



## Bekalking en steenmeel nabij drinkwaterwinningen

### Samenvatting

Veel Nederlandse bossen en natuurterreinen staan onder druk door versnelde bodemverzuring als gevolg van jarenlang verhoogde atmosferische zwavel- en stikstofdepositie. Via veranderde bodemchemie heeft de verzuring grote gevolgen voor de flora en fauna, onder andere door uitspoeling van essentiële mineralen, beperktere beschikbaarheid van fosfaat en het in oplossing komen van voor planten toxisch aluminium. Verhoogde concentraties aluminium in het grondwater kunnen daarnaast een bedreiging vormen voor de productie (putverstopping) en kwaliteit van drinkwater. Terreinbeheerders passen steeds vaker bekalking of steenmeel toe om de meest urgente gevallen van verzuring tegen te gaan, met voorzichtig positieve effecten op de vitaliteit van bossen en natuur. De meerderheid van de waterwingebieden op de hoge zandgronden ligt in bos- en natuurterreinen. Bekalking of steenmeeltoediening kunnen een middel zijn om negatieve effecten van verzuring op de natuur- en grondwaterkwaliteit tegen te gaan. Daarnaast zijn er kansen voor drinkwaterbedrijven via hergebruik van baserijk spoelwater of kalkkorrels uit onthardingsinstallaties. Wel zijn er nog enkele kennislacunes, zoals de juiste dosering, precieze samenstelling van steenmeel en geldende wet- en regelgeving.

### Consequenties voor u

	Laag	Middel	Hoog	Beknopte uitleg
Impact				Afhankelijk van ligging van natuurterreinen binnen waterwingebieden
Zekerheid				Bodemverzuring vindt plaats in veel bos- en natuurterreinen



Winput van de drinkwaterwinning Edese Bos (foto: Gijsbert Cirkel)



## Trendbeschrijving en achtergrond

Versnelde bodemverzuring als gevolg van te hoge atmosferische depositie is een van de grootste bedreigingen voor de Nederlandse natuur en biodiversiteit in met name het zandlandschap. Sommige kwetsbare natuurgebieden zijn al dusdanig verzuurd dat natuurlijk herstel niet meer mogelijk is. Beheerders kijken daarom steeds vaker naar het inbrengen van bufferende stoffen om verdere verzuring tegen te gaan of om te keren. Drinkwaterbedrijven beheren zelf verzuringsgevoelige natuur in hun waterwingebieden en krijgen zodoende in toenemende mate te maken met dit vraagstuk.

In deze trendalert geven we een beknopte beschrijving van de verzuringsproblematiek en bieden we een overzicht van recente inzichten over bekalking en het gebruik van steenmeel als mitigerende maatregel. Vervolgens verkennen we welke implicaties verzuring én de toepassing van bufferende stoffen kan hebben op de drinkwaterwinningen, welke kansen er zijn voor drinkwaterbedrijven, en welke lacunes in kennis er nog zijn rond dit onderwerp.

### Depositie, bodemverzuring en gevolgen voor natuur

Verzuring van de bodem treedt van nature op als gevolg van interne processen door microbiële activiteit en chemische omzettingen. De laatste decennia verzuurd de bodem van met name het zandlandschap echter veel

sneller als gevolg van atmosferische depositie van zwavel- en stikstofverbindingen [1, 2]. Historisch gezien zijn zwaveloxiden ( $\text{SO}_x$ ), afkomstig uit fossiele brandstoffen en in de atmosfeer omgezet in zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), een van de belangrijkste oorzaken van de verzuring van bossen en heiden. Door maatregelen is deze bron na 1990 sterk afgenomen [2, 3], waardoor momenteel verzuring door stikstofdepositie de belangrijkste externe bron is. Een zeer sterke en dominante verzuringsbron is ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), grotendeels afkomstig is uit de veehouderij. Na depositie wordt het omgezet in ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en vervolgens in nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ).

Stikstofoxiden ( $\text{NO}_x$ ) zijn afkomstig uit verkeer en industrie en worden in de lucht omgezet in salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ), waarna het via regen in de bodem terechtkomt. Het is sterk zuurvormend, maar de depositie ervan is in Nederland gemiddeld twee keer zo laag als ammoniak [2]. Stikstofdepositie is de laatste decennia eveneens afgenomen, maar minder snel dan zwaveldepositie. Daarbij is de afname van ammoniak depositie sinds 2010 min of meer gestagneerd.

Als gevolg van de hoge input van stikstof en zwavel en de daaropvolgende verzuring van de bodem zijn met name in het zandlandschap uitwisselbare kationen zoals calcium, kalium en magnesium versneld uitgespoeld en silicaatmineralen versneld verweerd [4, 5]. Ondanks de

afgenomen depositie als gevolg van aangescherpte Europese milieuwetgeving is het effect van sterke bodemverzuring nog niet teruggedraaid en neemt de basenbezetting en daarmee de buffercapaciteit in bosbodems nog steeds af [3-5]. Als gevolg daarvan zijn veel van nature zwak gebufferde bodems sterk verzuurd. Een algemeen probleem van hoge stikstofdepositie en langdurige verzuring is een onbalans in nutriënten: er is een overschot aan stikstof, maar een tekort aan elementen zoals fosfor, calcium, magnesium en kalium. Daarnaast treedt bij vergaande verzuring mobilisatie van aluminium en ijzer op: bij een pH lager dan 4,5 en een basenbezetting lager dan 25% neemt de aluminiumconcentratie in het porievocht snel toe [3] (Figuur 1). Ook remt een sterke bodemverzuring de afbraak van organisch materiaal [4].

Bodemverzuring heeft grote gevolgen voor flora en fauna. Basische kationen spelen een essentiële rol in het op peil houden van zuurbuffering en nutriëntenlevering, de basis voor het bovengrondse leven [5]. Bij een overschot aan stikstof krijgen stikstofminnende planten de overhand. Te hoge concentraties aluminium zijn toxisch voor planten en dieren [3]. In zeer zure bodemcondities blijkt fosfaat minder makkelijk op te nemen door planten, met als gevolg een veranderde N:P-verhouding in planten. Door bovenstaande veranderingen neemt de voedingswaarde van



plantaardig materiaal af, wat resulteert in afname van o.a. insecten. De afname van insecten heeft weer effect op bepaalde vogelsoorten [1]. Een gebrek aan calcium heeft op een aantal plekken geleid tot sterke afname of zelfs verdwijnen van huisjeslakken en kan bij koolmezen leiden tot te dunne eierschalen en botbreuken bij nestjongen [6, 7]. In bossen heeft sterke bodemverzuring effect op de voedingstoestand van het bos, de vitaliteit van het wortelstelsel van bomen en op het voorkomen van ziekten en plagen. Stikstofdepositie

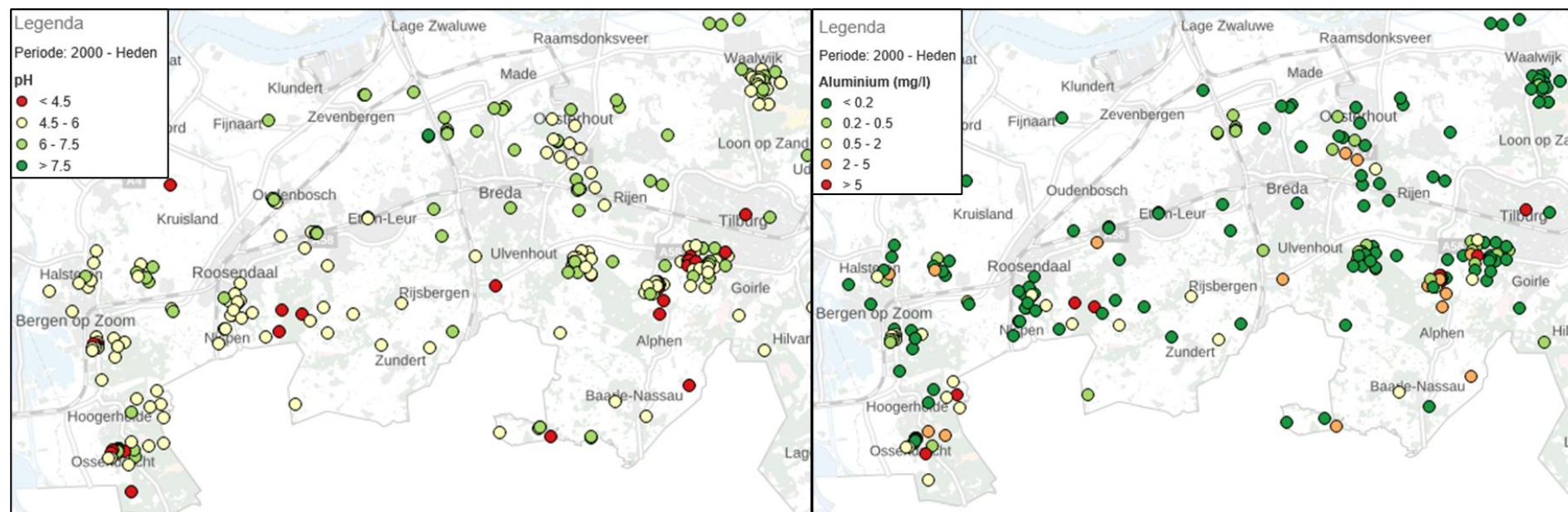
is regelmatig gekoppeld aan het voorkomen van zomereiksterfte [4].

Ondanks een sterke daling is de depositie van o.a. stikstof voor een aantal habitattypen nog steeds te hoog. Bij herbemonstering van eikenopstanden in 2015 bleek de basenverzadiging vrijwel overal lager dan 10%, terwijl dit in 1990 op een aantal locaties nog beduidend hoger was [4]. Bodems die te sterk verzuurd zijn, kunnen niet meer uit zichzelf herstellen, waardoor actief ingrijpen met maatregelen nodig is [1, 4, 5]. Het toedienen van

voedingsstoffen via externe materialen zoals kalk of steenmeel kan dan een optie zijn.

### Bekalking

Het toedienen van kalk om verzuring van bodem tegen te gaan is al lange tijd staande praktijk in de landbouw [8]. De afgelopen decennia is het eveneens toegepast in verschillende natuurgebieden die te maken hebben met negatieve effecten van verzuring. In veel gevallen gaat het om Dolokal (landbouwkalk), dat grotendeels bestaat uit calciumcarbonaat ( $\text{CaCO}_3$ ) en eveneens



Figuur 1. Metingen in het grondwater van pH (links) en de concentratie van aluminium (rechts) tot -10 m+NAP in het zuidwesten van Noord-Brabant ([www.grondwatertools.nl](http://www.grondwatertools.nl))



magnesiumoxide (MgO) bevat; daarnaast wordt ook wel mergel of schelpengruis toegepast. Het effect van bekalking is een snelle verhoging van één of enkele elementen, met name calcium [1].

Bekalking in diverse verzuurde biotopen in laagveengebieden (o.a. trilvenen en dotterbloemhooilanden) heeft geen eenduidig beeld opgeleverd qua effectiviteit [9]. Na toediening zijn op enkele locaties toegenomen pH, basenbezetting en calcium- en magnesiumconcentraties waargenomen. Na ongeveer vijf jaren waren deze effecten grotendeels weer verdwenen. Het effect op de nutriëntenhuishouding was onduidelijk. Positieve effecten op de vegetatiesamenstelling waren eveneens na vijf jaar weer verdwenen.

In heidesystemen (Veluwe, Strabrechtse Heide) had bekalking met Dolokal een 'shokeffect' met op zeer korte termijn positieve effecten in de vorm van enig herstel van bodembuffering, toename van basenverzadiging en afname van vrij beschikbaar aluminium [1]. Deze verbetering in bodemcondities is veelal positief voor het herstel van bedreigde plantensoorten. Bij forse kalkgiften bestaat wel het risico op verzuuring als gevolg van versnelde afbraak van organisch materiaal en daaraan gekoppeld een verhoogde mineralisatie. Er zijn tevens aanwijzingen dat bekalking kan bijdragen aan een onbalans in nutriënten,

waarbij de hoeveelheid calcium en magnesium soms te snel toe nemen en de beschikbaarheid van fosfor afneemt. De combinatie met plaggen, met als doel het verwijderen van een overmaat aan stikstof, kan dit proces versterken: met het verwijderen van plaggen wordt namelijk behalve stikstof ook juist fosfor verwijderd terwijl de stikstofdepositie doorgaat [10]. Tot slot lijkt het effect van bekalking met name negatief in vochtige heiden met een lage kation-uitwisselcapaciteit, waarbij het systeem bij overdosering kan 'doorschieten' naar een meer gebufferd milieu met andere flora [11]. In het algemeen lijkt bekalking in heidegebieden geschikt voor (kortstondig) vegetatieherstel, maar de maatregel leidt vaak niet tot een breder systeemherstel.

Bekalking is ook regelmatig toegepast om sterke verzuring van bossen tegen te gaan, met name op arme zandgronden. Op korte termijn kan dit leiden tot verhoogde pH en toename van soortenrijkdom van planten, hoewel dit deels gekoppeld lijkt met verzuuring als gevolg van verhoogde afbraak van organisch materiaal [5, 12, 13]. Bovendien blijkt soms bij herbemonstering dat het positieve effect niet significant is. Niettemin kunnen sterk verzuurde bossen na een kalkgift een snelle opleving laten zien van verschillende planten, insecten en paddenstoelen, zoals is gebleken na het bekalken met schelpengruis nabij Ede in 2020 [14, 15]. Ook een experiment met toediening van kalkkorrels

afkomstig uit de drinkwaterzuivering op bosbodems lijkt voorzichtig positief [12]. Uit vervolgmonitoring in bospercelen nabij Harderwijk, waar 30 jaar eerder proeven waren uitgevoerd met bekalking ('Harderwijkerveldproef'), bleek dat de vegetatie en bodemopbouw en -chemie na 30 jaar aanzienlijk waren veranderd en bleken ook effecten waarneembaar op bodemfauna. In proefvlakken met een kalkgift van 6 ton/ha of hoger was een sterke verzuuring met braam opgestreden en was de dikte van de strooisellaag sterk afgenomen. De auteurs concluderen dat bekalking tot 3 ton/ha de negatieve effecten van bodemverzuring vermindert, zonder dat het systeem al te sterk wordt aangetast [13].

### Steenmeel

Het toedienen van steenmeel is een maatregel die de afgelopen jaren in verschillende gebieden en habitats is toegepast [16, 17]. Steenmeel komt vrij bij het zagen van natuursteen of wordt doelbewust gemalen voor toepassing in de landbouw en is afkomstig uit bijvoorbeeld de Eifel of Noorwegen. Regelmatig toegepaste commerciële producten zijn Eifelgold, Soilfeed of Biolit. In tegenstelling tot kalk bestaat steenmeel vooral uit silicaten, maar bevat het vrijwel geen calciumcarbonaten. Tijdens verwerking binden silicaatmineralen H<sup>+</sup>-ionen en neutraliseren hiermee inkomend zuur. Bij het verweringsproces komen



vervolgens onder andere basische kationen en een beperkte hoeveelheid fosfor vrij [3]. De samenstelling van de meeste steenmeelproducten is vergelijkbaar. Ze bestaan vooral uit  $\text{SiO}_2$  (ca. 50%) en bevatten verder onder andere  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (ca. 10%) en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14-19%). Eifelgold, gemaakt van basalt, is relatief rijk aan magnesium en fosfor in vergelijking met bijvoorbeeld Soilfeed [12].

In 2015 is op verschillende heidepercelen op de Hoge Veluwe en de Strabrechtse Heide steenmeel opgebracht (Soilfeed en Biolit), in combinatie met enige bekalking (Dolokal), waarna de bodem, vegetatie en fauna langjarig is gemonitord [1, 5, 11, 18]. Na negen jaar zijn overwegend (voorzichtig) positieve effecten gevonden, met name wat betreft bodemchemie (o.a. toegenomen basenverzadiging en beschikbaar kalium). Er werden geen sterke effecten gevonden op concentraties stikstof en fosfor in de bodem. Andere positieve effecten waren een iets hogere plantensoortenrijkdom en veranderingen in nutriëntensamenstelling van plantmateriaal, hoewel er geen sterke veranderingen in de vegetatie zijn vastgesteld. Op korte termijn trad geen verzuuring op, zoals bij bekalking wel regelmatig het geval is. Er was geen duidelijk systeemherstel opgetreden wat betreft bovengrondse fauna en kenmerkende plantensoorten van iets beter gebufferde milieus. Daarbij werd wel aangetekend dat de effecten

vooral na 10-15 jaar verwacht kunnen worden. Het effect van steenmeel lijkt wat te verschillen tussen habitattypen. De resultaten in droge heide en stuifzandheide zijn voorzichtig positief; in heischrale graslanden trad echter vrijwel geen effect op.

Meerjarig onderzoek in eikenpercelen op de Hoge Veluwe en in het Mastbos (Breda) liet zien dat enkele jaren na toediening van steenmeel de bodemchemie in de bovenste 20 cm van de bodem sterk verbeterd was [4, 19]. Het adsorptiecomplex was opgeladen en de bodem had een hogere beschikbaarheid van kationen. Wel bleek de pH nauwelijks toegenomen, zodat het de vraag blijft of het voldoende is om de belemmeringen van verzuring voor het bodemleven op te heffen. Ook werd een verhoogd gehalte aan kalium, calcium en magnesium en een lager stikstofgehalte in de bladeren gemeten en werd enige verhoging van rupsenvraat geconstateerd. Veranderingen in de bodemecologie betroffen onder meer een toename van wormen en fijne wortels. De resultaten werden over het algemeen positief beoordeeld, hoewel aanvullend onderzoek naar effecten op de langere termijn nodig blijft. Zo is enkele malen een afname van miljoenpoten geconstateerd na toediening van steenmeel [20]. De oorzaak van de afname kon niet worden vastgesteld. Dichtheden van miljoenpoten in sterk verzuurde bossen zijn in het

algemeen heel laag, zodat toepassing van steenmeel in dergelijke bossen alsnog te overwegen is.

In het algemeen zijn de resultaten van de recente onderzoeken voorzichtig optimistisch. Toedienen van steenmeel wordt zeker op sterk verzuurde locaties gezien als een 'no regret'-maatregel, zeker indien het materiaal ook relatief rijk is aan fosfor. Bij een toediening van 10 ton/ha kan de huidige zuurlast gedurende ongeveer een decennium worden geneutraliseerd [3]. Door de tragere verwerking van steenmeel in vergelijking met kalkproducten lijkt een verzuuring van de vegetatie uit te blijven. De snelheid van verwerking is wel afhankelijk van korrelgrootte en van de samenstelling (moedermateriaal) van het steenmeel. Steenmeeltoediening is echter geen complete oplossing voor de onbalans in nutriënten. Zo wordt lage calciumbeschikbaarheid van de bodem niet direct verholpen met steenmeel. Mogelijk is daarvoor een combinatie met bekalking nuttig [3, 19]. Verder is opgemerkt dat in zeer urgente situaties steenmeelverwerking waarschijnlijk te langzaam gaat. Tot slot is er nog weinig ervaring met langetermijneffecten van steenmeel, zodat (grootschalige) veldproeven nodig blijven voordat steenmeel grootschalig kan worden toegepast [3]. Een aandachtspunt bij toepassing op bosbodems is het gehalte aan potentieel giftige stoffen als ijzer- en aluminiumoxiden. In geval van een zure



strooisellaag kunnen deze stoffen oplossen en mogelijk ook zorgen voor versnelde uitspoeling van andere voedingsstoffen zoals calcium, magnesium en kalium [17, 21].

## Relevantie

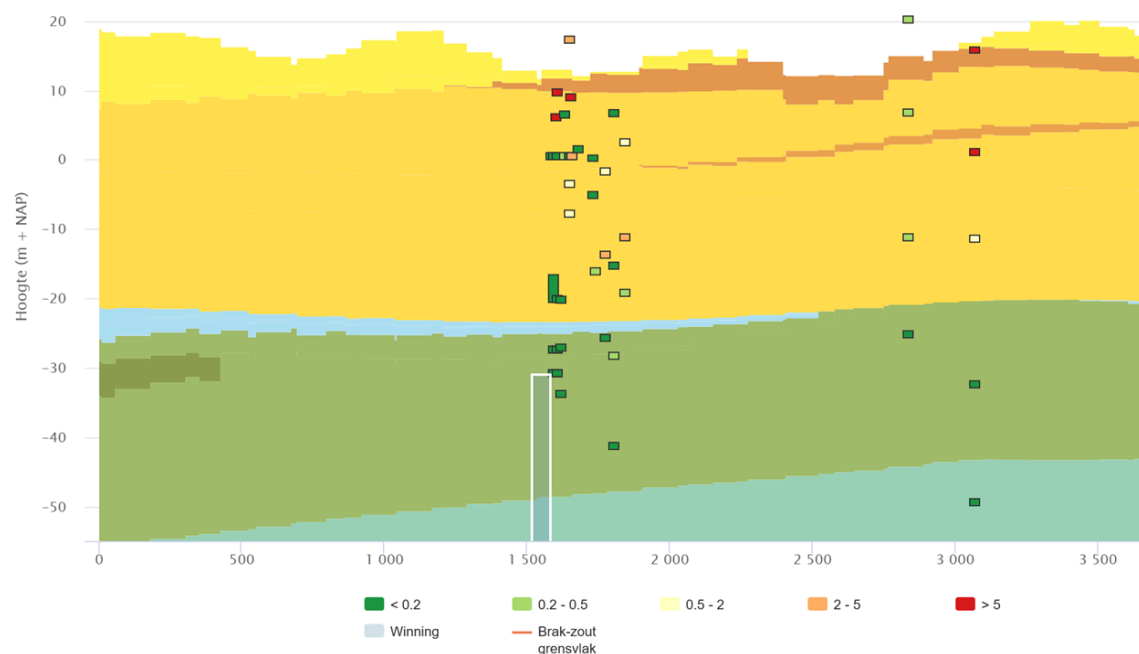
### Verbetering grondwaterkwaliteit rondom winningen

De drinkwatersector levert een belangrijke bijdrage aan de natuur in Nederland [22]. In 2016 hadden de gezamenlijke drinkwaterbedrijven ongeveer 23.000 ha in eigendom. Het grootste deel van de waterwingebieden ligt in het Natuurnetwerk Nederland (NNN). Bij de binnenlandse bedrijven bestaat ongeveer de helft van de beheerde natuur uit bos, waarvan een belangrijk aandeel droge, zure bostypen [23]. Bovendien bestaan veel grondwaterbeschermingsgebieden en intrekgebieden van winningen voor een belangrijk deel uit bos en natuurterreinen.

Verregaande bodemverzuring en daaraan gekoppelde risico's als mobilisatie en uitspoeling van zware metalen zijn zodoende niet alleen een risico voor ecosystemen, maar ook voor drinkwaterwinningen. Bij vergaande bodemverzuring ( $\text{pH} < 4,5$ ) worden metalen als aluminium gemobiliseerd en kan de aluminiumconcentratie in het porievocht en ondiepe grondwater snel toenemen. Met name uitgeloopte zandpakketten in

het zuiden van Nederland zijn hier vatbaar voor: uit Figuur 1 blijkt dat in het zuidwesten van de provincie Noord-Brabant op een aantal locaties hoge aluminiumconcentraties ( $>2 \text{ mg/L}$ ) in het ondiepe grondwater voorkomen, die een sterke correlatie vertonen met gemeten lage pH. Deze locaties komen veelal overeen met bos- en natuurterreinen waar zich ook drinkwaterwinningen bevinden (onder andere Ossendrecht en Schijf). De gemeten concentraties liggen

(ruim) boven de norm ( $200 \mu\text{g/l}$ ) en meldingsplicht ( $30 \mu\text{g/l}$ ) van aluminium in drinkwater. Nabij de winning Ossendrecht zijn de afgelopen decennia verhoogde aluminiumconcentraties gemeten tot bijna  $25 \text{ m}$  beneden maaiveld, nabij de winput (Figuur 2). In ondiepe winputten van pompstation Bergen op Zoom is een aantal jaar geleden putverstopping met onder andere aluminiumhydroxide geconstateerd, een gevolg van de menging van ondiep, zuur, licht zuurstofhoudend water



Figuur 2. Concentratie van aluminium ( $\text{mg/L}$ ) in het grondwater nabij winning Ossendrecht ([www.grondwatertools.nl](http://www.grondwatertools.nl))

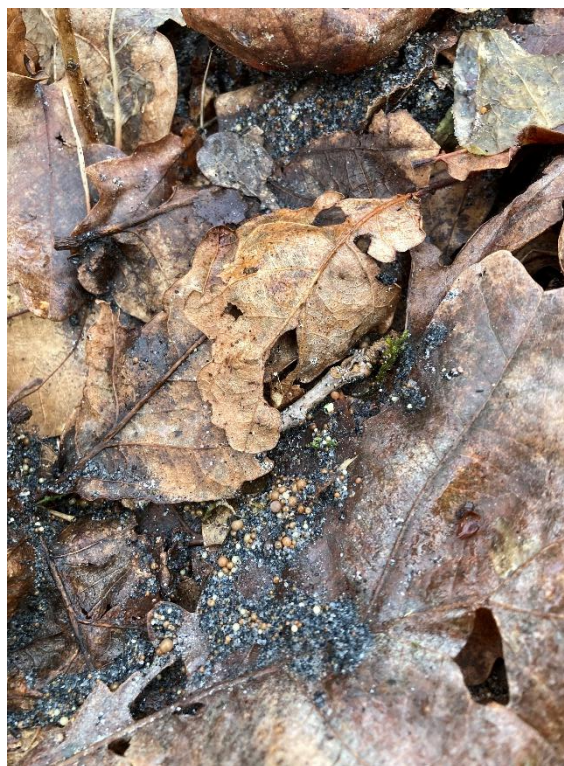


met basisch, zuurstofloos water van grotere diepte [24]. Het tot op grote diepte voorkomen van verhoogde aluminium concentraties is met name een risico onder bos- en natuurterreinen, aangezien hier in de regel nooit maatregelen tegen bodemverzuring zijn getroffen (op landbouwpercelen worden ook kalkmeststoffen toegediend). Bekalking en/of het toedienen van steenmeel kan dit risico in de sterkst verzuurde gebieden wellicht terugdringen of op termijn zelfs wegnemen.

#### Kansen voor drinkwaterbedrijven

Zowel bekalking als de toediening van steenmeel lijkt overwegend positief uit te pakken voor de bodemchemie en (deels) flora en fauna in sterk verzuurde bos- en natuurterreinen, mits gecontroleerd uitgevoerd, in niet te hoge dosis, en afgestemd op bodem en habitat. De maatregelen bieden bovendien kansen voor drinkwaterbedrijven. Productielocaties op plekken met hard grondwater hebben soms een aanzienlijke reststroom van basenrijk spoelwater of kalkkorrels uit onthardingsinstallaties. Recentelijk zijn nabij de winningen Schalterberg en Putten (Vitens) proeven uitgevoerd met de toediening van kalkkorrels om de kwaliteit van bosopstanden te verbeteren [12]. Afhankelijk van de uitkomsten van de monitoring is het interessant om te onderzoeken of deze maatregel kan worden opgeschaald of toegepast op andere locaties. Daarnaast is bevloeiing van verzuurde (bos)bodems met

basenrijk spoelwater mogelijk een kansrijk alternatief voor bekalking. Het verdient aanbeveling om dit nader te onderzoeken, waarbij ook een recentelijk ontwikkelde rekentool voor hergebruik van spoelwater kan worden ingezet [25].



*Figuur 3. Steenmeel en kalkkorrels, aangebracht in het wingebied van La Cabine (Vitens). Foto: Bas van den Dries.*

Een mogelijk interessant bijkomend voordeel van bekalking en steenmeeltoediening is de vastlegging van CO<sub>2</sub>. Dit kan een bijdrage leveren aan het mitigeren van toegenomen CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg van de aanleg van nieuwe winningen, infrastructuur, etc. Nader onderzoek is gewenst om dit verder te kwantificeren.

#### Aandachtspunten en kennislacunes

De toepassing van bekalking en steenmeel wordt omgeven door verschillende kennislacunes. Een belangrijke vraag is welke dosering de juiste is. Deze vraag speelt momenteel al bij drinkwaterbedrijven die dergelijke maatregelen overwegen in door hun beheerde verzuurde gebieden. Bekalking in te hoge giften kan tot verzuiging leiden [13], wat een risico is voor bepaalde habitats en natuurwaarden. De juiste dosis is uiteraard sterk locatieafhankelijk, maar meer onderzoek en monitoring bij bestaande proeven kan hier meer duidelijkheid over verschaffen.

De verschillende soorten steenmeel die in omloop zijn, bevatten diverse verbindingen van metalen, onder andere aluminium- (12-19%) en ijzeroxides (4-12%) en lage gehalten aan zware metalen zoals nikkel en chroom [12]. Wanneer toegepast op zeer zure bosbodems kunnen ze oplossen en eventueel de uitspoeling van andere voedingsstoffen versnellen [17]. Mogelijk bevat steenmeel nog sporenelementen die momenteel nog



niet in beeld zijn, maar wel een risico kunnen zijn voor de grondwaterkwaliteit. Het lijkt er niet op dat bij de productie van steenmeel coagulanten zoals polyacrylamide worden toegepast, aangezien de meeste producten geen afvalproduct zijn, maar primair voor toepassing in o.a. landbouw als poeder worden geproduceerd. Bij restproducten kan dit wel het geval zijn, dus is het belangrijk om hier meer zekerheid over te krijgen. Bij dit alles moet worden bedacht dat bekalking en steenmeel momenteel al veel worden toegepast in de landbouw, naar alle waarschijnlijkheid ook in intrekgebieden van grondwaterwinningen. Ook om die reden is het goed om meer helderheid te verschaffen in de precieze samenstelling en eventuele hulpstoffen van met name de verschillende soorten steenmeel.

Een overkoepelende kennislacune betreft de geldende wet- en regelgeving. Waaraan moet het toedienen van kalk of steenmeel voldoen, is monitoring nodig, en welke wetgeving is van toepassing? Het toedienen van kalk en steenmeel in de landbouw valt bijvoorbeeld onder de Meststoffenwetgeving, maar het is onduidelijk of dit ook voor natuurgebieden geldt.

Tot slot is uit het beknopt literatuuronderzoek gebleken dat er nog diverse ecologische kennislacunes bestaan, met name als het gaat om langetermijneffecten op bovengrondse en bodemfauna. Aanbevolen wordt om

het onderzoek hiernaar te blijven volgen om te bepalen of grootschalige bekalking en steenmeeltoediening in natuur in waterwingebieden verstandig is.

### Tot besluit

Bekalking en het toedienen van steenmeel zijn zinvolle maatregelen om de meest ernstige en urgente gevallen van bodemverzuring in natuurgebieden aan te pakken. Het is evenwel goed om te beseffen dat deze maatregelen in zekere zin symptoombestrijding zijn ('pleisters plakken'), wanneer de verzuring al is geschied. De belangrijkste een meest urgente maatregel blijft nog steeds het op korte termijn sterk terugdringen van de belangrijkste bron van bodemverzuring: atmosferische stikstofdepositie, met als belangrijkste bijdrage ammoniak uit de intensieve veehouderij. Zonder grootschalige reductie aan de input-kant blijft het treffen van maatregelen tegen verzuring in natuurgebieden 'dweilen met de kraan open' [10].

### Referenties

1. Weijters, M., Bobbink, R., Verbaarschot, E. J. H., van de Riet, B., Vogels, J. J., Bergsma, H., & Siepel, H. (2018). *Herstel van heide door middel van slow release mineralengift – resultaten van 3 jaar steenmeel-onderzoek* (2018/OBN222-DZ). VBNE, Driebergen.
2. Antheunisse, A. M., Remke, E., Brouwer, E., Kooijman, A., Flowers, N., Krajenbrink, H. J.,

Aggenbach, C. J. S., de Bruijn, M., Somhorst, I., Findeisen, S., & Verbruggen, E. (2025). *Behoud van biodiversiteit in oude duingraslanden. Vegetatie, mycoflora en bodemleven* (2025/UPN-2022-009-DK). Kennisnetwerk OBN, Driebergen.

3. van Diggelen, R., Bergsma, H., Bijlsma, R.-J., Bobbink, R., van den Burg, A., Sevink, J., Siebel, H., Siepel, H., Vogels, J. J., de Vries, W., & Weijters, M. (2019). Steenmeel en natuurherstel: een gelukkige relatie of een risicovolle combinatie? *Vakblad Natuur Bos Landschap*, 16(155), 20-23.
4. de Vries, W., Weijters, M., de Jong, J. J., van Delft, S. P. J., Bloem, J., van den Burg, A., van Duinen, G. A., Verbaarschot, E. J. H., & Bobbink, R. (2019). *Verzuring van loofbossen op droge zandgronden en herstelmogelijkheden door steenmeeltoediening* (OBN229-DZ). VBNE, Driebergen.
5. Vogels, J. J., Verbaarschot, E. J. H., Loeb, R., Weijters, M., Bobbink, R., Bergsma, H., Scherpenisse, M., Verbeek, P., & de Jong, V. (2020). *Steenmeeltoepassing ten behoeve van herstel biodiversiteit in Het Nationale Park De Hoge Veluwe*. Stichting Bargerveen, Nijmegen.
6. Graveland, J., & van der Wal, R. (1996). Decline in snail abundance due to soil acidification causes eggshell defects in forest passerines. *Oecologia*, 105(3), 351-360. <https://doi.org/10.1007/BF00328738>



7. van den Burg, A. (2017). Rammelende eieren en brekebenen bij de koolmees: verzuring terug bij af? *Vakblad Natuur Bos Landschap*, 14.
8. Goulding, K. W. T. (2016). Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 32(3), 390-399. <https://doi.org/10.1111/sum.12270>
9. Kanters, S., Cusell, C., Teurlincx, S., Mathu, L. F. A., Ursem, M. A. E., de Senerpont Domis, L. N., & Kooijman, A. (2022). *Evaluatie van bekalken in laagveengebieden: Mogelijke herstelmaatregel in trilvenen, blauwgraslanden, veenmosrietlanden en dotterbloemhooilanden* (OBN-2020-114-LZ). Kennisnetwerk OBN, Driebergen.
10. Vogels, J. J. (2025). *Out of Balance - A stoichiometric perspective on heathland biodiversity loss* [PhD thesis, Radboud University]. Nijmegen.
11. Weijters, M., Verbaarschot, E. J. H., Vogels, J. J., Smits, L., van de Riet, B., Siepel, H., Verbruggen, E., Emsens, W. J., Brouwer, E., & Bobbink, R. (2023). *Herstel van droge- en vochtige heide door middel van silicaatmineralen (steenmeel). Resultaten van negen jaar steenmeelonderzoek* (OBN-2019-109-DZ). VBNE, Driebergen.
12. van den Berg, L., van Wijhe, P., & van Os, M. (2022). *Monitoring effecten maatregelen in bospercelen van Vitens - korte termijn* [Eindconcept]. Bosgroep Midden Nederland, Ede.
13. Bobbink, R., van den Burg, A., Brouwer, E., van de Riet, B., & Siepel, H. (2018). *Langetermijneffecten van bosbekalking en -bemesting: de Harderwijkerproef* (Monitoring OBN-17-DZ). VBNE, Driebergen.
14. Bosgroepen. (2020). *Schelpkalk tegen verzuring bos en hei gemeente Ede*. <https://www.naturetoday.com/nl/nl/nature-reports/message/?msg=26966>
15. Bosgroepen. (2025). *Bekalken met schelpgruis succesvol: plantensoorten keren terug*. <https://bosgroepen.nl/nieuws/bekalken-met-schelpgruis-succesvol-plantensoorten-keren-terug/>
16. Natuurmonumenten. (2025). *Steenmeel om heideleven in Loonse en Drunense te verbeteren*. <https://www.natuurmonumenten.nl/natuurgebieden/loonse-en-drunense-duinen/nieuws/steenmeel-om-heideleven-in-loonse-en-drunense-te>
17. Staatsbosbeheer. (2024). *Steenmeel strooien tegen verzuring. Helpt dat?* <https://www.staatsbosbeheer.nl/wat-wedoen/nieuws/2024/11/steenmeel-strooien-tegen-verzuring-helpt-dat>
18. Findeisen, S., Weijters, M., Bobbink, R., Emsens, W. J., Siepel, H., Vogels, J. J., & Verbruggen, E. (2025). Silicate rock powder application: perspectives for the use as buffer restoration measure in acidified heathlands. *Restoration Ecology*, 33(4). <https://doi.org/10.1111/rec.70013>
19. Bloem, J., Dimmers, W., Polling, M., de Groot, A., Laros, I., & de Jong, A. (2022). Effecten van steenmeel op bodemleven in droge eikenbossen. *Vakblad Natuur Bos Landschap*, 19(189), 30-33.
20. Vogels, J. J., & de Graaf, M. (2025). *Effecten van steenmeeltoediening op miljoenpoten in zure bossen*. Stichting Bargerveen, Nijmegen.
21. Staatsbosbeheer. (2022). *5 vragen over het gebruik van steenmeel bij stikstofschade*. <https://www.staatsbosbeheer.nl/wat-wedoen/nieuws/2022/07/5-vragen-over-het-gebruik-van-steenmeel>
22. van der Zee, F. F., de Knegt, B., Meeuwssen, H., Sanders, M., Veraart, J., Grashof-Bokdam, C., & Wegman, R. (2016). *Waterwinning en natuur; De betekenis van de drinkwatersector voor de natuur in Nederland* (2719). Alterra Wageningen UR, Wageningen.
23. Brakkee, E. A., & Dorland, E. (2021). *Trendalert - De Bossenstrategie in waterperspectief* (BTO 2021.043). KWR, Nieuwegein.
24. Stuyfzand, P. J., van der Schans, M., Wullings, B., Lemmens, W., van Rosmalen, C., & van Sijl, J. (2016). *Oorzaken van neerslagvorming in pompputten van puttenveld Bergen op Zoom van Brabant Water (Niet Openbaar)* (KWR 2016.102). KWR, Nieuwegein.
25. Aggenbach, C. J. S., & Krajenbrink, H. J. (2024). *Rekentool voor de inzet van spoelwater voor natuurdoeleinden* (DC 2024.002). KWR, Nieuwegein.



**Keywords**

Bodemverzuring, bekalking, steenmeel,  
grondwaterkwaliteit, natuur

**Auteur**

Henk Krajenbrink

**Kwaliteitsborger**

Gijsbert Cirkel

**Opdrachtgever**

KWR Waterwijs | Verkennend onderzoek

**Projectnummer**

404300-157