



Met trekker en pendelstrooier fijn gemalen steenmeel uitstrooien van Eifelgold

foto's WER

# Doorgaande verzuring van Oorzaken en gevolgen voor het boscysteem

De atmosferische depositie is de afgelopen decennia fors afgenomen. Dat is mooi nieuws. Maar het lijkt er op dat de bossen daar nog weinig profijt van hebben. Uit onderzoek blijkt dat ondanks de afnemende zure depositie de verwerking van bodemmineralen niet in staat is deze depositie te neutraliseren, en de basenverzadiging dus nog steeds afneemt.

— Wim de Vries (Wageningen Environmental Research), Popko Bolhuis (Wageningen Environmental Research), Arnold van de Burg (Stichting Biosfeer) en Roland Bobbink (Radboud Universiteit Nijmegen)

> Door atmosferische depositie van stikstof- (N) en zwavel (S)-verbindingen is in Nederlandse bossen zowel bodemverzuring als vermist opgetreden. De piek van de zwavelbelasting lag in Nederland in het midden van de jaren zestig en is daarna afgenomen. Voor stikstof lag de piek in het midden van de jaren tachtig. In die periode werd veel onderzoek gedaan aan bodemverzuring en de gevolgen ervan. Zo is in 1990 onderzoek gedaan naar de zogenaamde basenverzadiging van 150 zandgronden onder bos. De basenverzadiging is daarbij het percentage basische kationen (calcium, magnesium, kalium en natrium) ten opzichte van de capaciteit waarmee de bodem positief geladen deeltjes kan vasthouden (kationuitwisselcapaciteit, CEC). Die waarde ligt van nature rond de 15-20 procent. Uit het onderzoek in 1990 bleek dat deze waarde voor zandgronden gemiddeld onder de 10 procent lag.

Na 1990 is de zure depositie van zwavel flink afgenomen (zie figuur 1), en tussen 1990 en 2003 ook die van stikstof. De zuurdepositie is daarbij berekend op basis van 2 mol zuur per mol zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) en 1 mol zuur per mol ammoniak

(NH<sub>3</sub>) en per mol stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>). De vraag is wat dit betekent voor de verzuring van de bosbodems. Zou de basenverzadiging van deze bodems zich herstellen door de vermindering van de zure depositie? Om deze vraag te beantwoorden is in 2015 een herbemonstering in zestien eikenopstanden uitgevoerd van de veldstudie die 25 jaar geleden is uitgevoerd. In de opstanden is een mengmonster gemaakt van twintig monsters van de strooisellaag en van twee minerale lagen in de bovengrond (0-10 cm en 10-30 cm). Het onderzoek is herhaald met precies dezelfde methoden en op dezelfde locaties als in 1990.

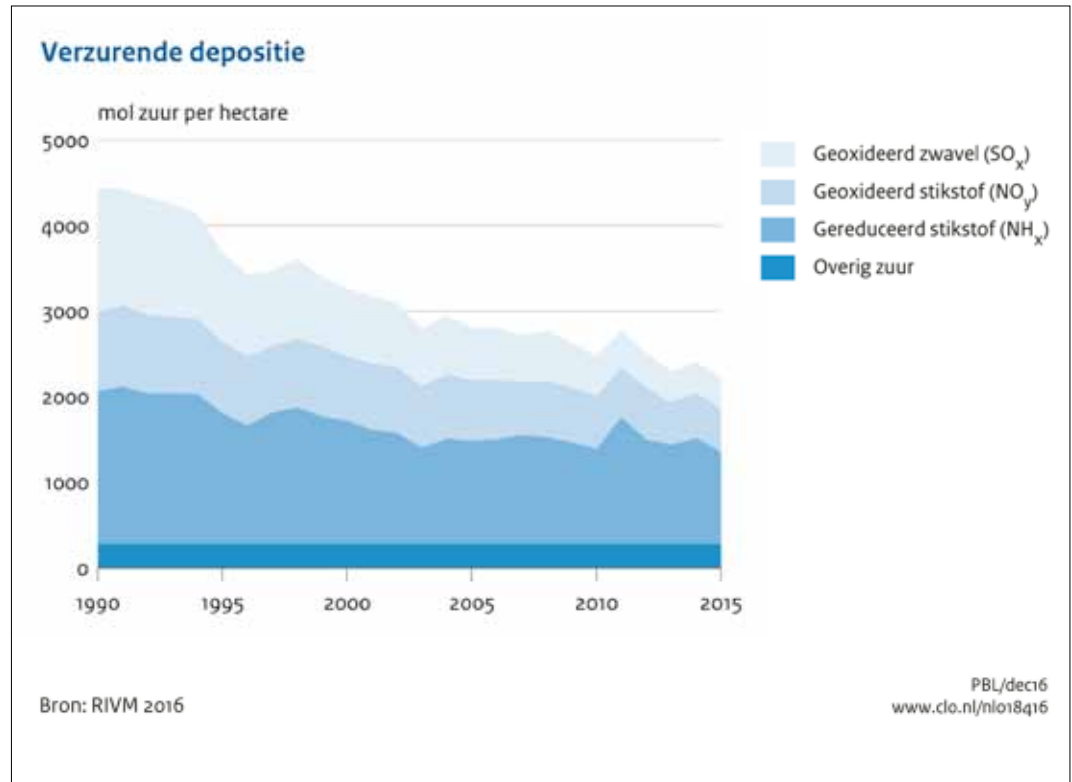
Het blijkt (figuur 2) dat in de strooisellaag de CEC is afgenomen. Dat wijst op voortgaande verzuuring want de CEC neemt af met een afnemende pH. Verder is in zowel de strooisellaag als in de minerale bovengrond op veruit de meeste locaties de basenverzadiging afgenomen wat ook wijst op doorgaande verzuuring. Hoewel de variatie in CEC en basenverzadiging deels wordt veroorzaakt door kleine verschillen in de bemonsterde plekken (de vrij sterke toename op één locatie, name-

lijk van ca 20 procent naar 30 procent in de laag 0-30 cm, wijst daar ook op), is er een duidelijke trend van een afnemende basenverzadiging. Waar in 1990 nog sprake was van een variatie van ca 5-40 procent in basenverzadiging in de bovenste 30 cm, is die in 2015 vrijwel altijd beneden de 15 procent gezakt. Dit wijst erop dat ondanks de afnemende zure depositie de verwerking van bodemmineralen niet in staat is deze depositie te neutraliseren, en de basenverzadiging dus nog steeds afneemt.

### Doorgaande verzuring

De herbemonstering heeft alleen plaatsgevonden onder eikenbossen op arme zandgronden omdat uit diverse onderzoeken blijkt dat juist hier sprake is van een mineralenonbalans. In een vergelijkingsstudie van tien bosgebieden in Nederland, met daarbinnen opstanden met zowel hoge als lage sterfte, werden onder andere lage magnesium- en kaliumgehalten aangetroffen in de bodems van percelen met hoge sterfte. Recente metingen van gehalten aan calcium, magnesium en kalium in stammen en takken laten ook zien dat die gehalten 10-50 procent lager liggen in vergelijking met waarden in de literatuur, terwijl de gehalten van stikstof juist hoger zijn (zie het verhaal van Anjo de Jong e.a. op pagina 24). De gevonden doorgaande verzuring was ook de verwachting voordat de herbemonstering begon. Berekende kritische zuurbelastingen voor bos-

**Figuur 1.** Verloop van de depositie van potentieel verzurende zwavel en stikstofverbindingen uitgedrukt in mol equivalent zuur/ha/jaar tussen 1990 en 2015 (bron PBL). De afkorting NH<sub>x</sub> staat voor ammoniak (NH<sub>3</sub>) en ammonium (NH<sub>4</sub>).



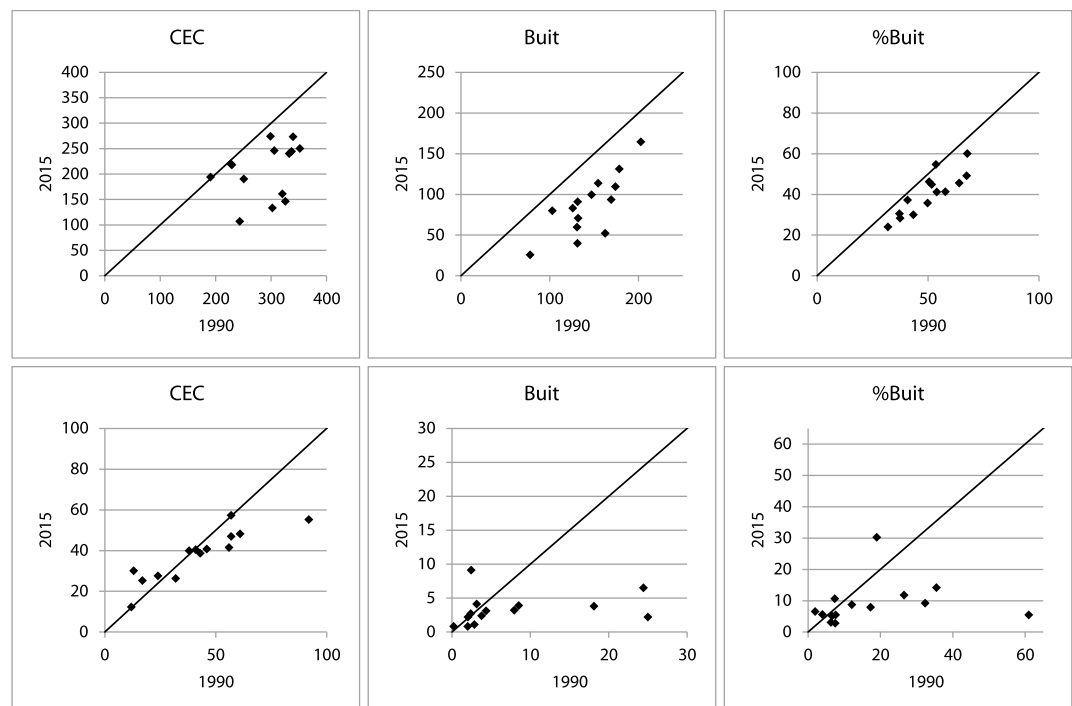
# bosbodems

sen op arme zandgronden liggen namelijk rond de 1000-1400 mol zuur per hectare. In 1990 was de potentiële zure depositie rond de 4400 mol zuur per hectare en die is in de periode 1990-2015 gehalveerd tot rond de 2200 mol zuur per hectare in 2015 (zie de waarden in figuur 1). Gemiddeld over de gehele periode 1990-2015 is de jaarlijkse depositie van potentieel zuur dus meer dan 3000 mol zuur per hectare geweest en dat is beduidend hoger dan de kritische waarde van 1000-1400 mol zuur per hectare per jaar. In dit kader heeft het woord potentieel betrekking op het feit dat niet alle zwavel of stikstof die op de bodem terecht komt ook tot actuele verzuring hoeft te leiden omdat een deel kan worden vastgelegd in de vegetatie of de bodem.

### Bijdragen van stikstof- en zwaveldepositie aan de verzuring

Is de landbouw de (hoofd)verantwoordelijke voor de zure depositie? Dat lijkt logisch vanwege de hoge bijdrage van ammoniak en ammonium, grotendeels afkomstig uit de landbouw, aan de stikstofdepositie (zie figuur 1). Toch ligt dit wat genuanceerder. Zo is de landelijk gemiddelde bijdrage van ammoniak aan de potentieel zure depositie momenteel ongeveer 60 procent en in 1990 was dat rond de 45 procent (zie figuur 1). Die

**Figuur 2.** Relatie tussen de CEC (meq/kg), het gehalte aan uitwisselbare basen (Buit; meq/kg) en de basenbasenverzadiging (%Buit is Buit/CEC x 100) in de strooisellaag (bovenste rij) en de bodemlaag 0-30 cm (onderste rij) tussen 1990 en 2015. De term meq beteken millimol equivalent.





relatieve toename is vooral het gevolg van een veel sterkere afname van zwaveldepositie in die periode. Maar daarbij moet ook worden bedacht dat verzuring alleen optreedt als zwavel als sulfaat ( $\text{SO}_4$ ) en stikstof als nitraat ( $\text{NO}_3$ ) uitspoelen. De zwavel die binnenkomt, spoelt vrijwel volledig als sulfaat uit en neemt daarbij ook basen mee. De stikstof die binnenkomt wordt echter voor het grootste deel vastgelegd in de bodem en deels ook in de vegetatie. Resultaten van de eerdergenoemde 150 bosgronden in 1990, in zowel de bovengrond (diepte van 0-30cm) als onder de wortelzone (diepte van 60-100cm) wezen in die tijd nog op een belangrijkere rol van  $\text{SO}_4$  dan van  $\text{NO}_3$  (tabel 1).

Helaas heeft er sinds 1990 weinig onderzoek meer plaatsgevonden aan de effecten van zure depositie op bodem en bodemvocht. Wel zijn in het trendmeetnet verzuring van het RIVM tussen 1990 en 2012 onder andere de concentraties aan  $\text{SO}_4$  en  $\text{NO}_3$ , Ca, Mg en K in het ondiepe grondwater gemeten. Daaruit blijkt dat  $\text{SO}_4$ -concentraties gemiddeld 2,5 maal zo hoog zijn dan  $\text{NO}_3$ -concentraties. De concentraties aan Ca, Mg en K blijken ook vooral met  $\text{SO}_4$  gecorreleerd en veel minder met  $\text{NO}_3$ . Grondwaterconcentraties zeggen echter niet alles over verzuring in de bovengrond. Door de mogelijke vorming van  $\text{SO}_4$  door pyrietoxidatie, in combinatie met omzetting van  $\text{NO}_3$  naar luchtstikstof door denitrificatie, en door basenverwerking in de ondergrond kunnen de concentraties van  $\text{SO}_4$  en basen stijgen en die van  $\text{NO}_3$  dalen.

Wel zijn tussen 1990 en 2001  $\text{SO}_4$  en  $\text{NO}_3$ -, Ca-, Mg- en K-concentraties in twaalf bosopstanden gemeten. Daaruit blijkt dat de afname in  $\text{SO}_4$ -depositie ook tot een sterke daling in de  $\text{SO}_4$ -concentratie in de bovengrond heeft geleid. De  $\text{NO}_3$ -concentraties zijn echter niet significant gedaald en dat geldt ook voor de Ca- en Mg-concentraties. Gemiddeld over 1990-2000 lijken  $\text{SO}_4$  en  $\text{NO}_3$  uitspoeling gelijk te zijn (figuur 3).

Dus hoewel de zwaveldepositie over de afgelopen 25 jaar veel lager is geweest dan de stikstofdepositie, is de bijdrage aan de actuele verzuring van de bodem relatief groter omdat zwavel nauwelijks in de bodem wordt vastgelegd en stikstof wel. Uitgaande van de potentieel zure depositie (figuur 1) is de gemiddelde bijdrage van zwavel over de periode 1990-2015 ca 20 procent. Van de resterende 80 procent door de totale stikstofdepositie was de bijdrage van  $\text{NH}_3$  daarbij ca 55 procent, en ca 25 procent van  $\text{NO}_x$ . In de bovengrond, waar relatief weinig N vastlegging plaats heeft gevonden, lijkt dit een redelijke inschatting van de bijdragen aan verzuring. In de ondergrond zal de relatieve bijdrage van stikstof door vastlegging minder zijn geweest en ligt het mogelijk op 40 procent door  $\text{SO}_x$ , 20 procent door  $\text{NO}_x$  (ofwel 60 procent door emissie vanuit verkeer en industrie) en 40 procent door  $\text{NH}_x$  emissies vanuit de landbouw. Daarbij dient bedacht te worden dat het huidige aandeel van landbouw (in het jaar 2015) hoger is.

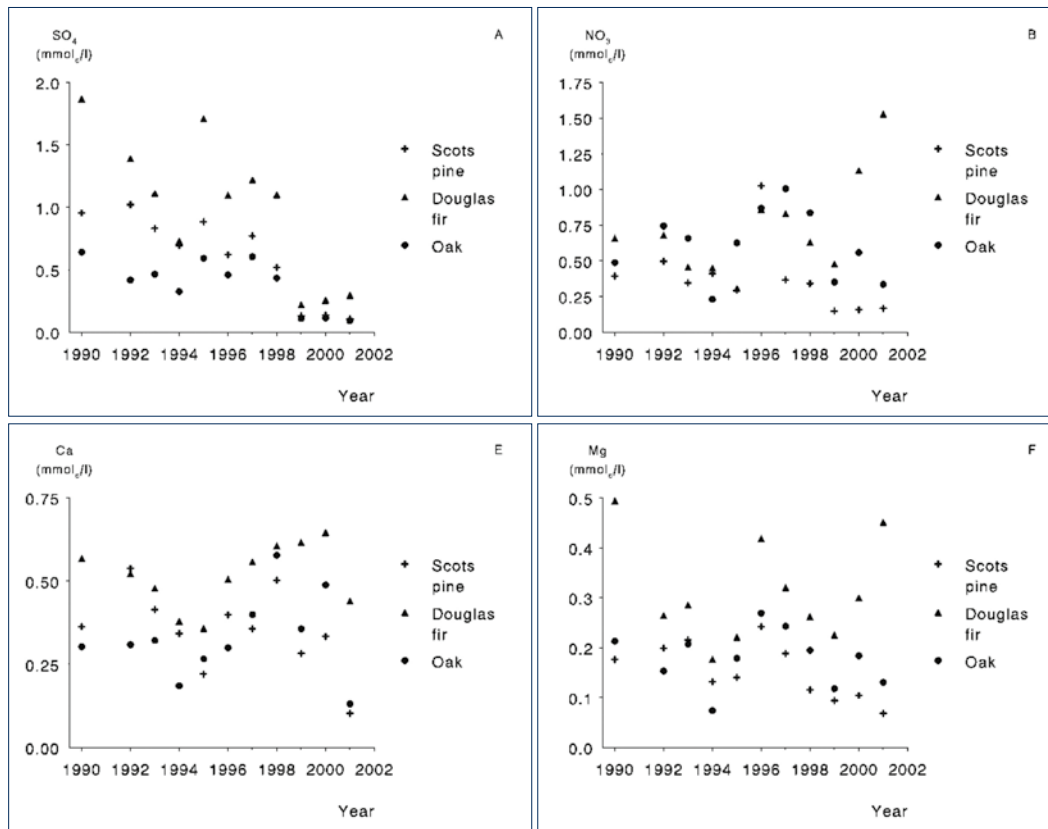


Boven: zakken Eifelgold, klaar om uit te strooien

Onder: afgewogen emmers met Lurgi (grof gemalen steenmeel), klaar om uit te strooien met zaaibak



**Figuur 3.** Gemiddelde concentraties van sulfaat (SO<sub>4</sub>), nitraat (NO<sub>3</sub>), calcium (Ca) en magnesium (Mg) onder grove den, Douglas en eik. De gemiddelden hebben betrekken op vier opstanden. Het gaat in totaal dus om metingen in twaalf bosopstanden.



**Tabel 1.** De 5, 50 and 95 percentiel waarden van element concentraties in de bovengrond (0-30cm) en onder de wortelzone (60-100cm) van 150 bosopstanden in 1990. Een x percentiel waarde is de waar x% van alle metingen onder ligt. De 50 percentiel waarde is dus is de waarde waar 50 procent van alle metingen onder ligt en automatisch dus ook 50 procent er boven. Dit wordt ook wel de mediaan genoemd. Concentraties zijn gegeven in meq/l.

Element	Concentratie in bovengrond (meq/l)			Concentratie in ondergrond (meq/l)		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
Al	0.19	0.64	1.9	0.05	0.59	3.2
Ca	0.13	0.44	1.8	0.09	0.38	3.1
Mg	0.11	0.25	0.75	0.07	0.23	0.85
K	0.08	0.20	0.61	0.04	0.10	0.31
NO <sub>3</sub>	0.03	0.53	1.8	0.03	0.48	2.4
SO <sub>4</sub>	0.39	0.99	3.3	0.38	1.1	3.6

**Bijdragen van houtoogst aan de verzuring**  
 En dan is er naast de uitspoeling van basen door zure depositie ook nog de afvoer van basen door houtoogst (zie ook het artikel van Anjo de Jong e.a. op pagina 24). Schattingen van het verlies aan calcium, magnesium en kalium door uitspoeling liggen echter wel ongeveer twee tot vier maal zo hoog als die door houtoogst. Uit een recente studie in China bleek de landgemiddelde bijdrage van houtoogst 16 procent en die van zure depositie 84 procent en dat is ook redelijk indicatief voor Nederland. In de jaren tachtig werd de basenafvoer door houtoogst rond de 10-15 procent geschat en dat zal momenteel niet veel hoger zijn. Wel verdwijnen er tijdens de eindkap extra basen uit het systeem, vaak gedurende een periode van 5-8 jaar. Dat komt vooral door mineralisatie van eerder opgeslagen stikstof die volledig uitspoelt omdat er geen boom meer staat om de stikstof op te nemen. Maar dat is wel veelal stikstof die eerder is gedeponeerd vanuit de lucht en toen is vastgelegd en dan weer deels vrijkomt. Ook als je die basenafvoer gedurende vijf tot acht jaar optelt bij de afvoer en deelt door de rotatieperiode kom je gemiddeld niet aan de hoogte van de depositie. Gedurende een periode van 10-20 jaar na een eindkap kan dit natuurlijk wel zo zijn. Bij de herbemonstering van de genoemde 16 eikenopstanden was echter geen sprake geweest van eindkap in de afgelopen 25 jaar.

**Mogelijkheden voor herstelmaatregelen**  
 In het verleden zijn er meerdere experimenten geweest met bemesting en bekaliking om de verzuring van gronden tegen te gaan en de nutriëntenbalans te herstellen. In sommige gevallen, vooral bij een hoge dosis, is daarbij verzuuring opgetreden die na een groot aantal jaren nog steeds merkbaar is en vanuit natuurdoelmatigheid ongewenst is. Dat lijkt vooral veroorzaakt door een hoge stikstofmineralisatie als gevolg van een te snelle pH stijging door de kalk of Dolokal. Het opbrengen van de juiste soort steenmeel, met een goede verhouding tussen calcium, magnesium, kalium en fosfaat, is een kansrijk alternatief voor bekaliking aangezien door deze toepassing geen kalium of fosfaat wordt toegediend. Daarnaast stijgt de pH van de bodem geleidelijker, waardoor kans op sterk verhoogde stikstofmineralisatie afneemt. Dat kan overigens ook een nadeel zijn, bijvoorbeeld op plaatsen waar een zeer lage bodem pH de ontwikkeling van slakkenpopulaties remt. Er bestaan echter nog duidelijke kennislacunes waar het gaat om de mogelijk positieve effecten van “slow release” mineralengiften op de bodemchemie, bladchemie en uiteindelijk de vitaliteit van droge loofbossen. Om hier inzicht in te krijgen zijn veldexperimenten opgezet in twee aangetaste opstanden met dominantie van zome-reik in Brabant (Mastbos) en het Nationale Park de Hoge Veluwe. Door herhaalde metingen van de boomvitaliteit, insecten- en schimmelaantasting, blad- en bodemchemie zal de effectiviteit van deze experimentele herstelmaatregelen worden gekwantificeerd.<