

De betekenis van bossen voor de kwaliteit van grondwater

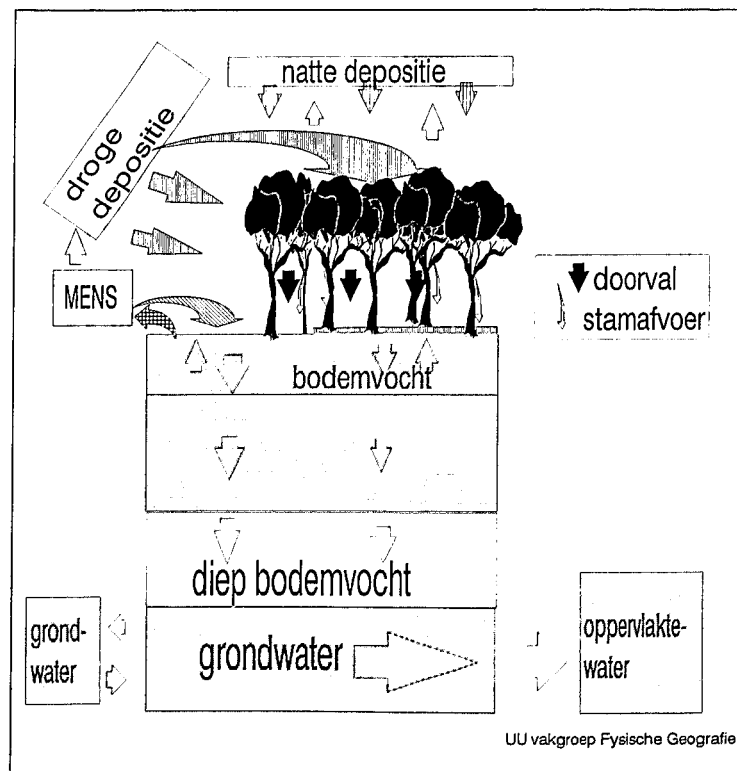
De chemische kwaliteit van het grondwater onder een bosopstand wordt bepaald door processen van atmosferische depositie, processen gerelateerd aan plaatselijke bodemkenmerken en processen die verband houden met de positie van die opstand in het lokale grondwatersysteem. Bij gelijke atmosferische belasting kunnen belangrijke verschillen in de concentraties van aluminium, nitraat en sulfaat in zowel (diepe) bodemvocht als grondwater worden verklaard onder meer door verschillen in boomsoort, boomhoogte en bodemeigenschappen. Door de omzetting van opstanden van douglas en fijnspar op arme zandgronden in andere boomsoorten of heide kan de kwaliteit van het ondiepe grondwater verbeteren. Ter plaatse van het gedeelte van een opstand nabij een bosrand worden verhoogde concentraties in bodemvocht en grondwater gemeten. Voor deze bosrandzone wordt een aangepast opstandbeheer voorgesteld.

De concentratie van stoffen in het grondwater onder bos wordt bepaald door klimaatskenmerken (neerslag, verdamping, transpiratie), de fysische-, chemische- en biochemische- eigenschappen van de bodem en ondergrond, het landgebruik en de

daarmee samenhangende aan- en afvoer van stoffen door de mens (bemesting, oogst) en de aanvoer via de lucht. De mens beïnvloedt op indirecte wijze de aanvoer via de atmosfeer doordat als gevolg van diverse maatschappelijke activiteiten stoffen naar de atmosfeer worden uitgestoten. De verhoogde concentratie van die stoffen in de atmosfeer leidt ertoe dat per eenheid van oppervlak een grotere hoeveelheid van die stoffen op het aardoppervlak gedeponeerd wordt. Dit proces van atmosferische depositie kan gezien worden als het voornaamste proces waarbij stoffen naar de Nederlandse bossen worden aangevoerd, indien afgezien wordt van de toepassing van

plantgatbemesting (en bestrijdingsmiddelen) en van de in Nederland nog experimentele bosbemesting. De afvoer van stoffen door houtoogst en de veranderingen in het microclimaat van de bosbodem als gevolg van kaalkap hebben tijdelijk effect op de stoffenvoorraad in de bodem en de uitspoeling naar het grondwater. Bij de hier volgende beschouwing over de kwaliteit van het grondwater in relatie tot bos als landgebruiksvorm worden deze effecten verwaarloosd. De stofstroom die via de atmosfeer boscossystemen bereikt

■ *Figuur 1. Schema stofstromen voor bos- en landbouwecosystemen op zandgrond met diepe grondwaterstanden*



wordt voornamelijk bepaald door twee processen (Fig. 1)

De meest bekende is het proces van de zogenaamde "natte depositie". De stoffen worden hierbij met neerslag (regen, sneeuw) voornamelijk verticaal aangevoerd. Dit proces wordt veelal aangeduid als "zure regen".

De natte depositie op een bos wordt bepaald door processen van transport en omzetting in de atmosfeer en is betrekkelijk weinig afhankelijk van het type bos of landgebruik. Alleen de hoeveelheid neerslag die het oppervlak bereikt is daarbij van belang.

Het tweede type depositie proces wordt aangeduid als de "droge depositie". Hierbij gaat het om de neerslag, of afzetting van bodemdeeltjes, zout, aerosolen en gassen op het aardoppervlak en daarop aanwezige vegetatie en artefacten gedurende perioden zonder neerslag. De genoemde stoffen kunnen zowel door horizontale als verticale stroming worden aangevoerd uit de atmosfeer.

De hoeveelheid stoffen die daadwerkelijk op een oppervlak wordt afgezet (de depositiesnelheid) wordt in eerste instantie bepaald door de concentratie van die stof in de atmosfeer en de eigenschappen van de atmosfeer (windsnelheid, turbulentie, inversies). De depositiesnelheid is voorts afhankelijk van het soort stof (de diameter van stofdeeltjes) en de ruwheid en oppervlakteweerstand van het depositieoppervlak. Zo heeft een bos in het algemeen een grotere ruwheid dan een onbegroeide vlakte. Het bos veroorzaakt door zijn aanwezigheid luchtturbulenties

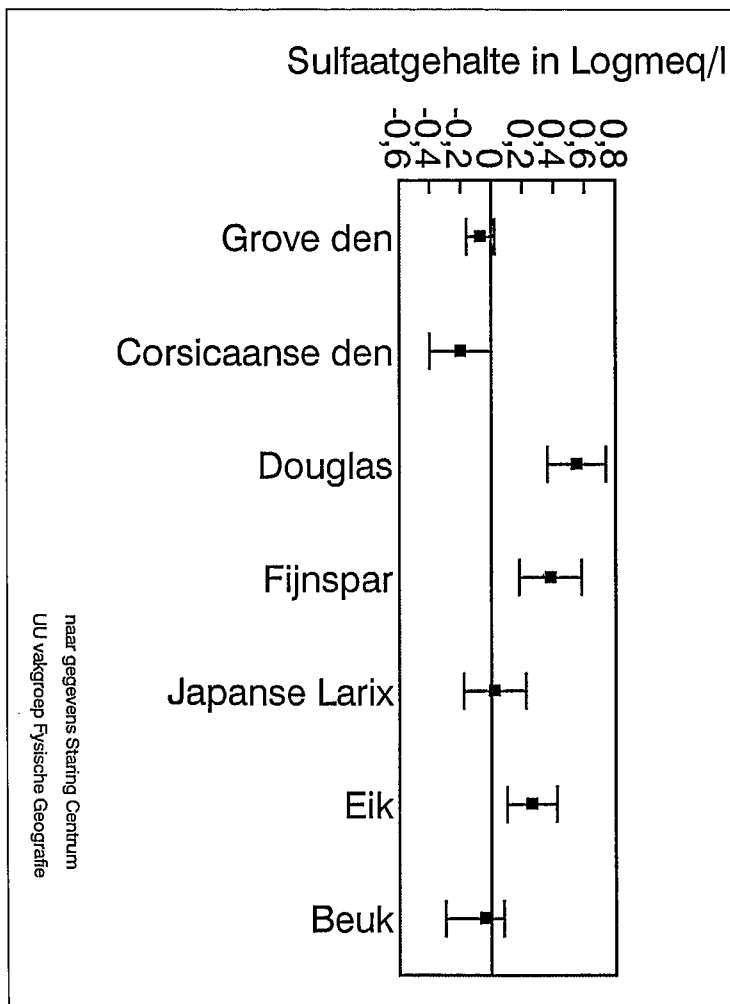
die de depositiesnelheid vergroten. Het gaat hierbij vooral om de structuurkenmerken van een bosopstand, zoals variatie van boomhoogte en het voorkomen van open plekken. Voor de depositie van gassen kan de vochtigheidsgraad van het depositieoppervlak van invloed zijn. De oppervlakteweerstand welke de depositiesnelheid naar bladoppervlakken beperkt, wordt onder meer bepaald door de bladvorm en de hoeveelheid geopende stomata. Per boomsoort zal daarom de droge depositie anders kunnen zijn.

Tijdens perioden zonder neerslag kunnen de door droge de-

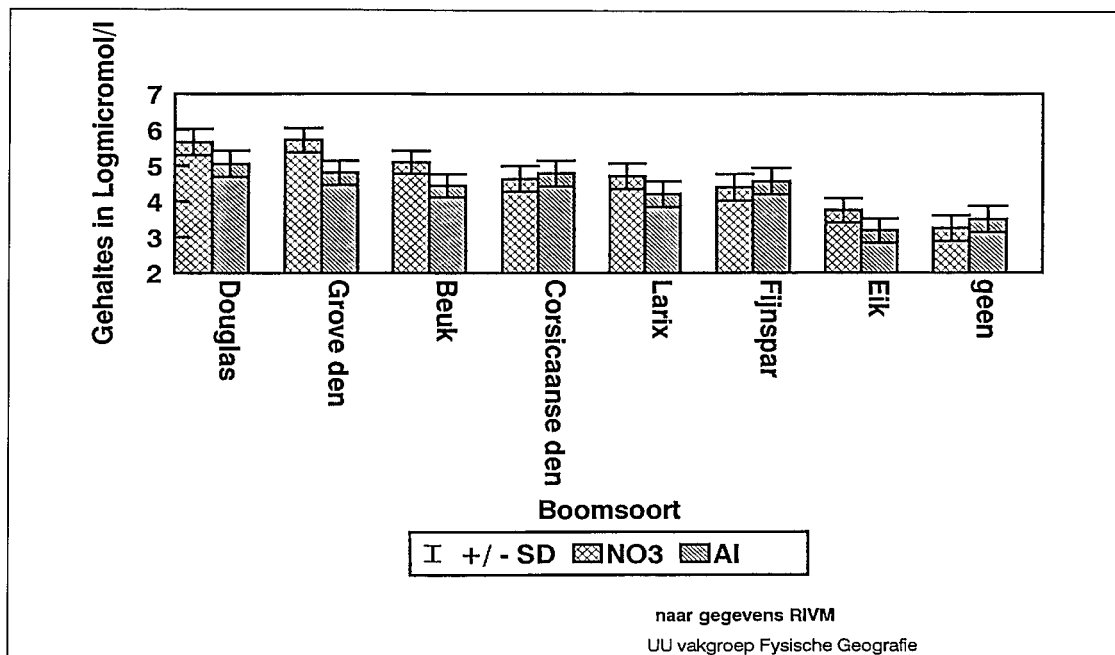
positie aangevoerde stoffen op het boomoppervlak accumuleren om vervolgens met de neerslag in een natte periode af te spoelen naar de bosbodem, als (kroon-) doorval en stamafvoer.

Tijdens de accumulatieperiode en ook tijdens het proces van afspoeling kan de samenstelling van de gedeponeerde "stoflaag" veranderen. Stoffen kunnen onderling reageren en er kan opname van gassen en opgeloste stoffen plaats vinden en uitgewisseld worden tegen in de bladeren aanwezige stoffen.

Uitgaande van een bepaalde hoeveelheid droge depositie op een bosopstand zal de betekenis



■ *Figuur 2. Gemiddelde en standaarddeviatie van het sulfaatgehalte in het diepe bodemvocht per opstandstype.*



hiervan voor de concentraties in het grondwater ook bepaald worden door de eigenschappen van de bodem en de ondergrond. Een deel van de hoeveelheid stoffen die van de bodem naar diepere lager percoleert bereikt het grondwater en kan door grondwaterstroming tenslotte ook het oppervlaktewater bereiken. Het is door deze grondwaterstroming dat op sommige plaatsen onder bos grondwater wordt aangetroffen dat door landgebruik elders (dat wil zeggen stroomopwaarts) in kwaliteit kan zijn beïnvloed. Aangezien het diepe bodemvocht (beneden de wortelzone) in het algemeen in mindere mate door een horizontale aanvoer van ander landgebruik zal zijn beïnvloed wordt hier ook aandacht besteed aan de kwaliteit van dit diepe bodemvocht in relatie tot boskenmerken. Het is tenslotte dit vocht dat het bovenstaande boscossysteem heeft verlaten en spoedig of later grondwater zal worden. In dit artikel wordt ingegaan op de eigenschappen van bosop-

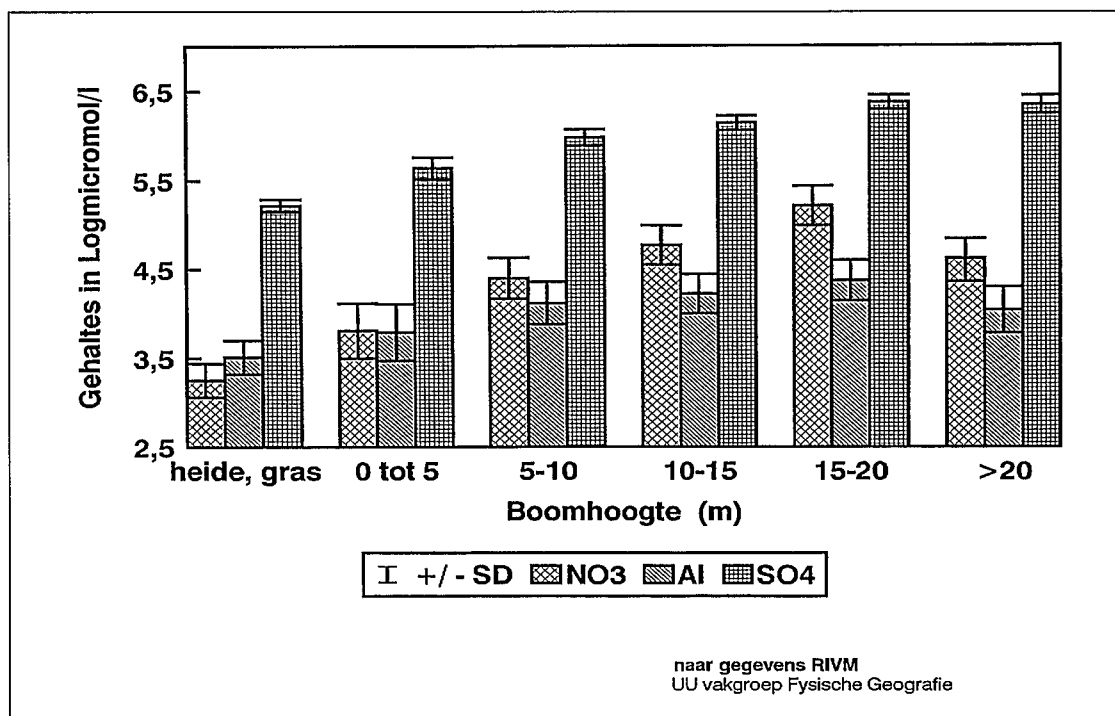
standen in relatie tot de concentraties van nitraat, sulfaat en aluminium in het grondwater. De waterhuishouding van bossen en de processen in de bodem worden slechts aangeduid.

De Nederlandse bossen op zandgrond

Op 150 locaties in de Nederlandse bossen is door het Staring Centrum onder meer het bodemvocht bemonsterd en zijn opstandskennmerken verzameld. Door het RIVM is in 156 ruiten van 500 bij 500 m steeds op ca 10 plaatsen het bovenste grondwater onder bos en "overig natuur" bemonsterd (in totaal derhalve ca 1500 waarnemingen). Omdat het hierbij gaat om het bovenste grondwater kan een betere relatie met de boscossystemen worden verwacht dan met de gegevens die verkregen zijn in het landelijk meetnet voor de grondwaterkwaliteit, waar immers onder "ondiep grondwater" een diepte tot 12 m wordt begrepen. In figuur 2 is het gemiddelde en de standaard afwijking van de

■ Figuur 3. Gemiddelde en standaarddeviatie van het nitraat en aluminium gehalte in het bovenste grondwater per opstandstype.

gelogaritmiseerde concentraties van sulfaat in het diepe bodemvocht weergegeven, gebaseerd op een totaal van 150 waarnemingen. Diep bodemvocht wil zeggen tussen 60 en 100 cm beneden maaiveld. Het sulfaatgehalte in het diepe bodemvocht blijkt duidelijk te relateren aan de boomsoort. De sulfaat concentraties onder opstanden van douglas en fijnspar zijn duidelijk hoger dan die bij de overige boomsoorten. Dit wordt grotendeel verklaard door het grotere relatieve bladoppervlak per grondoppervlakteenheid ("Leaf Area Index", LAI) dan bij andere naaldsoorten, waardoor meer wordt ingevangen. Veelal is de plantdichtheid van douglas en fijnspar ook groter dan van den. Bij een hoge LAI-waarde kan ook een grote droge depositiesnelheid worden verwacht. Loofhout- en loofverliezende naaldhoutsoorten hebben een deel van het



■ **Figuur 4.** Gemiddelde en standaarddeviatie van het nitraat en aluminium en sulfaat gehalte in het bovenste grondwater per boomhoogteklasse

jaar een veel geringere LAI dan de groenblijvende soorten. De relatief hoge waarden gevonden onder eik kunnen worden verklaard doordat een relatief groot deel van de bemonsterde opstanden van eik voorkomen op nattere bodems rijk aan organische stof (bijvoorbeeld eerdgronden, veen- en moerige gronden). Door mineralisatieprocessen bevat het bodemvocht van deze bodems onafhankelijk van het landgebruik meer sulfaat dan de organische stofarme zandgronden (duinvaaggronden, holtpod-solen).

De verschillen die aangetroffen zijn in de concentraties van aluminium en nitraat in het bovenste grondwater tussen boomsoorten (Fig. 3) zijn ten dele vergelijkbaar met die van sulfaat in het diepe bodemvocht. De hoeveelheid stikstof, zwavel en aluminium die als gevolg van droge depositie uiteindelijk het grondwater bereikt is mede afhankelijk van de

boomsoort van een opstand. Dit is het gevolg van per boomsoort specifieke verschillen in voor droge depositie beschikbaar bladoppervlak (LAI). De gemeten aluminium-concentraties zijn het indirecte gevolg van de depositie van zuurvormende stoffen (SOx, NOx, NHx), welke door een verlaging van de pH van het bodemvocht leidt tot vrijmaking van aluminium tot de voor haarwortels en micorrizia toxische concentraties.

Bossen blijken derhalve in staat aanmerkelijk grotere hoeveelheden stikstof en zuurvormende stoffen uit de atmosfeer te kunnen filteren dan onbeboste terreinen. Een uitzondering vormen de opstanden van eik. De verklaring ligt net als bij het sulfaatgehalte in het diepe grondwater in het feit dat een relatief groot aantal eikenbossen op vochtige, organische stofrijke bodems is bemonsterd. In deze bodems treedt meer denitrificatie (nitraat-reductie) op en is de buffercapaciteit

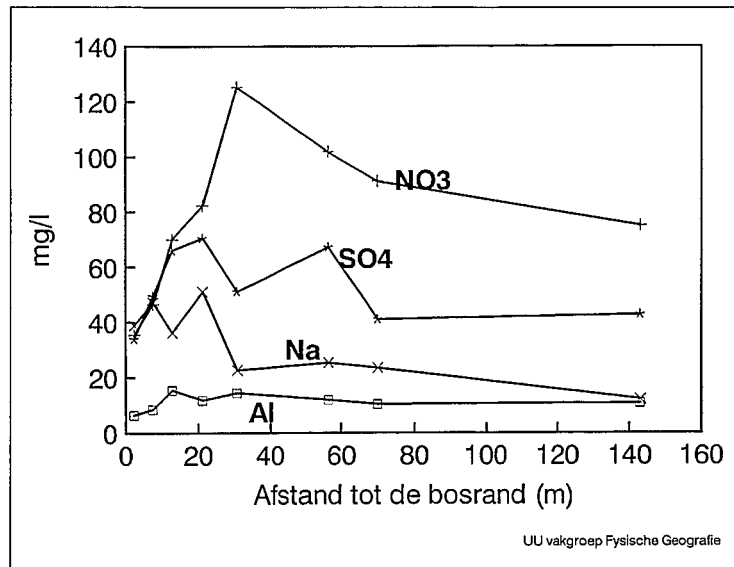
tegen verzuring groter dan in drogere, arme zandgronden. Opmerkelijk is dat de hoogste nitraat concentraties zijn aangetroffen ter plaatse van opstanden van grove den en dat bij fijnspar juist relatief lage concentraties voorkomen. Dit kan worden verklaard doordat in N-Brabant, een belangrijk emissiegebied van ammoniak, relatief veel (kleine) opstanden van grove den aanwezig zijn en de opstanden van fijnspar zich vooral in de noordelijke zandgebieden bevinden waar de ammoniak-emissies lager zijn dan in de overige zandgebieden van Nederland.

Behalve van het beschikbare bladoppervlak hier beschouwd als afgeleide van het opstandstype (boomsoort) is de droge depositie mede afhankelijk van de ruwheid van een opstand. Een

■ **Figuur 5.** Gemiddelde belasting van het bodemvocht met nitraat, sulfaat, aluminium en natrium in relatie tot de afstand van de bosrand (Larix opstand aan de rand van 't Gooi)

hogere opstand heeft een grotere ruwheid voor luchtstroming door een groter hoogteverschil tussen de hoogste en de minder hoge bomen die het bovenvlak van de kroonlaag vormen. Bij een grotere ruwheid behoort een hogere droge depositiesnelheid zodat onder een hoog bos de concentraties van door atmosferische depositie aangevoerde stoffen groter kan zijn.

De concentraties van nitraat, sulfaat en aluminium in het bovenste grondwater blijken significant te relateren aan de boomhoogte tot en met de boomhoogteklasse van 15-20 m. (Fig.4). Bij opstanden gemiddeld hoger dan 20 m treedt een lichte afname van de gemeten concentraties op. De reden van de afnemende concentraties bij de hoogste boomhoogte klassen ten opzicht van de een na hoogste kon met het databestand niet bepaald worden. Oorzaken zijn mogelijk te vinden in bodemverschillen of



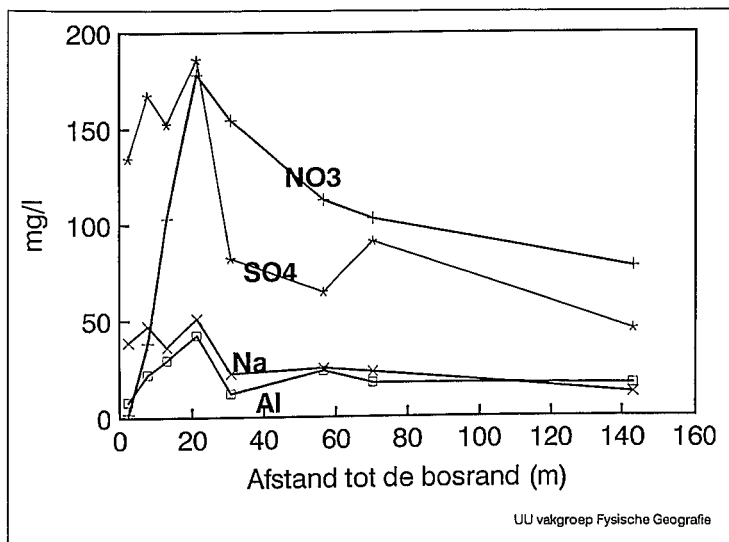
onzuiverheden in de hoogteschattingen.

Het bosrandeffect

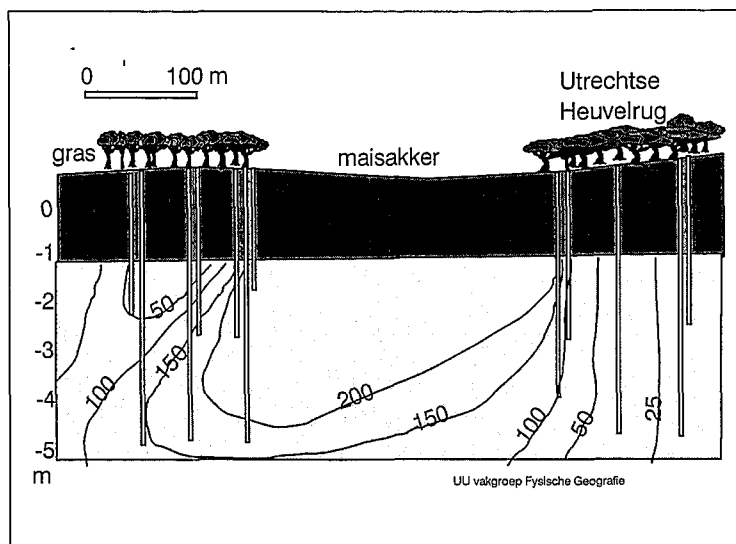
De overgang van open terrein naar bos, de bosrand, vormt voor luchtbewegingen een weerstand die groter is naarmate de boomhoogte groter is en de rand meer gesloten is (Draaijers, 1993). Ter plaatse van een bosrand wordt de luchtstroom afgeremd en wordt een deel van de horizontale windrichting omgezet in een verticale,

omdat de lucht zich niet steeds verder kan ophopen tegen een bosrand. Er is sprake van een toename van de luchturbulentie ter plaatse van een bosrand.

Ook op overgangen tussen opstanden met verschillende boomhoogte treedt deze turbulentie toename op, zodat ook daar gesproken kan worden van bosranden. Deze verhoogde turbulentie leidt tot een toename van de droge depositiesnelheid in bosranden. In feite is sprake van een bosrandzone waar deze verhoogde depositie kan optreden. De mate van depositie verhoging in deze zone wordt mede bepaald door de boomhoogte, of het boomhoogteverschil bij een bosrand tussen twee opstanden. De breedte van de bosrandzone zal groter zijn naarmate de bosrand meer open, transparant is voor luchtbeweging. Ter plaatse van een open bosrand kan de lucht zich tussen de stammen door onder de kroonlaag het bos in verplaatsen. Een verhoogde



■ **Figuur 6.** Gemiddelde belasting van het bovenste grondwater met nitraat, sulfaat, aluminium en natrium in relatie tot de afstand van de bosrand (Larix: einde Gooi)



■ Figuur 7. Nitraat concentraties in het grondwater rond een akker aan de voet van de Utrechtse Heuvelrug.

droge depositie zal dan tot dieper in het bos optreden.

Om dit verschijnsel nader te onderzoeken is een bosrand (*larix*) op zandgrond in het zuiden van 't Gooi geselecteerd, welke geëxposeerd is op het open westelijk weidegebied. In deze bosrand heeft gedurende 2 jaar een monitor onderzoek plaatsgevonden, waarbij op 8 verschillende afstanden doorvalwater is opgevangen en op elk van die afstanden op 8 plaatsen monsters zijn genomen van bodemvocht (15-20 cm -maaiveld) en op 5 plaatsen het bovenste grondwater. In figuur 5 zijn de resultaten van de analyses van het bodemvocht weergegeven. Het blijkt duidelijk dat er een aanzienlijke verhoging van de concentraties optreedt over een bosrandzone ter breedte van ca 75 m. Vergelijkbaar onderzoek heeft ook plaats gevonden op 5 bosranden in het zuidwestelijk deel van de Utrechtse Heuvelrug, maar omdat daar het grondwater te diep onder maaiveld staat beperkte dat onderzoek zich tot het bodemvocht. De resultaten verkregen op die andere lokaties zijn vergelijkbaar met de hier gepre-

senteerde uitkomsten.

In het grondwater zien we hetzelfde effect (Fig.6). Ook hier is een zone aanwezig waar de concentraties duidelijk verhoogd zijn ten opzichte van die verder bosinwaarts.

Zeer geprononceerd is het effect voor nitraat en sulfaat dat waarden tot meer dan drie maal de drinkwaternorm bereikt. Hierbij dient vermeld te worden dat dit bos zich bevindt aan de rand van het Gooi en wel zodanig dat de grondwaterstroming van het bos naar de bosrand toe is gericht. Beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit door het landgebruik als gevolg van grondwaterstroming van buiten het bos is derhalve niet te verwachten. De gemeten verhoogde concentraties in bodemvocht en grondwater kunnen derhalve alleen verklaard worden door verhoogde depositie.

De hydrologische positie

Bij de bemonstering en analyse van het grondwater met als doel een indicatie van de relaties tussen grondwaterconcentraties en het grondgebruik (bosstype) te bepalen dient bij de locatiekeuze rekening gehouden te worden

met het bosrandeffect en de richting van de grondwaterstroming. Het databestand zal anders zoveel onzuivere gegevens bevatten dat bij statistische bewerking gemakkelijk over- of onderschatting van de gemiddelde concentraties in bodemvocht en grondwater in relatie tot het opstandtype kan optreden. Een grote spreiding in de te meten concentraties zal er ook toe kunnen leiden dat geen significant verschillende belasting van bodemvocht en grondwater tussen opstandtypen kan worden vastgesteld, ook als die verschillen er wel zijn. Ook bij het onderzoek naar de betekenis van het bodemtype voor deze verschillen of in onderzoek naar kringloopprocessen in bosesystemen kunnen door deze ruimtelijke processen interpretatieproblemen ontstaan. De met dergelijke onzuivere bestanden te berekenen gemiddelde concentraties zullen in het algemeen te hoog zijn voor grondwaterbelasting onder bos en natuur.

In figuur 7 is de gemiddelde nitraatconcentratie weergegeven in een doorsnede van een gebied aan de voet van de Utrechtse Heuvelrug. In dit gebied wordt sinds 1983 in een intensief meetnet de belasting van het grondwater rond een met bos omgeven snij-maisakker tot een diepte 7.5 m (beneden maaiveld) bestudeerd. In dit geval is sprake van een bijna horizontale grondwaterstroming van rechts naar links in deze doorsnede. Onder het linker bos worden daardoor nitraatconcentraties tot boven de 200 mg/L gemeten. De verhoogde concentraties aan de stroomopwaartse bosrand, waar concen-

traties tussen 100 en 150 mg/L worden gemeten zijn het gevolg van het inwaaien van ammoniak: het bosrandeffect.

De laagste waarden (minder dan 5 mg NO₃-/L) zijn gemeten op meer dan 100 m. bovenstrooms van de akker.

Uit het 10-jarig onderzoek is voorts gebleken dat er zowel bovenstrooms als benedenstrooms van de akker sprake is van een toename van de nitraatconcentraties in het grondwater. Ook de laagste concentraties zijn toegenomen in deze periode, ondanks het feit dat op deze akker de laatste jaren de mest wordt geïnjecteerd. De hoge concentraties gevonden onder de bosranden zijn derhalve niet alleen afkomstig van plaatselijke emissies (tijdens en kort na bemesting van de akker) maar uit een groter gebied ten zuidwesten en westen van het bemeten gebied.

Discussie

Vervangen van opstanden met groenblijvende naaldbhoutsoorten door geen bos (hei of onbemest grasland) of door loofhout levert een verlaging van de gemiddelde grondwaterconcentratie voor sulfaat van 14%-3%, voor aluminium van 25%-32% en voor nitraat van 37%-25%. Dit als gevolg van de grotere droge depositie op naaldbomen die in de winter een aanzienlijk groter depositieoppervlak hebben dan loofbomen en de grotere interceptie van naaldboutbos.

Doordat bij deze beheersmaatregel de atmosferische depositie afneemt (bij minder bos) wordt het gebied met verhoogde depositie als geheel groter. De export van atmosferische verontreinigingen zal daardoor toenemen. Een deel van het probleem wordt dan verplaatst naar het buitenland.

In plaats van omhakken van het bos zal daarom het beperken van de agrarische en andere emissies

getuigen van op verbetering gericht beleid.

Met betrekking tot bosranden is op te merken dat, uitgaande van een bosrandzone waarin het genoemde bosrandeffect zal optreden ter breedte van 75 m, meer dan 50% van het Nederlandse bos vanuit oogpunt van depositie gezien kan worden als bosrand. Indien het bos beschouwd wordt als buffer of opnamegebied voor luchtverontreiniging, dient bedacht te worden dat voor de Nederlandse luchtbelasting met stikstof zeker 75 km aaneengesloten bos nodig is, of een gebied van minimaal 35 km met bossen in stroken ter breedte van 2 bosranden (100-150 m) en daartussen open stroken waar geen stikstof emissie optreedt. Vanuit de wens het bos te beschermen tegen droge depositie van ammoniak is een bosrand van douglas of fijnspar aan te bevelen. Door deze rand in delen steeds vroegtijdig te vervangen kan een blijvend gesloten bosrand ontstaan hetgeen gunstig is voor het achterliggende bos. In een goed gesloten bosrand zal het bosrandeffect over een relatief smalle zone merkbaar zijn. Voorwaarde is wel dat die randen bij boskap blijven staan.

Conclusies

Een deel van de variatie in de kwaliteit van grondwater onder bos kan worden verklaard uit opstandskennmerken: boomhoogte en boomsoort.

Grote afwijkingen van de gemiddelde belasting bij bodemvocht en grondwater onder bos treden op nabij bosranden als gevolg van: verhoogde droge depositie op bosranden en door toestroming van elders belast grondwater.

Beperking van de emissies door agrarische bedrijven nabij bosranden is betrekkelijk zinloos indien niets gedaan wordt aan algemene gebieds-emissiereduc-

tie: i.p.v. bedrijfsgerichte benadering is een gebiedsgerichte benadering nodig.

Voor naaldbout filtert relatief grote hoeveelheden stoffen uit de atmosfeer hetgeen van negatieve betekenis is voor de kwaliteit van bodemvocht en grondwater. Vervangen van naaldbos door loofbos, hei of onbemest grasland heeft een positieve betekenis voor de kwaliteit van het grondwater.

Verminderen van de landbouwemissies op lucht en bodem zijn echter van grotere betekenis voor de kwaliteit van bos, bosbodem en grondwater.

Geconcludeerd kan worden dat in het algemeen bos een uitstekende vorm van grondgebruik is, mede omdat bossen in staat zijn een deel van de in Nederland geproduceerde emissies ook in Nederland weg te filteren uit de atmosfeer. Met betrekking tot de kwaliteit van het grondwater volgt uit het bovenstaande wel een voorkeur voor loofbos.

Dankwoord

Bij de samenstelling van dit artikel is in het kader van een samenwerkingproject gebruik gemaakt van gegevens van het RIVM en het Staring Centrum, waarvoor dank. Zonder de bereidwillige medewerking van Natuurmonumenten zou het onderzoek in "Einde Gooi" niet plaats hebben kunnen vinden. Dank gaat ook uit naar de student-onderzoekers T. Hoogland en O. Riezebos die substantiële bijdragen hebben geleverd door de verzameling van veldgegevens en analyses.

Literatuurverwijzing

Draaijers, G., 1993: The variability of atmospheric deposition to forests. The effects of canopy structure and forest edges. Proefschrift, Universiteit Utrecht.