook fosfaatconcentraties in het bronwater maximaal toelaatbaar zijn, de grenswaarde. De grenswaarde is de concentratie waarboven negatieve effecten op de staat van instandhouding van het habitatype optreden, of niet langer uitgesloten kunnen worden.

In Zuid-Limburg zijn niet of weinig vervuilde bronnen niet meer te vinden (Hendrix & Meinardi, 2004), waardoor de bepaling van die grenswaarde niet mogelijk is. Daarom zijn in eerste instantie waterkwaliteitsgegevens opgespoord van kalktufbronnen in het 'laagland' van Europa (<500m hoog), bij voorkeur in combinatie met de aanwezige, voor dit brontype karakteristieke mossen (tabel 2). In het verlengde hiervan werden enkele grotere databestanden verkregen afkomstig uit Zuid-Limburg (Waterschap Limburg, Roermond), Vlaanderen (INBO, Brussel), Wales (British Geological Survey, Cardiff), Polen, Slowakije en Litouwen (West Pomeranian University of Technology, Szczecin). Dit leverde gegevens op van in totaal 102 verschillende kalktufbronnen. Niet alle gegevens bleken echter op alle gewenste onderdelen compleet. Zo ontbraken geregeld bepaalde waterkwaliteitsparameters of een specificatie van de soortensamenstelling van de mosflora. Dit databestand geeft een goed inzicht in de hydro-chemische bandbreedte waaronder

kalktufbronnen voorkomen, maar door het ontbreken van meer ecologische gegevens konden de grenswaarden hiermee niet worden afgeleid.

Om toch over een voldoende robuuste dataset te beschikken op grond waarvan de bepaling van grenswaarden wel mogelijk was, werd begin 2016 een aanvullende bemonstering uitgevoerd in 51 kalktufbronnen in Zuid-Limburg, de Voerstreek, Belgisch Lotharingen (Wallonië), Kalk-Eifel, Luxemburg, op het Plateau van Langres (Frankrijk) en in het Teutoburgerwoud en Saarland in Duitsland (fig. 1).

Vanuit Zuid-Limburgs perspectief gaat het om de dichtstbijzijnde, landschappelijk vergelijkbare gebieden met kalktufbronnen in het Noordwest-Europese laagland. In deze gebieden zijn zowel op het oog goed ontwikkelde bronnen als zichtbaar verstoorde bronsystemen bemonsterd, waarbij de gegevens over waterkwaliteit, debiet, expositie en het voorkomen van mossen op uniforme wijze zijn verzameld. Het landgebruik binnen de globaal ingeschatte intrekgebieden van deze bemonsterde bronnen loopt uiteen van grotendeels agrarisch gebied tot intrekgebieden die grotendeels uit natuurgebied bestaan (bos, extensieve landbouw). In combinatie met de overige gegevens kwam zo een dataset tot stand met informatie van in totaal 153 verschillende bronnen uit 10 landen (fig. 2) die een range omvat van nagenoeg onbelaste - tot sterk belaste kalktufbronnen.

Uitkomsten

Kijkend naar alle kalktufbronnen (n=153) wijst uit dat de bandbreedte voor de pH tussen 7,0 en 8,7 ligt. Tussen de verschillende regio's/landen zijn daarbij geen wezenlijke verschillen te zien. Opvallend genoeg blijken dat de Nederlandse kalktufbronnen echter samen met die van Vlaanderen tot de mineraalrijkste kalktufbronnen van Europa te behoren (fig. 3). Verder blijkt ook dat Zuid-Limburg de uiterst twijfelachtige eer heeft om plaats te bieden aan de zwaarst vervuilde kalktufbronnen. Zo bevat het bronwater gemiddeld 85 mg/l nitraat (1360 $\mu\text{mol NO}_3^-/\text{l}$)



Fig. 1. Globale ligging van de aanvullend bemonsterde bronnen (n=51) in Zuid-Limburg, België, Duitsland, Noordoost Frankrijk en Luxemburg waarvan de gegevens benut zijn voor de bepaling van grenswaarden.

met lokaal uitschieters tot zelfs 200 mg NO_3^-/l (fig. 4; De Mars et al., 2016). Dat is maar liefst viermaal hoger dan de norm van de Europese Nitraatrichtlijn. De concentraties liggen in Wallonië, Duitsland, Frankrijk en Wales beduidend lager, gemiddeld maar 10-20 mg NO_3^-/l . Alleen in Vlaanderen, inclusief de Voerstreek, zijn ook relatief hoge nitraatgehaltes (gem. 40 mg/l) aangetroffen (zie ook Oosterlynck & De Bie, 2000). Die liggen daarmee echter nog altijd beduidend lager dan in Nederlands Zuid-Limburg. Het grootste deel van de hoge stikstofvracht van de Zuid-Limburgse

bronnen laat zich hier herleiden tot de intensief bemeste landbouwgronden op de bovenliggende plateaus. De bijdrage vanuit N-depositie aan de nitraatbelasting van het grondwater bedraagt namelijk hooguit 5 a 10% (Bobbink & Van Dijk, 2017).

Hoewel kalk geacht wordt om fosfaat aan zich te binden blijken ondanks de zeer kalkrijke omstandigheden ook de ortho-fosfaatgehalten in de Zuid-Limburgse kalktufbronnen (orde 0,05-0,12 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$), significant hoger te zijn dan elders in het Europese onderzoeksgebied (<0,05 mg

Kader 2. Mossen als kalktufvormers

Algen en mossen die in de bronnen groeien, blijken actief en passief de vorming van kalktuf te kunnen bespoedigen (Pentecost, 2005). Actief door het opnemen van koolzuur uit het bronwater. Ze beïnvloeden daarmee het labiele chemische evenwicht, waardoor op het mos kalktuf neerslaat. In passieve zin zorgen vooral de mossen door hun groeivorm voor een uitgebreid fijnmazig raamwerk waarop zich kalktuf kan afzetten. Als gevolg daarvan raken de mossen verkalkt en voelen knisperend aan. Groeien de mossen te langzaam dan raken ze volledig bedolven door kalktuf. Slechts een beperkt aantal mossen is in staat onder die vrij extreme condities te kunnen groeien (tabel 2). In Europa zijn geveerd diknerfmos (*Palustriella commutata*) en tufmos (*Eucladium verticillatum*) de meest typerende. In Zuid-Limburg is de eerstgenoemde soort zeldzaam (Van Dort et al., 2012), terwijl tufmos in 2016 alleen in de bron op de Putberg bij Kunrade werd aangetroffen. Tot op heden de enige bron waarvan ze in Nederland bekend is. De Zuid-Limburgse kalktufbronnen worden vooral gekarakteriseerd door gewoon diknerfmos (*Cratoneuron filicinum*), beekdikkopmos (*Brachythecium rivulare*), gekroesd plakkaatmos (*Pellia endiviifolia*) en soms geveerd diknerfmos. Daarnaast komen er nog enkele algemene, begeleidende soorten voor, zoals gerimpeld boogsterrenmos (*Plagiomnium undulatum*), kleisnavelmos (*Oxyrrhynchium hians*) en gewoon dikkopmos (*Brachythecium rutabulum*). Hoewel in ons omringende landen de diversiteit duidelijk hoger is, vooral aan voor Nederland meer bijzondere soorten, worden 'onze' mosvegetaties toch nog gerekend tot het *Cratoneuron commutati* (Van Gennip et al., 2008; Van Dort & Weeda, 2017). Tot de frequent aanwezige vaatplanten in dit habitatype behoren paarbladig goudveil, bittere veldkers en, hoewel zelden in grote aantallen, robertskruid (Van Dort et al., 2012; De Mars et al., 2016).

$\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$). Door deze verhoogde beschikbaarheid is er in de Zuid-Limburgse regio meer kans op eutrofiëring en vervuiling van het bronmilieu, bijvoorbeeld door grote brandnetel en vlotgrassen. Het voorgaande plaatst ook de eerdergenoemde, hoge $\text{Ca}+\text{Mg}$ concentraties van onze Zuid Limburgse bronnen in een ander daglicht. Die blijken bij nadere beschouwing eveneens een vervuilingssymptoom te zijn en het resultaat te zijn van decennia overmatige (kalk)bemesting (De Mars et

Tabel 2. Opgegeven karakteristieke mossen en kranswieren van de Europese kalktufbronnen in het laagland (<500m)

Geveerd diknerfmos	(<i>Palustriella commutata</i>)	Groot staartjesmos	(<i>Philonotis calcarea</i>)
Gekromd diknerfmos	(<i>Palustriella falcata</i>)	Groen schorpioenmos	(<i>Scorpidium cossonii</i>)
Tufmos	(<i>Eucladium verticillatum</i>)	Gewoon diknerfmos	(<i>Cratoneuron filicinum</i>)
Veenknikmos	(<i>Bryum pseudotriquetrum</i>)	Gekroesd plakkaatmos	(<i>Pellia endiviifolia</i>)
Beekdikkopmos	(<i>Brachythecium rivulare</i>)		
Sterrengoudmos	(<i>Campylium stellatum</i>)	Gewoon kransblad	(<i>Chara vulgaris</i>)
Geel schorpioenmos	(<i>Hamatocaulis vernicosus</i>)		

Opgesteld op basis van de Vlaamse, Franse, Duitse, Luxemburgse en de Europese beschrijving van het habitatype

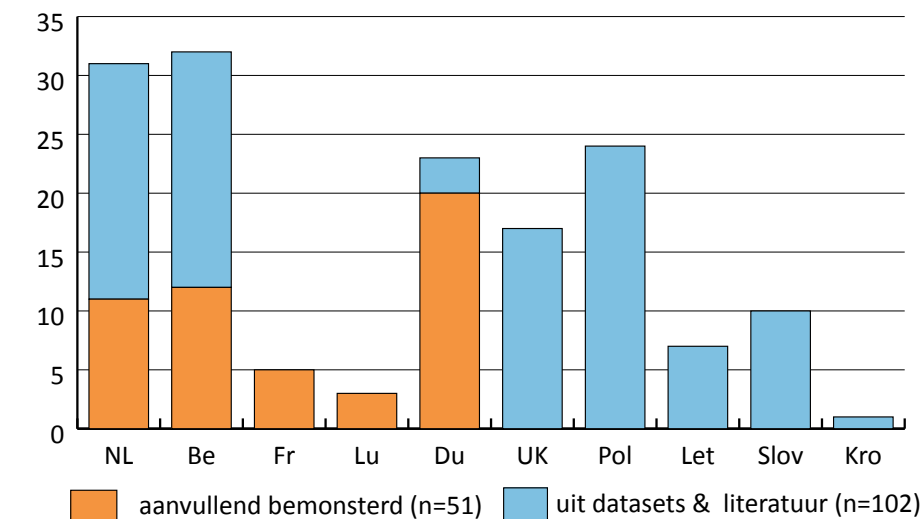


Fig. 2. Per land het aantal bronnen met waterkwaliteitsgegevens in de dataset (n=153). NL: Nederland; BE: België; FR: Frankrijk; LU: Luxemburg; DE: Duitsland; UK: Verenigd. Koninkrijk; PL: Polen; LV: Letland; SL: Slowakije; CR: Kroatië;

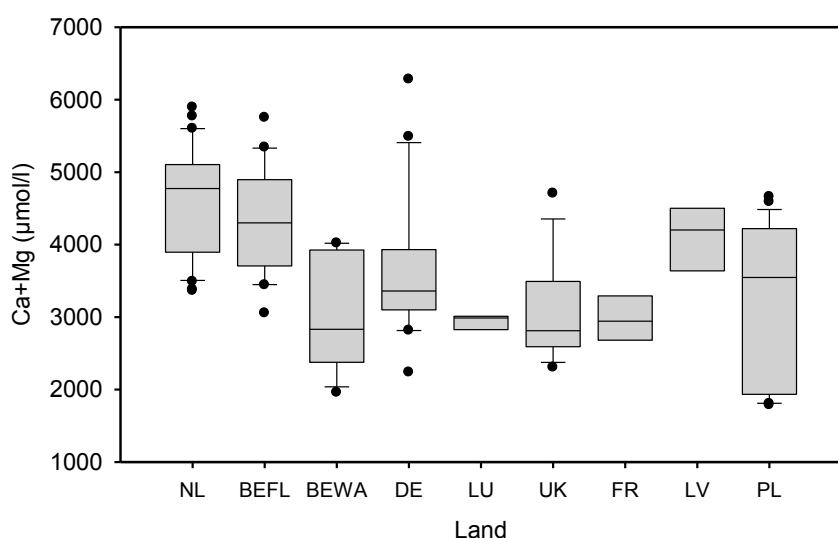


Fig. 3. Boxplots van het Calcium+Magnesium gehalte (µmol/l) in het kalktufbronwater in Zuid-Limburg (NL), Vlaanderen en elders in -Europa (n=137). De grijze box geeft de 50 (gemiddelde waarde) en 25 en 75 percentiel van de waarden in de betreffende dataset. Het 10 en 90 percentiel is als streep getekend. Uitschieters in een dataset zijn als aparte stippen getekend. Aantal locaties per land: NL=31, Be=32 (BE-FL=20 en BE-WA=12), DE=23, LU=3, UK=12, FR=5, LV=7, PL=24 (BE.FL = België - Vlaanderen, BE.WA = België - Wallonië).

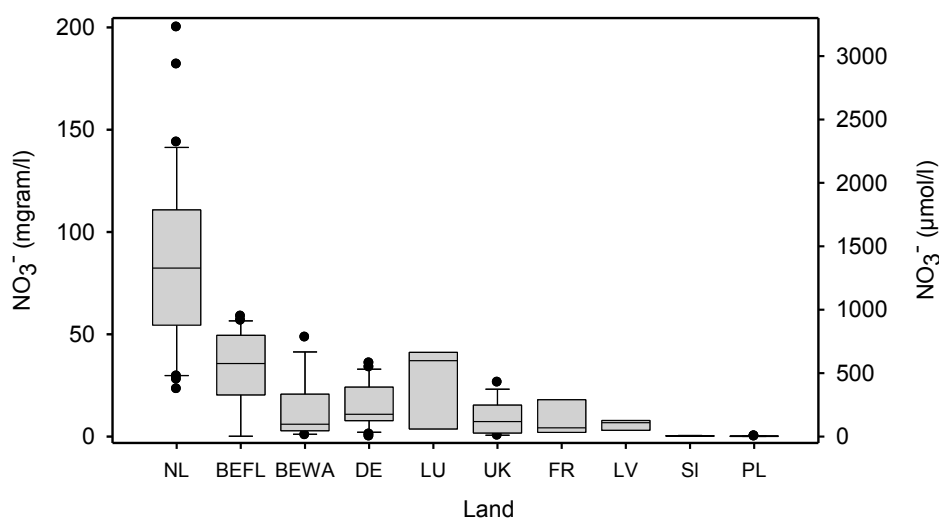


Fig. 4. Boxplots van het nitraatgehalte in het kalktufbronwater per land (n=135). De grijze box geeft de 50 (gemiddelde waarde) en 25 en 75 percentiel van de waarden in de betreffende dataset. Het 10 en 90 percentiel is als streep getekend. Uitschieters zijn als aparte stippen getekend. Aantal locaties per land: NL=31, Be=32 (BE-FL=20 en BE-WA=12), DE=23, LU=3, UK=12, FR=5, LV=7, SI=10, PL=12 (BE.FL = België - Vlaanderen, BE.WA = België - Wallonië).

al., 2016). Onze kalktufbronnen staan er dus nog beroerder voor dan werd gedacht.

Naar grenswaarden

Om grenswaarden te bepalen voor nitraat en ortho-fosfaat is de methode van de Britse Technische Adviescommissie voor de Kaderrichtlijn Water (UKTAG, 2012) gehanteerd. Die methode maakt voor het bepalen van grenswaarden gebruik van drie verschillende kwaliteitsklassen, te weten slecht, matig en goed, die in ecologische zin moeten worden gedefinieerd. Per klasse kan dan een grenswaarde worden bepaald, gebaseerd op de 75 percentiel van de waarden in die betreffende klasse. De grenswaarde van de goed ontwikkelde klasse is dan tevens de referentiewaarde. Voor de kalktufbronnen zijn die drie klassen door ons afgeleid aan de hand van de gemaakte mosopnamen. De dataset van de 51 bemonsterde kalktufbronnen bevat in totaal 45 mossoorten. Vijf daarvan worden gerekend tot de voor het habitatype karakteristiek geachte soorten die ook statistisch gezien in voldoende mate vertegenwoordigd zijn in het databestand. Deze soorten kunnen worden gebruikt voor het bepalen van de grenswaarden, te weten:

- Gewoon diknerfmos
- Geveerd diknerfmos
- Tufmos
- Beekdikkopmos
- Gekroesd plakkaatmos

De volgende stap was om na te gaan hoe de individuele mossoorten reageren op de nutriëntenbelasting van het bronwater. Daarvoor werd een Redundancy analyse (RDA) uitgevoerd. Hiermee werd de mosflora van alle kalktufbronnen statistisch geanalyseerd en uitgezet in een meerdimensionale ruimte tegen alle aanwezige milieuvariabelen in het databestand. Hieruit bleek dat gewoon diknerfmos en geveerd diknerfmos zich als elkaars tegenpolen gedroegen. Een nadere statistische analyse (lineaire regressie) wees zelfs uit dat de presentie en bedekking van gewoon diknerfmos significant toeneemt met een toenemende nitraat- en fosfaatbelasting (NO_3^- $p=0,003$; PO_4^{3-} $p=0,02$). Hoewel deze soort deel uitmaakt van het soortenpalet van de Europese kalktufbronnen, kan gewoon diknerfmos dus niet zonder meer worden gebruikt als indicator voor habitatkwaliteit. Ze lijkt eerder een indicator van een verslechterende (water)kwaliteit. De soort is daarmee

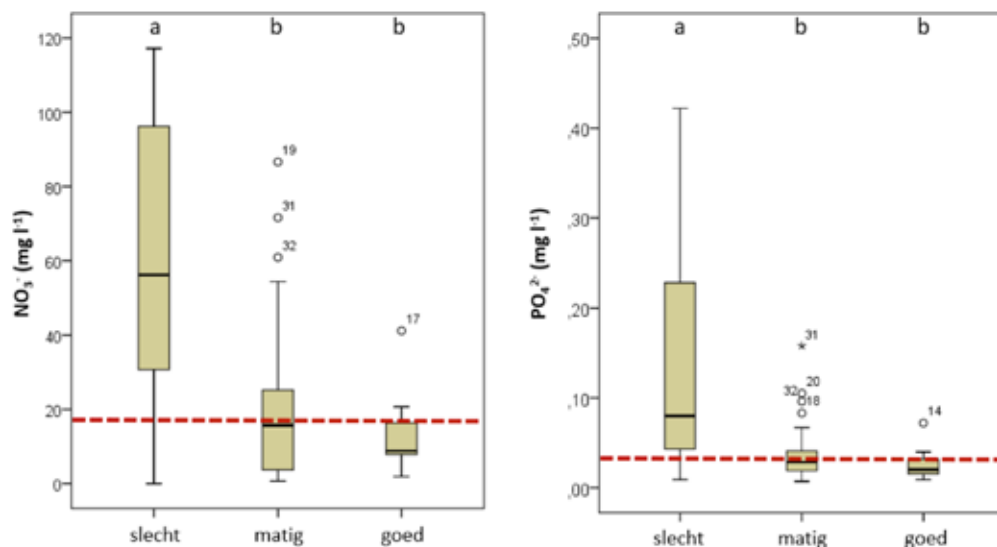


Fig. 5. Boxplots voor het nitraat- en ortho-fosfaatconcentratie in kalktufbronnen (n=51) voor de drie onderscheiden kwaliteitsklassen (slecht, matig, goed). Met de rode lijn is de referentiewaarde voor de goed ontwikkelde kalktufbronnen weergegeven. - nitraat: 18 mg NO₃⁻/l; ortho-fosfaat: 0,04 mg PO₄³⁻/l. Indien de letters boven de kolommen onderling verschillen is sprake van een significant verschil tussen de betreffende klassen

ongeschikt voor de afleiding van grenswaarden voor een goede habitatkwaliteit. Om de drie kwaliteitsklassen binnen het bestand te kunnen definiëren, resteren daarmee dus vier relatief kritische mossen, te weten geveerd diknerfmos, beekdikkopmos, tufmos en gekroesd plakkaatmos. Deze soorten indiceren vaak de soortenrijkere en beter ontwikkelde tufbronnen binnen ons bestand. Geveerd diknerfmos en tufmos zijn binnen Europa vrijwel beperkt tot dit biotoop. Met andere woorden, het zijn indicatoren van een goede staat van instandhouding. De RDA liet al zien dat deze soorten gekoppeld zijn aan voedselarmere condities, hoewel deze relatie voor tufmos en beekdikkopmos statistisch niet significant was. Geveerd diknerfmos bleek juist sterk significant gecorreleerd te zijn met nitraat- en fosfaat-arm bronwater (NO₃⁻ p=0,003; PO₄³⁻ p=0,012). Gekroesd plakkaatmos, een soort die een bredere ecologische amplitude heeft dan alleen kalktufbronnen, vertoonde een meer ambivalent gedrag. Haar aanwezigheid correleerde alleen positief met de ortho-fosfaatconcentratie (p=0,02). Dat doet een voorkeur voor enige verrijking met fosfaat vermoeden. Daarmee lijkt ze evenmin geschikt als een echte kwaliteitsindicator. Er konden na deze soortgerichte analyse uiteindelijk dus maar drie van de vijf soorten worden geselecteerd voor het habitatype, te weten geveerd diknerfmos,

beekdikkopmos en tufmos. Alle 51 bemonsterde kalktufbronnen zijn op basis van het voorkomen van de geselecteerde mossen toegeëld aan een van de drie gedefinieerde kwaliteitsklassen (tabel 3). in een goed of matig ontwikkelde kalktufbron is minstens één van deze soorten aanwezig. Het verschil tussen een kalktufbron van goede en matige kwaliteit is gedefinieerd als een verschil in totale mosbedekking binnen de opname. Na de toedeling konden vervolgens aan de hand daarvan voor de klasse 'matig' en 'goed' de grenswaarden worden bepaald (zie hierboven). Ze blijken echter voor de nitraat- en ortho-fosfaatconcentratie onderling niet significant te verschillen, maar samen wel ten opzichte van de verarmde klasse (fig. 5). Deze twee kwaliteitsklassen kunnen, mede gezien de aanwezige, kritische mossen en de overige aanwezige mosflora, tot de goed ontwikkelde vormen van het habitatype worden gerekend.

Welke waarden worden het...

Duidelijk is dat voor de klassen 'matig' en 'goed' ontwikkelde kalktufbron van de algemeen geldende norm van de Europese Nitraatrichtlijn (max. 50 mg NO₃⁻/l) voor grondwater hoe dan ook onvoldoende is voor duurzame instandhouding. Afgaand op de grenswaarde voor matig ontwikkelde kalktufbronnen worden die beide klassen alleen aangetroffen bij nitraatconcentraties lager dan 28 mg NO₃⁻/l (fig. 5). Voor ortho-fosfaatconcentraties ligt die waarde

op 0,05 mg PO₄³⁻/l. Dit wijst er op dat hogere concentraties in dergelijke bronnen kunnen leiden tot een verslechtering van de habitatkwaliteit, met mogelijk een afname of zelfs verdwijnen van de meer kritische soorten, waarna uiteindelijk alleen gewoon diknerfmos over blijft. Bij het gebruik van de grenswaarde moet echter niet worden gekeken naar individuele bronnen. Voor een herstel moet de aandacht juist uitgaan naar het onderliggende grondwatersysteem. Kalktufbronnen staan namelijk zelden op zichzelf en maken veelal deel uit van een groter, samenhangend bronnencomplex, gevoed vanuit dat grondwatersysteem. Dergelijke bronnencomplexen bestaan in Zuid-Limburg gewoonlijk veelal uit zowel verarmde - als matig ontwikkelde bronnen. Dat betekent dan vrijwel altijd dat de matig ontwikkelde bronnen richtinggevend moeten zijn voor de toe te passen grenswaarden. In het geval het instandhoudingsdoel op verbetering is gericht (tabel 1) komt de referentiewaarde in beeld.

Hoewel de kalktufbronnen van goede en matige kwaliteit onderling niet onderscheidend zijn op het nitraat- en ortho-fosfaatgehalte, verschillen ze dus wel in mosbedekking. Bij de goed ontwikkelde kalktufbronnen is die uitgebreider dan bij matig ontwikkelde bronnen (tabel 3). Maar ook de vegetatie van het direct omliggende bronbos blijkt voor die goed ontwikkelde klasse kalktufbronnen doorgaans beter ontwikkeld te zijn (minder verruigd). Dat doet vermoeden dat de matig ontwikkelde kalktufbronnen wel degelijk onderhevig zijn aan een zekere mate van achteruitgang. Dat beeld wordt nog versterkt doordat binnen deze matig ontwikkelde kalktufbronnen soms al fors hogere nitraat- en fosfaatconcentraties worden aangetroffen (fig. 5). De

KWALITEIT KLASSE	CRITERIA
Slecht (verarmd)	Afwezigheid van de drie geselecteerde kritische mossen
Matig	Aanwezigheid van tenminste 1 van de drie soorten; bedekking < 50 %
Goed (referentie)	Aanwezigheid van tenminste 1 van de drie soorten; bedekking > 50 %

Tabel 3. Classificatie van de mosvegetaties in de bemonsterde kalktufbronnen (n=51) op basis van de geselecteerde kritische mossen. De kwaliteitsklasse 'Goed' kan als de natuurlijke referentie worden opgevat.



Cascade de Bonne Fontaine (Vodeleé – België), februari 2016 (foto: Hans de Mars).

vraag dringt zich dus op of op deze standplaatsen nog wel een duurzame instandhouding mogelijk is en de meer kritische mossen zich daar op termijn dan nog wel kunnen handhaven - of zich op dergelijke plaatsen wel zouden kunnen vestigen? Omdat de duurzaamheid van de matig

ontwikkelde kalktufbronnen wat ons betreft toch discutabel is, stellen wij ons op het standpunt dat voor een effectief behoud en herstel in alle gevallen (voorzorgprincipe) moet worden gestreefd naar de referentiewaarde, zoals die gedefinieerd is voor de goed ontwikkelde kalktufbronnen, ofwel,

- nitraat: 18 mg NO_3^-/l (290 $\mu\text{mol NO}_3^-/\text{l}$).
- ortho-fosfaat: 0,04 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$ (0,4 $\mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{l}$).

Gezien het overwegend zwaar overbelaste Zuid-Limburgse grondwater zorgt deze referentiewaarde voor een grote beleidsmatige opgave. De enige effectieve aanpak is namelijk een vergaande extensivering van het grondgebruik binnen de intrekgebieden van deze kalktufbroncomplexen. Om te beginnen in het direct aangrenzende deel waar het grondwater met de kortste verblijftijden (orde <10-15 jaar) uit afstroomt naar deze bronnen. Meer concreet betekent dat het resoluut staken van de drijfmestinjectie en het herstel van de daardoor gedegradeerde bodemstructuur (vergroten organisch stofgehalte in de wortelzone teneinde denitrificatie hier weer te stimuleren). De toepassing van innovatieve technieken zoals dripirrigatie voor gericht toedienen van nutriënten of de toepassing van stoffen als zeoliet zijn mogelijk ook interessant. Een experiment met het gebruik van zeoliet op zandgrond liet een forse reductie van de stikstofuitspoeling zien (Van Mullekom et al., 2019). Het is de moeite waard om het gebruik van zeoliet ook op lössbodems uit te proberen om te bezien of dat op dit bodemtype ook tot een overeenkomstige sterke uitspoelingsreductie leidt.



Geveerd diknerfmos (*Palustriella commutata*), (Füllenberg - Bad Driburg, Duitsland). Foto: Bas van der Weijden.

Behalve de kalktufbronnen zouden ook andere eutrofiëringsevoelige natuurwaarden zoals bronbossen en hellingmoerassen, daar baat bij kunnen hebben.

Conclusies

De beschikbare databestanden en de aanvullende bemonsteringen in het buitenland, laten zien dat Zuid-Limburg vervuilde kalktufbronnen van Europa heeft. Daarbij is ook sprake van een, afgezien van de zeer hoge nitraatlast, veranderde samenstelling van het grondwater. Het onderzoek laat verder zien dat gewoon diknerfmos hier positief op reageert. Als dit de enige nog aanwezige karakteristieke soort is, kan die niet langer als indicator voor de habitatkwaliteit dienen. Dit in tegenstelling tot het meer kritische geveerd diknerfmos. Daarnaast is het zeer verontrustend dat ook de ortho-fosfaatconcentraties in Limburg significant hoger zijn dan in de ons omringende landen. Dat wijst eveneens op uitspoeling vanuit de landbouw. Als andere omgevingsfactoren veranderen (meer licht, drogere condities) kan die combinatie van een hoge nitraat- én fosfaatbelasting in Nederland leiden tot een sterkere verzuuring van het bronmilieu dan elders. Een kalkrijk milieu is in Zuid-Limburg dus geen garantie meer voor een beperkte fosfaatbeschikbaarheid. Dankzij de waterkwaliteitsgegevens uit binnen- en buitenland was het mogelijk om de grenswaarde voor nitraat en fosfaat te bepalen. Behoud en herstel van de kalktufbronnen, het onderliggende grondwatersysteem en het omringende landschap zijn afhankelijk van een radicale reductie van de nitraatuitspoeling, al dan niet mede door inzet van innovatieve technieken.

Literatuur

Arp, G., A. Bissett, N. Brinkmann, S. Cousin, D. De Beer, T. Friedl, K. I. Mohr, T. R. Neu, A. Reimer, F. Shiraishi, E. Stackebrandt & B. Zippel, 2010. Tufa-forming biofilms of German karstwater streams: microorganisms, exopolymers, hydrochemistry and calcification. Geological Society - London, Special Publications 336:83–118.

Beckers, J., 1924. Over diluviale en alluviale kalkafzetting in Zuid-Limburg. Maandblad van het Natuurhistorisch Genootschap 12(7): 32–34.

Bobbink, R. & G. van Dijk, 2017. Kritische depositiewaarden (KDW) voor kalktufbronnen: op weg naar meer zekerheid. RP 16.103.17.11, Onderzoekscentrum B-WARE, Nijmegen.

Dort, K. van, L. van Oirschot-Beerens & H. Weinreich, 2012. Mosvegetaties in Limburgse

kalktufbronnen. Natuurhistorisch Maandblad 101(12): 245–253.

Dort, K.W. van & E.J. Weeda, 2017. Montio-Caradaminetia. In: Schaminée et al. (red.), Revisie Vegetatie van Nederland. Stratiotes 50/51: 27–31. PKN/Westerlaan Publ. Lichtenvoorde.

Gennip, B., J.A.M. Jansen & E.J. Weeda, 2008. De kalktufbron, kleinood met grote status. Stratiotes 35: 22–37.

Hendrix, W.P.A. & C.R. Meinardi, 2004. Bronnen en bronbeken van Zuid-Limburg; Rapport RIVM, Bilthoven.

Mars, H. de, S.P.J. van Delft, E.J. Weeda & J.H.J. Schaminée, 2015. Nitraatbelasting van de Zuid-Limburgse hellingmoerassen. Thema-nummer Heuvellandschap, Natuurhistorisch Maandblad 104(12): 261–267/De Levende Natuur 116(6): 289–295.

Mars, H. de, B. van der Weijden, G. van Dijk, A. Smolders, A. Grootjans, L. Wolejko, 2016. Towards threshold values for nutrients: Petrifying springs in South-Limburg (NL) in a North west European context. Report OBN 2016/210-He, VBNE, Driebergen. DOI: 10.13140/RG.2.2.34563.09763

Mullekom, M. van, B. Vernooy, Y. Verstijnen, G. van Dijk & F. Smolders, 2019. Zeoliet als mogelijke oplossing voor de nitraatuitspoeling uit landbouwgronden. Vakblad Natuur Beheer en Landschap, april 2019: 16–19.

Oosterlynck, P. & E. De Bie, 2000. Kalktufbronnen in Vlaanderen; Bryologische en abiotische karakterisering van een Natura 2000 habitattype op de rand van zijn verspreiding. INBO, Brussel.

Pentecost, A., 2005. Travertine. Springer Science and Business Media.

Smolders, A., J. Loermans & M. van Mullekom, 2014. De waterkwaliteit van de bronsystemen in het Bunder- en Elsloërbos: Bronnen van Zorg. Natuurhistorisch Maandblad 103(5): 125–131.

UKTAG, 2012. UK Technical Advisory Group on the Water Framework Directive Technical report on groundwater dependent terrestrial ecosystem (GWDTE), threshold values. Version 8 March 2012. www.wfduk.org/resources%20/groundwater-dependent-terrestrial-ecosystem-threshold-values

Summary

The Dutch petrifying springs, the most polluted springs of Europe;

In 2016 an extensive research was undertaken to collect data on water chemistry and bryophyte composition of about 150 petrifying springs in Dutch South Limburg and other parts of North western and Eastern Europe. The database also included data from an international sampling survey of 51 springs. The research aimed at a better insight into the abiotic conditions of the Dutch springs in general

but also to determine threshold values for nitrate in petrifying spring water.

The Dutch petrifying springs had by far the highest contamination with nitrate and ortho-phosphate. The mean nitrate concentration of the Dutch petrifying springs is 85 mg NO₃⁻/l. They also have an impoverished bryophyte flora compared to other European petrifying springs sampled. A redundancy analysis of the dataset showed that *Cratoneuron filicinum* and curled hook-moss *Palustriella commutata* are opposites when nitrate and ortho-phosphate are concerned. The presence and coverage of *Cratoneuron filicinum* appeared positively correlated [$p=0,003$] with nitrate pollution. However, *Palustriella commutata* is significantly associated with nutrient poorer conditions [$p=0,003$].

Based on the collected data, threshold values were determined for nitrate and ortho-phosphate in habitat type 7720 Petrifying springs. The only reliable threshold value for nitrate was determined at 18 mg NO₃⁻/l. For ortho phosphate this value is 0,04 mg PO₄³⁻/l.

Dankwoord

Dit onderzoek kwam tot stand dankzij de hulp van tal van personen en instanties. Voor het beschikbaar stellen van informatie over kalktufbronnen in binnen- en buitenland gaat onze dank uit naar Gareth Farr (British Geological Survey, Cardiff), Piet de Becker (INBO, Brussel), Lesław Wolejko (West Pomeranian University of Technology, Szczecin), Bert Veldstra (Provincie Limburg) en Monique Korsten (Waterschap Limburg). De verschillende natuurbeschermingsinstanties en plaatselijke autoriteiten in binnen- en buitenland die vergunning versterkten voor het veldwerk ter plaatse. Jurgen Nieuwkoop die verschillende mossencollecties voor ons heeft gecheckt. Jeroen Graafland en Rick Kuiperij voor assistentie in het veld. Roland Bobbink, Boy Possen, Erik van Rijsselt en het OBN-deskundigeteam Heuvelland voor hun adviezen en hulp bij de totstandkoming van het onderzoek.

dr. Hans de Mars¹, dr. Gijs van Dijk^{2,3}, drs. Bas van der Weijden¹, Prof. dr. Ab Grootjans⁴ & Prof. dr. Alfons Smolders^{2,3}

- 1) Royal HaskoningDHV, Postbus 302, 6199 ZN Maastricht-Airport hans.de.mars@rhdhv.com
- 2) Onderzoekscentrum B-WARE, Postbus 6558, 6503 GB Nijmegen
- 3) Radboud Universiteit, Afdeling Aquatische Ecologie en Milieubiologie, Postbus 9010 6500 GL Nijmegen
- 4) Centrum voor Energie en Milieukunde (IVEM), Universiteit Groningen, Nijenborgh 6 9747 AG Groningen