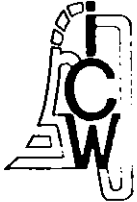


ALTERRA

Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

ICW nota 1862
april 1988



nota

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

ATMOSFERISCHE DEPOSITIE EN DE GEVOLGEN VOOR DE KWALITEIT
VAN HET GRONDWATER ONDER EEN NAALD- EN EEN LOOFBOS IN DE
GELDERSE VALLEI

ing. P.C. Jansen

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

NOTA/1862

INHOUD

	blz.
SAMENVATTING	i
1. INLEIDING	3
2. OPZET VAN HET ONDERZOEK	5
3. KWANTITEIT EN KWALITEIT VAN DE NEERSLAG	9
3.1. De hoeveelheid neerslag, doorval en stamafvoer	9
3.2. De kwaliteit van de neerslag	11
3.3. De depositie in het dennebos	13
3.3.1. De kwaliteit van de doorval en de stamafvoer	13
3.3.2. De depositie in de strooisellaag	15
3.3.3. De zuurdepositie	17
3.4. De depositie in het Amerikaanse eikebos	18
3.4.1. De samenstelling van de doorval en de stamafvoer	18
3.4.2. De depositie in de strooisellaag	19
3.4.3. De zuurdepositie	20
3.5. Verschillen tussen de depositie in het dennebos en in het Amerikaanse eikebos	21
4. DE KWALITEIT VAN HET GRONDWATER	23
4.1. De verzuring van grondwater	23
4.2. De kwaliteit van het grondwater onder het dennebos	24
4.3. De kwaliteit van het grondwater na het verwijderen van een dennebos	27
4.4. De kwaliteit van het grondwater onder het Amerikaanse eikebos	28
5. CONCLUSIES	31
LITERATUUR	33

ALTERRA

Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

NOTA/1862

1

SAMENVATTING

In een natuurgebiedje in de Gelderse Vallei is onder een klein dennebos, dat op een infiltratieprofiel ligt, sterk verzuurd grondwater aangetroffen. Het ligt voor de hand dat de atmosferische depositie van zure en verzurende stoffen hiervoor verantwoordelijk is. Om te zien in hoeverre dit inderdaad het geval is en welke verschillen er zijn met de depositie in een loofbos is een onderzoek verricht naar de aard en de omvang van de depositie in een klein dennebos en in een amerikaans eikebos.

In een centraal gelegen open plek in het natuurgebiedje is de neerslag verzameld en in de beide bossen zijn de doorval en de stamafvoer opgevangen. Gedurende een jaar werd dit water om de twee à drie weken bemonsterd en vervolgens geanalyseerd. De stamafvoer in beide bossen was erg klein. Ondanks het feit dat hierin de hoogste concentraties werden gemeten is de bijdrage aan de totale depositie marginaal. Via de doorval, die in het dennebos 70% en in het Amerikaanse eikebos 88% van de hoeveelheid neerslag bedroeg, is een aanzienlijke hoeveelheid chloride, sulfaat en ammonium opgevangen. Het verschil met de depositie via de neerslag vormt de droge depositie die op de bladeren en takken is afgezet.

Met een opstelling die in de grond was aangebracht werd aangetoond dat er meer sulfaat en ammonium als droge depositie op de overwegend vochtige strooisellaag onder het bos wordt afgezet, dan er via droge depositie op de naalden en takken terecht komt.

In de omgeving van het natuurgebiedje wordt veel drijfmest uitgereden. Daardoor vervluchtigt er ammoniak. Aan condensatiekernen en op natte bladeren en dergelijke neutraliseert de ammoniak de zwavelzuur, dat uit zwaveldioxide is gevormd, tot ammoniumsulfaat. De opnamecapaciteit van de oppervlakken nemen daardoor sterk toe.

Zwaveldioxide, stikstofoxides en ammoniak zijn de belangrijkste verzurende stoffen. De potentiële zuurdepositie verschilt voor beide bossen weinig. Onder het dennebos bedroeg dit $22,7 \text{ keq H}^+ \cdot \text{ha}^{-1}$ gedurende het meetjaar en onder het Amerikaanse eikebos $20,6 \text{ keq H}^+ \cdot \text{ha}^{-1}$. De bijdrage via de neerslag bedroeg in beide bossen circa 10%, via de droge depositie op de bladeren, takken en stammen circa 40% en via droge depositie in de strooisellaag circa 50%.

De bijdrage van sulfaat, nitraat en ammonium in de zuurdepositie bedroeg in het dennebos respectievelijk 41, 10 en 49% en in het Amerikaanse eikebos 44, 9 en 47%.

Naast verzurend werkt een gedeelte van de stikstofverbindingen ook bemestend. De totale depositie gedurende het meetjaar bedroeg in het dennebos $190 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}(\text{N})$ en in het Amerikaanse eikebos $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}(\text{N})$. Door de grote verdamping van bossen vindt er een indikking plaats van de geïnfiltreerde doorval en stam^{afvoer}. Onder het dennebos bedraagt deze factor 3,2. Het hiermee berekende gehalte aan chloride komt overeen met het gemeten gehalte in het grondwater. Het berekende sulfaatgehalte was echter 30% kleiner dan het in het grondwater gemeten gehalte. De zuurneutralisatiecapaciteit van de zandbodem onder het dennebos is klein. Tijdens het verzuringsproces worden kationen gemobiliseerd, die daardoor in relatief hoge concentraties in het grondwater aanwezig zijn. De pH van het grondwater bedraagt 3,9.

Het ammonium kan door de vegetatie worden opgenomen, een groot gedeelte nitrificeert echter in de bodem en wordt als nitraat in het grondwater teruggevonden.

Na het kappen van het dennebos is de droge depositie veel minder groot. De verplaatsing van stoffen door de bodem gaat veel sneller als gevolg van de toeneming de hoeveelheid nuttige neerslag. Het zuurfront verplaatst zich echter langzaam.

De indikkingsfactor van de geïnfiltreerde neerslag onder het Amerikaanse eikebos bedraagt 2,9. Bovenin het profiel treedt er echter een menging op met kwelwater. Door de grote buffercapaciteit is hier het grondwater niet verzuurd. De pH bedraagt 7,2. Doordat het profiel tot vrijwel bovenin anaeroob is en er voldoende organische stof beschikbaar is, wordt nitraat gedenitrificeerd en een gedeelte van het sulfaat gereduceerd. Daardoor verdwijnt er stikstof (N_2) en zwavel (H_2S) uit het bodemsysteem.

ALTERRA
Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

1. INLEIDING

In de jaren zestig en zeventig was de verdroging van natte natuurgebieden het onderwerp van veel publicaties. Van meer recente datum zijn de berichten over de zure regen en de gevolgen daarvan voor de natuur. Soms zijn deze gevolgen zichtbaar in de vorm van afstervende bomen en een wijziging van de vegetatie. Ook wanneer de gevolgen (nog) niet zichtbaar zijn kunnen de effecten die de zure neerslag op de bodem en het grondwater heeft vaak al wel worden aangetoond.

In het Peelgebied zijn in het bovenste grondwater onder kleine dennebossen, die op de wat hogere gedeeltes van het pleistocene dekzand gelegen waren, erg hoge concentraties ionen aangetroffen (OOSTEROM en VAN SCHIJNDEL, 1979). In een gebiedje in de Gelderse Vallei werden in het grondwater vergelijkbare gehalten gemeten (KEMMERS en JANSEN, 1980). Ook hier betrof het grondwater onder dennebosjes. Op slechts enkele tientallen meters van een van de dennebosjes werd in hetzelfde natuurgebiedje onder een klein loofbos een weliswaar rijke, maar geheel andere samenstelling van het grondwater aangetroffen. Dit bosgedeelte is wat lager gelegen, heeft een ander bodemtype en er treedt kwel op. Het zuur wordt er in belangrijke mate gebufferd en er treden reductieprocessen op.

De gehalten in het grondwater onder beide bostypen vormde de aanleiding om een onderzoek te doen naar de omvang van de depositie en de verdere processen die tot de grote verschillen in de samenstelling leiden. Daarnaast wordt voor chloride en voor de belangrijkste verzurende stoffen gekeken in hoeverre gemeten en berekende gehalten met elkaar overeen komen. Onder het dennebos zijn met indikkingsfactoren die uit de literatuur bekend zijn (APPELO, 1982; HOEKS, 1983) veel lagere gehalten berekend dan in de praktijk zijn gemeten. Tevens wordt gekeken naar de invloed van de intensieve veehouderij die op vrij grote schaal aanwezig is.

Behalve in hoofdstuk 2, waarin het gebied en de opzet van het onderzoek wordt besproken, is in deze nota is zoveel mogelijk een scheiding aangehouden tussen het naaldbos en het loofbos. Hoofdstuk 3 is gewijd aan de neerslag en de berekening van de interceptie, doorval en stamafvoer van beide bostypen. In dit hoofdstuk komen ook de resultaten van het depositie-onderzoek ter sprake. Er wordt een uitvoerig overzicht gegeven van de meetresultaten.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 de kwaliteit van het grondwater behandeld. Hierbij komen (summier) enkele processen ter sprake die in een infiltratie- en in een kwelprofiel plaatsvinden.

In 1985 is een deel van een dennebosje gekapt, waarna er een korte vegetatie voor in de plaats is gekomen. Daarbij is onderzocht welke consequenties dit heeft voor de samenstelling van het grondwater. Enkele resultaten hiervan zijn in hoofdstuk 4 opgenomen. Tot slot volgt er een hoofdstuk met de belangrijkste conclusies.

2. OPZET VAN HET ONDERZOEK

Het gebied waar het onderzoek is uitgevoerd heet Groot Zandbrink. Het is een natuurgebied en ligt in de Gelderse Vallei in de omgeving van Leusden. In figuur 1 is te zien dat er in deze streek veel intensieve veehouderijen gelegen zijn.

Het onderzoeksgebied vormt een ongeveer 10 hectare groot restant van een voormalig plag- en hooilandje. De oorspronkelijke begroeiing bestond in de lager gelegen gedeelten uit een soortenrijk grasland. Op een wat hoger gelegen dekzandruggetje was een heidevegetatie aanwezig. In de loop van deze eeuw is het gebied in verval geraakt en groeiden de lage gedeelten langzamerhand dicht met broekbos en de hogere delen met grove den, berk en eik. Enkele hectaren in het midden van het gebiedje zijn niet met bomen begroeid. Daar bestaat de vegetatie op de hogere delen voornamelijk uit pijpestrootje en op de lagere delen uit blauwgrasland.

Onder het dekzandruggetje treedt vooral in de winter een opbolling van het freatisch vlak op. Daardoor vindt er via het grondwater een ondiepe afstroming van dit ruggetje naar de lagere delen plaats. De hoge delen hebben een duidelijk infiltratieprofiel en de lage delen een kwelprofiel dat door zowel de diepe kwel als door de oppervlakkige toestroming van de hogere delen gevoed wordt.

De kwaliteit van het grondwater in het natuurgebiedje wordt sinds 1978 op een twintigtal plaatsen regelmatig gemeten (KEMMERS en JANSEN, 1980). In infiltratiegebieden wordt het grondwater gevoed door infiltrerend regenwater en de opgeloste stoffen in dit water zijn direkt of indirekt afkomstig uit de atmosfeer. Deze atmosferische depositie kan onderscheiden worden in een droge en in een natte depositie. De natte depositie betreft de depositie van stoffen die in de neerslag zijn opgelost en met het regenwater op het aardoppervlak terecht komen.

Droge depositie betreft de depositie van stoffen zonder tussenkomst van neerslag. De stoffen worden in droge vorm (stofdeeltjes, gasvormige stoffen) afgezet op bij voorbeeld de bodem en de vegetatie. Door een regenbui kan deze droge depositie dan meespoelen en vervolgens in de grond terecht komen.

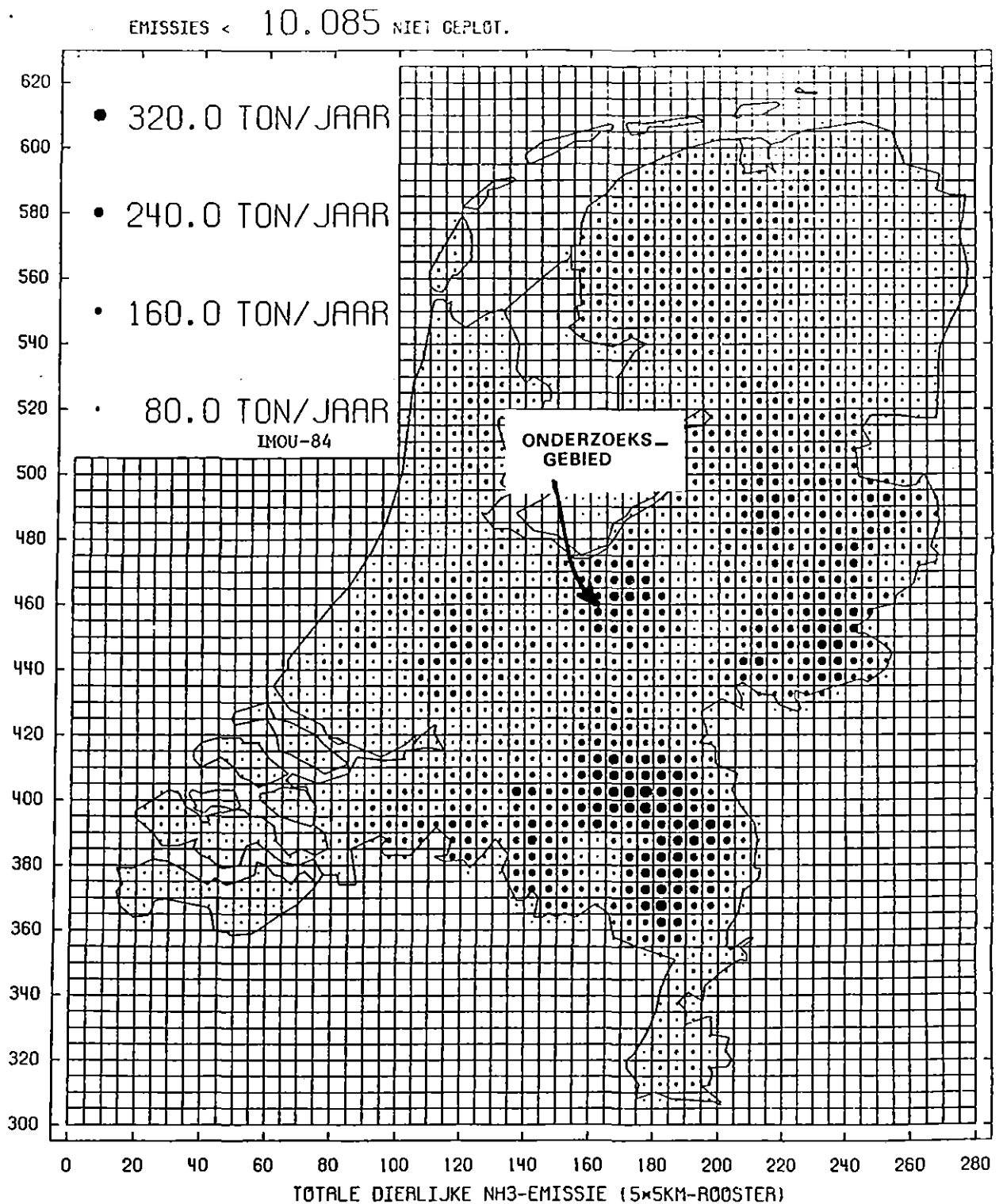


Fig. 1. De totale dierlijke emissie van ammoniak in 1982 (naar
BUIJSMAN e.a., 1984)

Een belangrijk gedeelte van de depositie bestaat uit verzurende stoffen. Hiervoor zijn in hoofdzaak drie stoffen verantwoordelijk, te weten zwaveldioxide (SO_2) dat voornamelijk uitgestoten wordt door de industrie, stikstofoxides (NO_x) dat afkomstig is van het verkeer en ammoniak (NH_3) dat door vervluchtiging tijdens het uitrijden van mest in de atmosfeer terecht komt. Deze stoffen kunnen in de lucht en in de bodem omgezet worden in salpeterzuur (HNO_3) en in zwavelzuur (H_2SO_4). Bij de bespreking van de resultaten zal aan deze stoffen de meeste aandacht worden geschonken.

In het onderzoeksgebied is vanaf september 1985 een jaar lang de neerslag op een aantal plaatsen opgevangen.

De direkte neerslag is in het open middengedeelte van het reservaat opgevangen. Behalve natte depositie is er in de trechter waarmee de neerslag werd verzameld ook droge depositie terecht gekomen. Deze droge depositie, die meestal om praktische redenen bij de natte depositie wordt gerekend, is lager dan de depositie op kale grond. Dit is vooral een gevolg van verschillen in ruwheid en van windeffecten.

Het naaldbos waaronder de neerslag is verzameld, bestond uit grove dennen (*Pinus sylvestris*). De mate van bedekking door de takken en bladeren, de zogenaamde kruindichtheid, van dit bos bedroeg het hele jaar circa 80% en de leeftijd van de bomen was circa 40 jaar. Het loofbos bestond uit Amerikaanse eiken (*Quercus rubra*). De kruindichtheid bedroeg zomers 80% en 's winters 5%. Deze bomen waren eveneens ongeveer 40 jaar oud.

Niet alle neerslag die op een bos valt komt ook op de grond terecht. Een gedeelte blijft op de takken en bladeren achter en verdampt daar. Dit is de interceptie. Van de neerslag die wel de grond bereikt is de stamafvoer en de doorval opgevangen. De stamafvoer is het gedeelte van de neerslag dat via de stam naar de voet van de boom stroomt. De doorval bestaat uit de kruindrup en de direkte neerslag. Dit laatste is de neerslag die zonder blad of tak te raken op de grond terecht komt.

De neerslag op het open veld en de doorval onder de bomen werden in trechters opgevangen. Voor de uitstroomopeningen waren nylon filters aangebracht. De trechters waren circa 25 cm boven het maaiveld opgesteld, zodat er geen water via de bodem in kon spatten.

Voor het opvangen van de stamafvoer is een in de lengte doorgesneden slang spiraalsgewijs een keer rond de stam van de boom aangebracht. Door het aanbrengen van siliconenkit kon een goede afsluiting tussen de slang en de stam worden verkregen.

Alle monsters werden verzameld in flessen die in de grond stonden opgesteld. De halzen van de flessen, die boven de grond uitstaken, werden na iedere bemonstering afgedekt. Op die manier bleef het opvangen water relatief koel en werd eventuele algengroei door lichtgebrek tegengegaan. Over iedere fles was ook nog een nylon filter aangebracht.

VAN BREEMEN e.a. (1982) bemonsterden op een plek de doorval en de stamafvoer van een bos en gebruikten daarvoor 12 respectievelijk 6 opstellingen. Op grond van de analyseresultaten bleek, dat de afzonderlijke monsters vrij goed overeenkwamen met het gemiddelde van alle monsters samen. In het gebiedje in de Gelderse Vallei is op iedere lokatie een meetopstelling gemaakt. Voor het opvangen van de doorval is een grote trechter gebruikt. Deze had een oppervlakte van ongeveer 100 cm^2 . Op grond van bovengenoemde bevindingen is aangenomen dat hiermee representatieve monsters zijn verkregen.

In de filters werden regelmatig insecten, bladeren en takjes aangetroffen. Verderop zal blijken, dat dit geen aantoonbare gevolgen had op de samenstelling van het verzamelde water.

De frequentie van bemonsteren was afhankelijk van de hoeveelheid neerslag. Afgezien van enkele perioden met vorst of langdurige droogte werd gemiddeld om de twee à drie weken bemonsterd.

Als gevolg van de strenge winter kon in de maanden januari en maart geen goede bemonstering worden uitgevoerd. In februari is geen noemenswaardige hoeveelheid neerslag gevallen.

Van de opgevangen neerslag zijn de volgende parameters geanalyseerd: de zuurgraad (pH), het elektrisch geleidingsvermogen (EC) en de gehalten aan natrium (Na^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), chloride (Cl^-), sulfaat (SO_4^{2-}), bicarbonaat (HCO_3^-), aluminium (Al^{3+}), ijzer (Fe^{3+}), nitraat (NO_3^-) en ammonium (NH_4^+). Kalium (K^+) is incidenteel bepaald.

3. KWANTITEIT EN KWALITEIT VAN DE NEERSLAG

3.1. De hoeveelheid neerslag en doorval en stamafvoer

Het hangt niet alleen van de structuur en de leeftijd van een bos af hoe groot de interceptie, de doorval en de stamafvoer is, maar evenzeer van de duur en de intensiteit van de neerslag. De interceptie kan in een aantal gevallen oplopen tot 40% van de neerslag, terwijl de stamafvoer kan variëren van vrijwel 0 voor erg ruwe stammen tot meer dan 10% voor gladde stammen.

Voor het berekenen van toevoer van stoffen naar de bodem via de doorval en de stamafvoer dient de grootte ervan bekend te zijn. Het verschil tussen de neerslag en de interceptie is gelijk aan de som van de doorval en de stamafvoer.

Voor het studiegebied zijn de neerslaggegevens ontleend aan het KNMI meetstation in Woudenberg (KNMI, 1985-1986). Deze worden per dag opgegeven. In tabel 1 zijn de maandtotalen opgenomen.

Uit eerder onderzoek (JANSEN, 1986) naar verschillende manieren waarop de verdamping en de interceptie van bos bepaald kunnen worden, zijn met de volgende formule (BEGELEIDINGSGROEP GELGAM, 1984) goede resultaten verkregen voor neerslaggegevens die per dag zijn ingevoerd:

$$I_a = S_c \text{ Im}(a_0 + a_1 dt + a_2 dt^2) \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

met: I_a = grootte van het interceptiereservoir (mm)
 S_c = fractie bodembedekking (-)
 Im = interceptiecapaciteit van de vegetatie (mm)
 a_0, a_1, a_2 = regressiecoëfficiënten (-)
 dt = tijdsinterval ($t < 11$ dagen) (-)

De regressiecoëfficiënten en de interceptiecapaciteit zijn gebaseerd op bekende hoeveelheden interceptie en neerslag en zijn afhankelijk van het type vegetatie.

Voor een naaldbos zijn Im , a_0 , a_1 en a_2 respectievelijk 2,0, 0,6292, 0,4114 en -0,0019. Met een bedekking van het dennebos van 80% wordt de grootte van het interceptiereservoir:

$$I_a = 0,80 \times 2,0 \times (1,0387) = 1,66 \text{ mm}$$

Voor een loofbos bedraagt de interceptiecapaciteit in het zomerhalfjaar (april tot oktober) 1,5 en in het winterhalfjaar (oktober tot april) 0,5. De regressiecoëfficiënten zijn in zomer en winter gelijk aan elkaar: 0,6032, 0,4355 en -0,0022.

Het Amerikaanse eikebos heeft in de zomer een bedekking heeft van 80%. Het interceptiereservoir is dan:

$$I_a = 0,80 \times 1,5 \times (1,0365) = 1,24 \text{ mm}$$

en met een bedekking van 5% voor het winterhalfjaar wordt het interceptiereservoir:

$$I_a = 0,05 \times 0,5 \times (1,0365) = 0,03 \text{ mm}$$

Het gedeelte van de neerslag dat wel de bodem bereikt is gelijk aan het verschil tussen de de neerslag en de interceptie. Hiervan is een verdeling gemaakt tussen doorval en stamafvoer. Op grond van de opvangen hoeveelheden is de stamafvoer van de dennen geschat op 0,5% en van de Amerikaanse eiken op 1%. De rest, 99,5%, respectievelijk 99,0% is doorval.

In tabel 1 zijn naast de neerslag ook de interceptie, de doorval en de stamafvoer gegeven. De doorval is niet onderscheiden in een vrije doorval en kruindrup.

Tabel 1. De hoeveelheid neerslag en de interceptie, doorval en stamafvoer van dennen

periode	neerslag (mm)	DENNEN			AMERIKAANSE EIKEN		
		interceptie (mm)	doorval (mm)	stamafvoer (mm)	interceptie (mm)	doorval (mm)	stamafvoer (mm)
september '85	66,3	22,8	43,3	0,3	17,0	48,9	0,4
oktober	29,6	8,4	21,2	0,1	2,5	26,8	0,3
november	79,9	27,3	52,3	0,3	0,9	78,2	0,8
december	89,0	26,0	62,7	0,3	0,9	87,2	0,9
januari '86	129,1	33,9	94,7	0,5	1,4	126,4	1,3
februari	0,6	0,6	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0
maart	83,1	19,6	63,2	0,3	1,0	81,3	0,8
april	32,0	19,1	12,8	0,1	7,3	24,5	0,2
mei	72,5	22,2	50,0	0,3	17,1	54,8	0,6
juni	51,4	13,4	37,8	0,2	9,6	41,4	0,4
juli	53,7	10,4	43,1	0,2	8,3	44,9	0,5
augustus	74,4	20,8	53,8	0,2	15,2	58,6	0,6
Totaal	761,6	224,5	534,9	2,8	81,5	673,3	6,8
% v.d. neerslag		29,5	70,2	0,4	10,7	88,4	0,9

3.2. De kwaliteit van de neerslag

De natte depositie in het natuurgebied hangt af van de duur en de intensiteit van de neerslag en, afhankelijk van de windrichting, van de ligging van het gebied ten opzichte van verontreinigingsbronnen. Daardoor treden er vaak aanzienlijke verschillen op tussen de meetperiodes. Dit blijkt ook uit tabel 2, waar de samenstelling van de neerslag, als gewogen gemiddelde, per maand is gegeven. Onderaan de tabel is van de neerslag in De Bilt van een aantal parameters het gemiddelde gehalte over de periode '78-'85 gegeven (KNMI en RIVM, 1986). Deze gehalten komen over het algemeen goed overeen met die in het natuurgebiedje gemeten zijn.

Tabel 2. Gemiddelde samenstelling (gewogen) van de neerslag in een natuurgebiedje nabij Leusoen over de periode september 1985 tot september 1986.

PERIODE	NEER- SLAG (mm)	EGV mS/m	pH -	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg N/l	NH ₄ ⁺ mg N/l	Al ³⁺ mg/l	Fe ³⁺ mg/l
september '85	66,3	4,1	5,6	0,6	0,7	0,3	0,1	2,7	3,8	1,7	1,2	2,8	-	-
oktober	29,6	2,0	6,2	-	0,3	0,4	0,0	2,0	2,2	1,1	0,3	0,8	0,00	0,00
november	79,9	8,0	4,3	2,7	3,6	1,5	0,6	7,8	8,4	0,1	0,1	2,6	0,18	0,12
december	89,0	11,7	5,2	-	1,4	0,3	0,2	7,2	7,3	1,0	0,3	3,3	0,05	0,04
januari '86	129,1	7,5	5,1	-	1,1	0,2	0,1	5,5	5,8	0,6	0,3	2,8	0,03	0,02
februari	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
maart	87,8	3,3	5,0	0,2	0,8	0,1	0,0	3,8	4,8	0,2	0,3	2,2	0,00	0,00
april	32,0	4,5	6,0	0,2	0,8	0,0	0,1	6,2	6,1	0,1	0,8	2,6	0,02	0,01
mei	72,5	4,9	4,1	0,7	0,9	0,9	0,1	7,2	8,2	0,0	0,4	1,4	-	-
juni	51,4	4,2	3,6	-	1,8	1,6	0,2	3,3	6,5	0,1	0,1	0,7	0,07	0,18
juli	53,7	4,4	3,7	-	0,8	0,7	0,1	2,8	4,0	0,0	0,3	0,7	0,06	0,14
augustus	74,4	4,5	4,2	-	1,2	0,7	0,1	3,7	4,3	0,0	0,5	1,3	0,15	1,63
Totaal	761,6	4,8	5,2	-	1,3	0,6	0,1	5,0	5,8	0,5	0,4	2,1	-	-
De Bilt '78-'85			4,4		2,1	0,6	0,3	3,8	6,3	0,0	0,7	1,5		

Vooraf ammonium en sulfaat geven een goede indruk van de verontreiniging en de potentiële zuurlast van de neerslag. De gehalten van beide ionen, maar ook van chloride, zijn vanaf november tot mei/juni het hoogst. Tijdens deze periode wordt veel drijfmest uitgereden. De lage gehalten in oktober 1985 zijn mogelijk het gevolg van de geringe hoeveelheid neerslag in die maand die bovendien in de vorm van een paar forse buien was gevallen.

De potentiële zuurdepositie kan worden uitgedrukt als maximale hoeveelheid H^+ ionen die vrij kunnen komen. Via de neerslag werd tijdens het meetjaar een hoeveelheid van $2,3 \text{ keq ha}^{-1}$ gemeten. De bijdrage van sulfaat, ammonium en nitraat hierin zijn respectievelijk 40, 50 en 10%. Ten opzichte van de verhouding van de gemiddelde depositie van deze stoffen zoals die in tabel 3 staat aangegeven, is het aandeel van de stikstofoxiden hier klein. Het aandeel van ammonium is echter beduidend groter. Via vervluchtiging van mest komt deze stof als ammoniak in de atmosfeer terecht en slaat binnen een beperkte afstand voor een groot gedeelte weer neer. Zoals figuur 1 al liet zien, wordt er in de regio veel mest verspreid.

Tabel 3. De gemiddelde depositie van zuur en verzurende stoffen in Nederland rond 1980 (naar VAN AALST en DIEDEREN, 1982).
Getallen in $\text{keq } H^+ \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$

	NO_x	NH_3^+ NH_4^+	SO_x	Totaal
droge depositie	0,80	1,32	1,69	3,81 (66%)
natte depositie	0,42	0,68	0,89	1,99 (34%)
totaal	1,22	2,00	2,58	5,80
bijdrage in totaal	21%	34%	45%	

Kolenbrander (niet gepubliceerd) berekende dat er in Nederland een stikstofemissie plaatsvindt van circa $75 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Hiervan is 39 kg afkomstig uit de landbouw en 35 kg is afkomstig van het verkeer en de industrie. Er werd 11,0, respectievelijk 6,5 kg in regenvangers teruggevonden. Van het resterende gedeelte zal een hoeveelheid als droge depositie zijn afgezet.

Tijdens het meetjaar week de hoeveelheid neerslag weinig af van het gemiddelde. Daarmee is ruim $19 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ in het natuurgebiedje terecht gekomen. Dit is vrijwel gelijk aan de $17,5 \text{ kg}$ die Kolenbrander opving. De verdeling is echter anders. Tijdens het meetjaar bedroeg de verhouding tussen ammoniumstikstof en nitraatstikstof 5:1, in tegenstelling tot de verhouding van 2:1 van Kolenbrander.

3.3. De depositie in het dennebos

3.3.1. De kwaliteit van de doorval en de stamafvoer

In de tabellen 4 en 5 is per maand de samenstelling van de doorval en de stamafvoer van de dennen gegeven.

Tabel 4. Gemiddelde samenstelling (gewogen) van de doorval van grove dennen over de periode september 1985 tot september 1986.

PERIODE	HOEVEEL- HEID (mm)	EGV mS/m	pH -	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg N/l	NH ₄ ⁺ mg N/l	Al ³⁺ mg/l
september '85	43,3	14,4	5,6	-	5,4	2,4	0,8	20,8	23,2	5,1	3,9	9,6	-
oktober	21,2	20,3	6,4	-	6,0	2,5	0,9	21,0	31,7	17,8	0,0	17,4	0,10
november	52,3	21,4	5,7	-	11,4	2,2	1,5	28,7	39,5	3,8	4,1	13,9	0,05
december	62,7	29,0	6,2	13,3	6,4	1,3	1,0	22,6	70,0	12,1	0,8	21,7	0,05
januari '86	94,7	26,7	6,0	8,5	5,8	1,4	1,0	16,7	66,7	7,3	1,1	20,3	0,05
februari	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
maart	63,2	24,3	5,5	3,7	5,1	1,6	1,0	10,8	63,3	2,5	1,4	19,0	0,04
april	12,8	15,4	5,5	3,4	3,8	0,9	0,6	15,0	36,1	1,3	2,1	8,4	0,07
mei	50,0	13,4	5,0	3,5	2,6	1,7	0,5	14,9	28,3	0,4	2,0	11,7	-
juni	37,8	13,0	4,7	-	5,5	1,4	0,6	17,8	33,9	0,8	1,8	8,5	-
juli	43,1	13,7	4,7	-	3,3	2,0	0,7	11,7	21,3	1,3	2,4	8,8	0,14
augustus	53,8	11,1	5,5	-	4,0	1,4	0,4	11,7	19,3	3,3	1,5	7,2	0,90
Totaal	534,9	19,8	5,6	-	5,6	1,7	0,9	17,3	44,0	5,1	1,9	14,5	-

Tabel 5. Gemiddelde samenstelling (gewogen) van de stamafvoer van grove dennen over de periode september 1985 tot september 1986.

PERIODE	HOEVEEL- HEID (mm)	EGV mS/m	pH -	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg N/l	NH ₄ ⁺ mg N/l	Al ³⁺ mg/l
september '85	0,3	59,8	5,0	-	10,5	1,1	0,4	54,0	124,0	1,2	12,3	60,9	-
oktober	0,1	96,8	4,6	-	17,6	2,3	1,0	54,6	191,0	0,0	14,1	102,4	-
november	0,3	143,5	4,3	18,2	27,7	6,3	2,5	75,1	232,4	0,1	11,6	163,5	0,51
december	0,3	140,2	4,3	20,7	27,8	5,7	2,9	76,1	231,7	0,0	9,6	208,9	0,53
januari '86	0,5	125,7	4,5	18,1	24,1	4,0	2,1	57,3	213,0	0,1	8,3	160,0	0,55
februari	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
maart	0,3	111,1	4,7	15,5	20,4	2,2	1,2	38,4	194,3	0,5	7,4	111,0	0,57
april	0,1	44,4	4,9	5,8	8,2	0,3	3,1	27,4	94,0	0,5	4,0	52,0	0,27
mei	0,3	82,4	5,5	15,7	14,3	3,1	0,8	21,9	153,2	0,2	1,9	106,4	-
juni	0,2	116,6	4,6	-	20,0	3,8	1,3	62,9	236,6	1,0	13,4	134,8	0,93
juli	0,2	108,8	4,7	-	19,4	3,1	1,3	54,3	212,8	1,6	10,8	132,0	-
augustus	0,2	59,5	5,8	-	12,1	1,6	0,5	26,5	124,7	4,7	7,2	79,3	0,55
Totaal	2,8	105,3	4,8	-	19,7	3,4	1,6	51,9	189,5	0,7	8,9	128,5	-

Uit de concentraties en de hoeveelheid doorval en stamafvoer kan de totale belasting van het grondwater worden begerekend. Daaruit blijkt dat het aandeel van de stamafvoer erg klein is, ondanks het feit dat de gehalten aan kat- en anionen van de stamafvoer veel hoger zijn dan van de doorval. In verhouding tot de andere ionen is bij de stamafvoer het gehalte aan ammonium erg hoog, waardoor de ionenbalans een overschot aan positieve ionen heeft.

De pH van de doorval, en in mindere mate ook van de stamafvoer is hoger dan de pH van de neerslag. Het gehalte aan bicarbonaat hangt hier direkt mee samen. De concentraties van natrium, magnesium en nitraat, maar meer nog van sulfaat en ammonium, zijn in vergelijking met de neerslag zeer hoog. Ammoniak in de atmosfeer verhoogt de droge depositie van zwaveldioxide. Aan condensatiekernen en vochtige oppervlakken van bij voorbeeld een blad, wordt zwavelzuur, dat uit zwaveldioxide is gevormd, geneutraliseerd door ammoniak tot ammoniumsulfaat. De opnamecapaciteit van het oppervlak neemt daardoor sterk toe.

Uit de beide tabellen blijkt een zekere fluctuatie in de concentratie van vooral chloride, sulfaat en ammonium. Rond de winterperiode zijn de concentraties het hoogst. Bij de bespreking van de kwaliteit van de neerslag in hoofdstuk 3.2. waar dit ook was geconstateerd werd een samenhang verondersteld met het uitrijden van drijfmest.

3.3.2. De depositie in de strooisellaag

Aan het einde van het meetjaar bleek dat met name van sulfaat de verhouding tussen de gemeten concentraties in het bovenste grondwater en de belasting via doorval en stamafvoer ongeveer een factor 2 groter was dan de indikkingsfactoren die in het volgende hoofdstuk ter sprake komen. Omdat het niet waarschijnlijk is dat er een grote hoeveelheid ionen in de bovengrond beschikbaar komt, is naar andere oorzaken gezocht.

In eerste instantie is gekeken naar de naalden die op de grond terecht komen. Jaarlijks is dit ongeveer een derde gedeelte van de totale hoeveelheid. Hierop is een hoeveelheid vaste stoffen afgezet die in de loop der tijd vrij komt en mee de grond inspoelt. Volgens BREEMEN e.a. (1982) gaat het hier om vaste $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$ en NH_4HSO_4 . Dit zou betekenen dat er ook een hoeveelheid extra ammonium infiltreert. Er is geprobeerd om vast te stellen hoeveel sulfaat op deze wijze de bodem bereikt. In een zuur en vervolgens in een basisch milieu zijn de naalden van een bekende oppervlakte een tijdlang geschud, waarna het sulfaatgehalte bepaald is. Omgerekend bedroeg de bijdrage aan het sulfaatgehalte van de neerslag die onder een dennebos infiltreert slechts $1,3 \text{ mg.l}^{-1}$.

Een andere hoeveelheid naalden is voorzichtig gedestruëerd. Dit leverde een nauwelijks hoger gehalte op.

De naalden bleken niet de ontbrekende schakel te vormen, maar het onderzoek toonde wel aan dat de naalden die in de filters werden aangetroffen geen wezenlijke verhoging van de gehalten in de doorval en stamafvoer tot gevolg hebben gehad.

Een andere reden voor de hoge sulfaatgehalten kan gelegen zijn in de droge depositie die direkt op de met naalden bedekte bosbodem terecht komt.

Er zijn een aantal aanvullende waarnemingen verricht naar de droge depositie op de bosbodem. Dit is gebeurd in 1987, in de periode maart-juni.

Naast de trechter voor het opvangen van de doorval is eenzelfde trechter gevuld met strooisel wat ter plekke was verzameld. Deze trechter was zo opgesteld, dat de bovenkant gelijk was met het omringende maai-veld. Het strooisel is eerst goed gespoeld met gedemineraliseerd water, waardoor van een bekende (nul-) situatie kon worden uitgegaan. Direct na de eerste bemonstering waren er duidelijke verschillen in de samenstelling tussen beide opstellingen. In tabel 6 is hiervan een overzicht gegeven. De waarden hebben betrekking op de zes metingen die in de beschouwde periode zijn uitgevoerd. In deze tabel is tevens de gemiddelde samenstelling van de doorval tijdens de periode maart-juni van 1987 en van het meetjaar opgenomen.

Tabel 6. De gewogen samenstelling van de doorval onder een dennebos

- A: periode maart-juni 1987, onder de strooisellaag; met droge depositie op de bodem
- B: periode maart-juni 1987, 25 cm boven de grond
- C: meetjaar september 1985-september 1986, 25 cm boven de grond
- D: gecorrigeerde gehalten met droge depositie in de strooisellaag voor het meetjaar september 1985 - september 1986

	EGV	pH	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
	mS/m	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg N/l	mg N/l
A	28,1	5,4	7,6	3,6	1,4	11,2	78,2	3,2	2,8	16,5
B	16,3	5,9	6,0	2,2	0,9	7,8	41,6	2,7	0,9	8,3
C	19,8	5,6	5,6	1,7	0,9	17,3	44,0	5,1	1,9	14,5
D	34,1	5,1	7,1	2,8	1,4	24,8	82,7	6,0	5,9	28,8

Uit tabel 6 blijkt dat de concentratie van de doorval onder de strooisellaag (A) in de meeste gevallen een factor 2 hoger ligt dan boven de strooisellaag (B). Per ion is de verhouding hiertussen gebruikt om een indicatie te krijgen van de waarden onder de strooisellaag voor de periode september 1985 - september 1986 (D).

3.3.3. De zuurdepositie

In tabel 7 is een overzicht gegeven van de potentiële zuurdepositie onder het dennebos. Uit het verschil tussen de potentiële zuurdepositie van de doorval plus de stamafvoer en de natte depositie via de neerslag is de droge depositie op de dennebomen berekend en het verschil tussen de aanvullende metingen en de depositie via de doorval (nat en droog) geeft de droge depositie in de strooisellaag.

Tabel 7. De potentiële zuurdepositie gedurende een meetjaar onder een dennebos in $\text{keq H}^+ \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$. Tussen haakjes het aandeel in procenten

	neerslag (natte depositie)		doorval-stam- afvoer (droge depositie)		strooisellaag (droge depositie)		totaal	
sulfaat	0,91	(4,0)	4,07	(17,9)	4,29	(18,9)	9,27	(40,8)
nitraat	0,22	(1,0)	0,52	(2,2)	1,52	(6,7)	2,26	(9,9)
ammonium	1,14	(5,0)	4,63	(20,4)	5,43	(23,9)	11,20	(49,3)
totaal	2,27	(10,0)	9,22	(40,5)	11,24	(49,5)	22,73	(100,0)

Van de totale depositie blijkt slechts 10% via de neerslag te zijn aangevoerd. Op de naalden en takken van de dennen is minder droge depositie terecht gekomen dan in de strooisellaag. Ongetwijfeld speelt hier het feit mee, dat zwaveldioxide en ammoniak te samen goed aan natte oppervlakken absorberen, vooral door de chemische reactie, waarbij ammonium het zwavelzuur neutraliseert tot ammoniumsulfaat. Een met strooisel bedekte bosbodem blijft inderdaad een groot gedeelte van het jaar vochtig. In minder dichte bosopstanden en bossen die op een grofzandige bodem groeien valt te verwachten dat de bodem minder lang vochtig is en dat daar de droge depositie dan ook minder groot zal zijn.

Verder blijkt uit tabel 7 dat van de potentiële depositie van zuur en verzurende stoffen ammonium met een bijdrage van 49% de eerste plaats inneemt, gevolgd door sulfaat met 41%. De bijdrage van nitraat is klein (10%).

3.4. De depositie in het Amerikaanse eikebos

3.4.1. De samenstelling van de doorval en de stamafvoer

In de tabellen 8 en 9 is per maand de samenstelling van de doorval en de stamafvoer van de Amerikaanse eiken gegeven.

Tabel 8. Gemiddelde samenstelling (gewogen) van de doorval van Amerikaanse eiken over de periode september 1985 tot september 1986

PERIODE	HOEVEEL- HEID (mm)	EGV rS/m	pH	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg N/l	NH ₄ ⁺ mg N/l	A ³⁻ mg/l
september '85	48,9	11,0	5,7	-	2,8	2,6	0,9	15,1	22,2	3,9	2,0	7,0	-
oktober	26,6	12,6	6,5	-	1,9	3,2	1,1	10,0	28,2	5,8	1,6	6,3	0,00
november	78,2	15,6	6,2	-	3,2	3,7	1,3	14,6	38,1	4,2	1,2	9,8	-
december	87,2	18,6	5,8	7,0	4,5	3,9	1,4	19,3	47,9	2,6	0,8	13,3	0,05
januari '86	126,6	17,6	5,7	4,2	3,6	2,5	1,0	14,7	45,5	2,2	1,0	13,1	0,04
februari	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
maart	81,3	16,6	5,6	1,5	2,8	1,2	0,6	10,1	43,1	1,9	1,2	13,0	0,03
april	24,5	8,8	5,3	0,3	1,9	0,3	0,2	12,8	20,3	0,9	1,5	6,8	0,05
mei	54,8	10,6	5,1	0,8	0,8	1,9	1,0	15,9	20,9	6,2	0,8	9,6	-
juni	41,4	10,6	4,9	-	2,2	2,0	1,3	24,8	19,0	0,6	2,3	5,7	-
juli	44,9	9,6	4,7	-	1,8	2,6	1,1	30,1	16,3	1,7	0,1	4,8	0,04
augustus	58,6	9,6	6,8	-	2,0	2,1	0,8	6,7	15,9	3,3	1,5	6,6	0,08
Totaal	673,6	14,1	5,6	-	2,8	2,5	1,0	15,6	33,2	2,5	1,2	9,9	-

De concentraties van de stamafvoer zijn hoger dan van de doorval. Door de relatief geringe stamafvoer is de bijdrage aan de belasting van het grondwater echter gering.

Verwacht zou worden, dat de concentraties van de doorval in winter laag zouden zijn, omdat er geen blad aan de bomen zit en een groot gedeelte als directe doorval wordt opgevangen. Dit bleek echter niet het geval te zijn. Hetzelfde verloop dat bij de neerslag en de doorval bij de dennen was geconstateerd, namelijk hogere gehalten gedurende de winterperiode, is hier ook aanwezig.

Tabel 9. Gemiddelde samenstelling (gewogen) van de stamafvoer van Amerikaanse eiken over de periode september 1985 tot september 1986

PERIODE	HOEVEEL- HEID (cm)	EGV mS/m	pH -	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg N/l	NH ₄ ⁺ mg N/l	Al ³⁺ mg/l
september '85	0,4	34,3	5,3	-	8,1	5,4	2,8	30,8	88,2	1,6	8,6	27,0	-
oktober	0,3	54,9	6,0	-	12,9	7,8	4,3	23,6	130,3	6,0	6,2	42,0	0,11
november	0,8	77,9	5,6	-	15,9	15,0	7,8	26,0	170,9	3,5	6,1	50,7	0,10
december	0,9	100,8	5,2	33,5	18,8	22,2	11,4	27,8	211,4	1,0	6,0	59,4	0,09
januari '86	1,3	95,5	5,3	25,5	17,1	16,3	9,0	21,5	198,1	2,0	5,7	67,4	0,10
februari	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
maart	0,8	90,2	5,5	17,5	15,3	10,4	6,5	15,2	184,7	3,0	5,4	75,3	0,11
april	0,2	51,8	5,2	13,3	12,7	4,8	3,1	48,2	108,0	1,6	5,1	45,5	0,15
mei	0,6	59,4	5,3	18,7	12,7	8,3	3,6	15,2	126,5	0,6	1,4	62,8	-
juni	0,4	44,2	5,0	-	7,6	5,7	2,4	28,7	95,1	1,1	7,0	26,3	0,17
juli	0,5	41,7	4,8	-	9,0	4,6	2,3	20,9	76,1	2,3	8,7	19,2	0,15
augustus	0,6	25,6	5,7	-	6,0	2,5	0,9	13,5	54,4	5,4	3,1	23,4	0,11
Totaal	6,8	70,5	5,4	-	13,6	11,5	6,1	22,7	148,9	2,4	2,4	51,0	-

3.4.2. De depositie in de strooisellaag

Onder het Amerikaanse eikebos zijn geen aanvullende metingen uitgevoerd om de depositie in de strooisellaag vast te stellen. Omdat niet bekend is welk effect het bladerdek op de droge depositie in de strooisellaag heeft, zouden gedurende een representatieve meetperiode de bomen een gedeelte van de tijd in blad en een gedeelte van de tijd bladloos moeten zijn.

De tijd ontbrak echter om gedurende een lange periode metingen uit te voeren. Van de depositie in de strooisellaag onder het eikebos is een schatting gemaakt.

Zoals uit de volgende paragraaf zal blijken is er gedurende het meetjaar weinig verschil tussen de depositie op de dennen en op de Amerikaanse eiken. Het type blad lijkt de grootte van de depositie niet wezenlijk te beïnvloeden. Aangenomen is, dat hetzelfde geldt voor de

strooisellaag. Evenals onder het dennebos is de strooisellaag vrijwel permanent nat. Onder het eikebos komen langdurig hoge grondwaterstanden voor. De depositie in de strooisellaag zal dan ook naar verwachting weinig afwijken van de depositie in de strooisellaag onder de dennen.

Voor een schatting van de gemiddelde depositie op de bodem is per parameter uitgegaan van de totale depositie in de strooisellaag onder het dennebos en de verhouding tussen de depositie via doorval en stamafvoer op de eiken en op de dennen. De resultaten van deze berekeningen staan in tabel 10.

Tabel 10. Berekende totale depositie tijdens het meetjaar op de strooisellaag onder het Amerikaanse eikebos

EGV	pH	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
mS/m	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg N/l	mg N/l
24,7	5,1	3,6	4,2	1,6	22,2	63,5	3,0	3,8	19,7

3.4.3. De zuurdepositie

De zuurdepositie onder het Amerikaanse eikebos is opgesplitst naar natte depositie via de neerslag, droge depositie via de doorval en stamafvoer en droge depositie in de strooisellaag. De berekeningen hiervoor zijn identiek aan die voor het dennebos. Uit het verschil tussen de potentiële zuurdepositie via de doorval plus de stamafvoer en de natte depositie via de neerslag is de droge depositie op de bomen berekend en het verschil tussen de totale depositie op de strooisellaag en de depositie via de doorval + stamafvoer geeft de droge depositie in de strooisellaag.

In tabel 11 is een overzicht gegeven van de potentiële zuurdepositie. De totale depositie onder het eikebos is groot. Bijna de helft hiervan is als droge depositie in de strooisellaag afgezet. Gezien het belang van de strooisellaag is het jammer dat er geen direkte metingen beschikbaar zijn waaraan de berekende waarden gerelateerd kunnen worden.

Tabel 11. De potentiële zuurdepositie gedurende een meetjaar onder een
amerikaans eikebos in $\text{keq H}^+/\text{ha}$. Tussen haakjes het aandeel
in procenten

	neerslag (natte depositie)		doorval+stam- afvoer (droge depositie)		strooisellaag (droge depositie)		totaal	
sulfaat	0,91	(4,4)	3,93	(19,1)	4,22	(20,5)	9,06	(44,0)
nitraat	0,22	(1,1)	0,38	(1,8)	1,25	(6,1)	1,85	(9,0)
ammonium	1,14	(5,5)	3,84	(18,7)	4,69	(22,8)	9,67	(47,0)
totaal	2,27	(11,0)	8,15	(39,6)	10,16	(49,4)	20,58	(100,0)

Verder blijkt uit tabel 11 dat nitraat slechts voor 9% bijdraagt aan de potentiële depositie van zuur en verzurende stoffen, ammonium en sulfaat voor 47 en 44%.

3.5. Verschillen tussen de depositie in het dennebos en in het Amerikaanse eikebos

De contraties in de doorval, de stamafvoer en in het infiltrerende neerslagwater van het Amerikaanse eikebos zijn over het algemeen lager dan van de dennen, maar aangezien de hoeveelheid doorval en stamafvoer bij de Amerikaanse eiken groter is, zijn de verschillen, omgerekend in absolute hoeveelheden, klein.

Uit de tabellen 7 en 11 kan uit de potentiële zuurdepositie worden afgelezen voor sulfaat, nitraat en ammonium de gezamenlijke depositie in het dennebos 10% hoger is dan in het eikebos. In het dennebos is verhoudingsgewijs wat meer ammonium en nitraat terecht gekomen.

Samen met chloride is voor sulfaat, nitraat en ammonium de depositie in kilogrammen per ha berekend. Voor de resultaten, die in tabel 12 vermeld staan, zijn gegevens gebruikt uit de tabellen 2, 4, 5, 6, 8, 9 en 10.

De depositie van sulfaat, nitraat en ammonium is in het dennebos groter dan in het Amerikaanse eikebos. De depositie van chloride is juist in het eikebos het grootst.

Tabel 12. De depositie (nat en droog) van chloride, sulfaat, nitaat en ammonium in een dennebos en een Amerikaanse eikebos gedurende het meetjaar (cijfers in kg/ha)

		DENNEN			
		chloride	sulfaat	nitraat-N	ammonium-N
neerslag	(nat)	38,1	44,2	3,0	16,0
doorval + stamafv.	(droog)	55,9	196,5	7,4	65,2
strooisellaag	(droog)	40,1	207,0	21,4	76,5
totaal	(nat + droog)	134,1	447,7	31,8	157,7

		AMERIKAANSE EIKEN			
		chloride	sulfaat	nitraat-N	ammonium-N
neerslag	(nat)	38,1	44,2	3,0	16,0
doorval + stamafv.	(droog)	68,5	179,4	5,5	54,2
strooisellaag	(droog)	44,4	214,2	17,5	66,0
totaal	(nat + droog)	151,0	437,8	26,0	136,2

In beide bossen is de totale stikstofbemesting via de atmosfeer erg hoog. Tijdens het meetjaar bedroeg dit in het dennebos 190 kg/ha en in het eikebos ruim 160 kg/ha.

4. DE KWALITEIT VAN HET GRONDWATER

4.1. De verzuring van grondwater

In de bodem vinden van nature twee belangrijke zuurvormende reacties plaats. Als gevolg van wortelactiviteit ontstaat kooldioxide (CO_2) dat gedeeltelijk ontwijkt naar de atmosfeer. Met water (H_2O) vormt de rest H_2CO_3 wat (omkeerbaar) in HCO_3^- en H^+ uiteenvalt:



Door deze omzetting kan in gronden met een geringe zuurneutraliserende capaciteit de pH dalen tot 4,9 (APPELO, 1982). Een tweede verzurings-bron is ammoniak (NH_4^+) dat door mineralisatie vrijkomt. Ammoniak kan opgenomen worden door de planten en heeft dan een bemestende werking. Maar het kan ook nitrificeren:



Als gevolg van dit proces kan de pH in gevoelige gronden wel verder dalen tot waarden rond de 3,5. In zure gronden verloopt de nitrificatie minder snel waardoor naast NO_3^- ook nog NH_4^+ aanwezig zal zijn. De ammoniak uit de lucht nitrificeert op dezelfde wijze als het bij de mineralisatie vrijkomende ammonium-ion. Dit is ook het geval met ammoniumsulfaat.

Door de indringing van zwavel- en salpeterzuur wordt de zuurneutralisatiecapaciteit van de bodem aangetast. Bodems met een hoog gehalte aan kalk, humus en klei hebben een grote neutralisatiecapaciteit. Gebieden, waar de bodem uit dekzand bestaat en weinig kalk en klei bevat, zijn gevoelig voor zure neerslag. De zuurneutraliserende capaciteit van deze gronden is klein. Dit zijn juist de gebieden met de meeste bio-industrie (de Peel, de Gelderse Vallei, de Achterhoek en Twente).

Volgens MULDER (1987) zal het zeer lang duren voordat het grondwater dieper dan enkele meters pH waarden heeft beneden de 4,0. De verklaring daarvoor is, dat de bodemoplossing in evenwicht is met gibbsiet:



De H^+ -ionen worden gebufferd, maar daarbij komt het voor de planten giftige Al^{3+} vrij. Gibbsiet is in grote hoeveelheden in de bodem aanwezig, maar in het ondiepe grondwater kan de beschikbare hoeveelheid Al(OH)_3 uitgeput raken waardoor de pH wel beneden de 4,0 daalt. Dat kan ook het geval zijn als er een snel watertransport plaatsvindt en er nog geen evenwicht met gibbsiet is.

4.2. De kwaliteit van het grondwater onder het dennebos

Het water, dat via doorval en stamafvoer op de bodem terecht komt, wordt na infiltratie in de bodem voor een groot gedeelte door de bomen opgenomen en verdampt. Daardoor vindt er een sterke toeneming plaats van de concentraties van opgeloste stoffen. Het ingedikte restant vormt de nuttige neerslag, die wordt afgevoerd naar het grondwater. De indikking kan worden berekend via het neerslagoverschot. De meest eenvoudige methode is die, waarbij de verdamping aan de hand van de open waterverdamping (E_o) wordt berekend met de formule:

$$E_p = f \cdot E_o. \quad (5)$$

Hierin is E_p de potentiële evapotranspiratie en f een gewasfactor. Voor korte perioden is deze methode minder geschikt, maar voor een jaar zijn de uitkomsten goed bruikbaar. De gewasfactor is voor het dennebos 0,90 gekozen (JANSEN, 1986). Deze factor is inclusief de interceptie. De open waterverdamping zoals die voor De Bilt berekend is (KNMI, 1985/1986) week in het meetjaar slechts weinig af van die van een gemiddeld jaar. De neerslag is in hoofdstuk 3.1 al ter sprake gekomen. Ook deze hoeveelheid was, over een jaar gezien, vrij normaal. Er kan dan ook worden aangenomen dat het berekende neerslagoverschot en indikking eveneens een redelijk gemiddelde zal opleveren. Gezien de dikte van de wortelzone en de relatief geringe diepte van het grondwater in de zomerperiode lijkt het redelijk om uit te gaan van potentiële verdamping. De indikking is berekend door de stamafvoer plus de doorval te delen door het neerslagoverschot.

In het volgende overzichtje is aangegeven met welke waarden gerekend is:

stamafvoer	2,8	mm
doorval	534,9	mm
neerslag	761,6	mm
open waterverdamping	662,0	mm
gewasfactor	0,90	

Dit levert een indikking van de stamafvoer en doorval op van 3,2. De mate van indikking kan ook worden afgeleid uit het chloridegehalte. Chloride is een inert ion, dit in tegenstelling tot de andere ionen die meestal wel in meer of mindere mate aan processen en reacties in de bodem deelnemen. In tabel 13 is de gemiddelde samenstelling van het bovenste grondwater gegeven. Hierin is tevens het gewogen gemiddelde van de infiltrerende neerslag opgenomen.

Tabel 13. Gemiddelde van de samenstelling van het ondiepe grondwater en van de infiltrerende neerslag onder het dennebos

	EGV	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
	mS/m	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg N/l	mg N/l
infiltr.											
neerslag	34,5	5,1	-	7,2	2,8	1,4	24,9	83,3	6,0	5,9	29,3
grondwater	83,8	3,9	6,0	36,9	32,1	9,0	79,1	381,9	0,8	15,0	1,4

De indikking van doorval en stamafvoer bedraagt onder het dennebos $79,1 : 24,9 = 3,2$ en komt daarmee overeen met de indikking die via het neerslagoverschot is berekend.

Door horizontale grondwaterstroming kan er een verandering van de samenstelling optreden. Deze stroming is hier echter verwaarloosd, omdat het bos op een waterscheiding ligt.

Met het sulfaatgehalte van $83,3 \text{ mg.l}^{-1}$ zoals dat in tabel 12 is gegeven en met een indikkingsfactor van 3,2 zou het grondwater onder het dennebos een gehalte van 267 mg.l^{-1} moeten hebben. Het grondwater heeft echter een hoger gehalte van 382 mg.l^{-1} . Een goede verklaring voor dit verschil is niet gevonden. Mogelijk is de meetperiode voor met name de droge depositie in de strooisellaag tekort geweest.

De concentratie van andere ionen in het grondwater wordt niet alleen beïnvloed door de indikking ervan, maar ook door processen die in de bodem plaatsvinden. Aan het nitraat- en ammoniumgehalte in tabel 13 is te zien dat er nitrificatie optreedt (3). Verder verdwijnt er stikstof doordat dit wordt opgenomen en er nitraat wordt gedenitrificeerd.

Denitrificatie, en de omstandigheden waaronder dit plaatsvindt, komen in hoofdstuk 4.4. ter sprake.

Door wortelademhaling, nitrificatie en depositie verzuurt het grondwater. Daardoor verschuift het evenwicht in vergelijking 2 naar links en verdwijnt vrijwel alle HCO_3^- uit het systeem. Volgens HOEKS (1983) ontwijkt de geproduceerde CO_2 in zure gronden vrijwel geheel naar de atmosfeer en draagt deze niet bij aan een verdere verzuring van de bodem.

Bij de neutralisatie van H^+ -ionen in de bodem spelen, afhankelijk van de pH, verschillende processen een rol. Op grond van literatuur hierover (ULRICH, 1981; BREEUWSMA en DE VRIES, 1983; BREEMAN e.a., 1983) geeft HOEKS (1983) een overzicht. Onder het dennebos zijn de volgende buffers van belang:

- carbonaatbuffer : $6,5 < \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 8,5$
- silicaatbuffer : $5,0 < \text{pH} < 6,5$
- kationomwisselingsbuffer : $4,2 < \text{pH} < 5,0$
- aluminiumbuffer : $2,8 < \text{pH} < 4,2$

De verweringscapaciteit van de silicaatbuffer is zo klein, dat er geen evenwichtsinstelling bereikt wordt. Het oplossen van carbonaatzouten en de omwisseling van kationen verloopt wel snel. Daardoor worden er kationen zoals Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ en K^+ gemobiliseerd en is het gehalte van deze ionen in het bovenste grondwater relatief groot.

In hoofdstuk 4.1. kwam de aluminiumomwisseling al ter sprake, evenals de opmerking van MULDER (1987), dat de door de grote buffercapaciteit de pH niet snel beneden de 4,0 daalt. De gemeten pH van het grondwater (3,9) is hiermee in overeenstemming.

4.3. De kwaliteit van het grondwater na het verwijderen van een dennebos

In 1985 is in het natuurgebied een gedeelte van het dennebos en de strooisellaag grotendeels verwijderd. De bemonsteringsbuizen zijn intact gebleven en na enige tijd is de samenstelling van het grondwater periodiek bepaald. Dit is voor twee dieptes gedaan, op ongeveer 2 en 3 m beneden het maaiveld.

In tabel 14 is de samenstelling van het grondwater op beide dieptes, zowel voor als na het kappen van het bos, gegeven. De gehalten na het kappen zijn gemiddelden van 6 metingen die verspreid over 1986 zijn verricht. Eerdere metingen zijn hiervoor niet gebruikt omdat het verloop in de samenstelling toen nog groot was.

Doordat er pas na twee jaren langzaam een korte vegetatie bestaande uit voornamelijk heide (*Calluna vulgaris* en *Erica tetralix*) en pijpestrootje (*Molinia caerulea*) tot ontwikkeling kwam, nam de hoeveelheid nuttige neerslag in die periode toe, met naar schatting een factor 3, tot circa 500 mm. Bovendien is de samenstelling van deze neerslag veel armer dan van de eerdere doorval en stamafvoer. Dit had tot gevolg dat de gehalten van vrijwel alle ionen in het bovenste grondwater sterk zijn gedaald en in vele gevallen waarden bereiken die elders ook onder met heide en molinia begroeide infiltratiegebieden zijn gemeten. Het sulfaatgehalte, waarvoor in tabel 14 een gemiddelde van $58,4 \text{ mg.l}^{-1}$ is gegeven daalde eind 1986 nog steeds. Dit duidt erop, dat het eerdere hoge sulfaatgehalte, waarvoor gedeeltelijk geen verklaring voor kon worden gevonden, het gevolg was van de aanwezigheid van het dennebos. In tabel 14 valt verder nog op dat het nitraatgehalte in het bovenste grondwater hoog blijft. Enerzijds neemt de korte vegetatie minder stikstof op en anderzijds neemt de mineralisatie van het resterende organische materiaal, gevolgd door nitrificatie, waarschijnlijk toe als gevolg van de verstoring van het bodemoppervlak en de toegenomen hoeveelheid nuttige neerslag.

De pH blijft op 2 meter diepte laag, waardoor er nog steeds kationen gemobiliseerd worden. Er werd er een aluminiumgehalte gemeten van 22 mg.l^{-1} .

NOTA/1862

Tabel 14. De gemiddelde samenstelling van het grondwater voor en na het verwijderen van een dennebos

	ECV	pH	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
	mS/m	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg N/l	mg N/l
<u>2 m diepte</u>										
voor kappen	83,8	3,9	36,9	32,1	9,0	79,1	381,9	0,8	15,0	1,4
na kappen	26,0	4,0	5,8	4,3	0,9	10,4	58,4	0,2	15,5	0,4
<u>3 m diepte</u>										
voor kappen	49,5	7,3	15,8	60,0	12,1	22,8	61,3	200,7	0,6	1,0
na kappen	67,1	6,6	27,6	115,1	20,5	45,8	164,2	109,1	<0,0	-

Op 3 meter diepte is na het kappen een verdubbeling waargenomen van het geleidingsvermogen, van natrium, calcium, magnesium en chloride. Door de toegenomen uitspoeling neemt ook het aantal H⁺-ionen op deze diepte wat toe. Door de aanslag op de carbonaatbuffer wordt er vooral veel calcium gemobiliseerd. Het gehalte aan HCO₃⁻ neemt af. In vergelijking 2 schuift het evenwicht naar links.

De passage van het zuurfront is op 3 m diepte nog niet waargenomen. Er zijn voldoende zuurneutraliserende stoffen voorhanden om de H⁺-ionen te bufferen. De verplaatsing van het zuurfront gaat volgens HOEKS (1983) langzaam en bedraagt in een humusarme zandgrond enkele centimeters per jaar.

4.4. De kwaliteit van het grondwater onder het Amerikaanse eikebos

Op identieke wijze als voor het dennebos in hoofdstuk 4.2. is gedaan is met behulp van de volgende gegevens de indikking van de geïnfiltreerde neerlag onder het Amerikaanse eikebos berekend. Gezien de hoge grondwaterstanden is verondersteld dat de verdamping potentieel is.

stamafvoer	6,8	mm
doorval	673,6	mm
neerslag	761,6	mm
open waterverdamping	662,0	mm
gewasfactor	0,80	

De indikkingsfactor bedraagt:

$$(673,6 + 6,8) / (761,6 - 0,80 \times 662,0) = 2,9$$

Het Amerikaanse eikebos ligt op een plek waar het grondwater ten gevolge van kwel niet diep wegzakt. Het neerslagoverschot dringt niet diep de grond in, maar wordt hierin oppervlakkig afgevoerd. Het kwelwater heeft, afhankelijk van de verblijftijd en de samenstelling van het doorstroomde sediment, een hoog gehalte aan calcium- en carbonaationen. Door de buffering van H^+ -ionen is de pH van kwelwater hoog. Doordat er dicht onder het maaiveld een zekere menging tussen het infiltratiewater en het kwelwater optreedt, is het niet mogelijk de berekende indikking aan de hand van een inert ion als chloride te verifiëren. Daarvoor zijn hydrologische en chemische modelberekeningen nodig.

In tabel 15 is de samenstelling van het infiltrerende neerslagwater en de gemiddelde samenstelling van het grondwater gegeven.

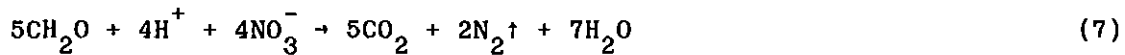
Tabel 15. Gemiddelde van de samenstelling van het ondiepe grondwater en van de infiltrerende neerslag onder het Amerikaanse eikebos

	EGV	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
	mS/m	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg N/l	mg N/l
infiltr.											
neerslag	25,2	5,1	-	3,7	4,3	1,6	22,2	64,4	6,0	3,8	20,0
grondwater	53,3	7,2	2,7	34,2	81,9	6,7	35,6	63,4	218,6	0,2	1,3

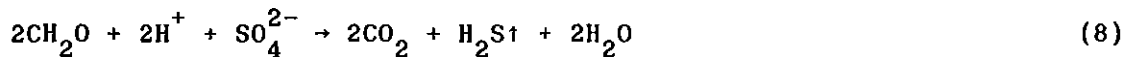
Uit tabel 15 valt af te lezen, dat het chloride-ion met een factor 1,6 indikt, wat minder is dan de factor 2,9 die uit de waterbalans is berekend. Het hoge Ca^{2+} - en HCO_3^- -gehalte en de hoge pH duiden erop, dat een belangrijk gedeelte van het bemonsterde grondwater uit kwelwater bestaat. De buis waar de grondwatermonsters uit onttrokken zijn heeft een filter op circa 1 meter beneden maaiveld.

Redoxpotentiaalmetingen op verschillende dieptes van een nabij gelegen plek toonden aan, dat het profiel tot dicht onder het maaiveld anaeroob is (KEMMERS en JANSSEN, 1982). De verzuring door H_2SO_4 en HNO_3 wordt onder anaerobe omstandigheden in de bodem geneutraliseerd, waarbij N_2 en H_2S uit het bodemsysteem ontwijken.

Nitraat wordt gedenitrificeerd:



Bij een verdere afneming van de redoxpotentialaal wordt sulfaat gereduceerd:



De afbreekbare organische stof die voor deze processen nodig is, is in de bovengrond van de beekeerdgrond aanwezig.

Uit tabel 15 blijkt dat de stikstof vrijwel geheel uit het grondwater is verdwenen. Een gedeelte is door de bomen opgenomen, maar dat komt in de vorm van organische stof, dat na verloop van tijd mineraliseert, weer beschikbaar. Het grootste gedeelte is echter gedenitrificeerd zoals in bovenstaande vergelijking (7) is aangegeven.

Sulfaat wordt bij lagere redoxpotentialen gereduceerd. Hier is dat vooral in de winter het geval. Het grondwater heeft dan een beduidend lager gehalte dan het gemiddelde gehalte van $63,4 \text{ mg.l}^{-1}$ dat in tabel 15 staat vermeld.

5. CONCLUSIES

Hoewel van dennebomen bekend is, dat de filterende werking van het bladerdek een grote depositie tot gevolg heeft, blijkt dat in een gebiedje met Amerikaanse eiken de depositie van de meeste stoffen vrijwel even groot is. De totale potentiële zuurdepositie onder het dennebos bedroeg gedurende het meetjaar $22,7 \text{ keq.ha}^{-1}$ en onder het Amerikaanse eikebos $20,6 \text{ keq.ha}^{-1}$.

De droge depositie van zure en verzurende stoffen in de strooisellaag onder de beide bossen is groter dan de gezamenlijke droge depositie van deze stoffen op de bladeren, takken en stammen van de bomen. De bijdrage van de neerslag, c.q. de natte depositie, aan de totale zure depositie bedraagt slechts 10%.

De bijdrage van sulfaat en ammonium aan de potentiële zuurdepositie bedroeg in beide bossen circa 45% en van nitraat circa 10%. De grote hoeveelheid droge depositie van ammonium en sulfaat op de bladeren maar vooral in de strooisellaag wordt veroorzaakt door het feit dat de bladeren en de fijnzandige grond onder de strooisellaag een groot gedeelte van het jaar vochtig blijven. Zwaveldioxide en ammoniak lossen op in natte oppervlakken. Doordat ammonia en zwavelzuur elkaar neutraliseren, wordt de depositie van beide stoffen versterkt. In het omgeving van het onderzoeksgebied wordt veel drijfmest uitgereden, waardoor veel ammoniak door vervluchtiging in de atmosfeer terecht komt.

De depositie van de stikstofverbindingen kan naast een verzurende ook een bemestende werking hebben. Via depositie komt in het dennebos 190 en in het Amerikaanse eikebos 160 kg N.ha^{-1} terecht. Voor de natuurgebieden is zowel de verzuring als de bemesting door depositie ongewenst.

Afgezien van de stoffen, die aan processen en reacties in de bodem deelnemen, nemen de concentraties van de doorval en stamafvoer na infiltratie onder een dennebos met een factor 3,2 toe, doordat een deel van het water door de vegetatie wordt opgenomen en verdampt. Daardoor kunnen er in het bovenste grondwater onder dennebossen chloridegehaltes van rond de 80 mg en sulfaatgehaltes van circa 270 mg.l^{-1} worden aangetroffen. De gemeten sulfaatgehaltes in het grondwater zijn echter hoger (gemiddeld 387 mg.l^{-1}). Voor dit verschil is geen verklaring gevonden.

Na het kappen van een dennebos neemt de hoeveelheid nuttige neerslag toe met een faktor 3, waardoor de uitspoeling en verplaatsing van reeds aanwezige stoffen veel sneller gaat. De waterstofionen worden sterk gebufferd, waardoor het zuurfront zich niet merkbaar sneller verplaatst. De totale depositie van stoffen is na het kappen van het bos veel kleiner.

Onder het Amerikaanse eikebos bedraagt de indikkingsfactor 2,9. Doordat het infiltrerende neerslagwater ondiep in het profiel in zekere mate met kwelwater mengt en in het anaerobe grondwater reductieprocessen optreden is de zuurneutralisatiecapaciteit groot en blijft het grondwater een neutraal-zwak basisch karakter houden.

LITERATUUR

- AALST, R.M. VAN en H.S.M.A. Diederén, 1982. De rol van de stikstof-oxyden en ammoniak bij de depositie vanuit de lucht van bemestende verzurende stoffen op de Nederlandse bodem. Rapport nr. R/8342, TNO.
- APPELO, C.A.J., 1982. Verzuring van het grondwater op de Veluwe. H_2O , 1982 (18), 464-467 p.
- BEGELEIDINGSGROEP GELGAM, 1984. Herziening van de berekening van gewasverdamping in het hydrologische model GELGAM. Rapport van de ad hoc groep verdamping. Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer, 92 p.
- BREEMAN, N. VAN, P.A. BURROUGH, E.J. VELTHORST, H.F. DOBBEN, T. DE WIT, T.B. RIDDER en H.F.R. REIJNDERS, 1982. Soil acification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy through-fall. Nature Vol. 299, 1982, 548-550 p.
- en E.R. JORDENS, 1983. Effects of atmospheric ammonium sulfate on calcareous and non-calcareous soils iof woodlands in the Netherlands. In: Effect of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. (Eds.: B. Ulrich and J. Pankrath), D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 171-182 p.
- BREEUWSMA, A en W. DE VRIES, 1983. Notitie ten behoeve van het deelrapport over effecten van zure regen op bodem en grondwater. In: nota 125, IB, Haren.
- BUIJSMAN, E., H. MAAS en W. AMAN, 1984. Een gedetailleerde ammoniak-emissiekaart van Nederland. Rapport V-84-20, Instituut voor Meteorologie en Oceanografie, Rijksuniversiteit, Utrecht. 124 p.
- HOEKS, J., 1983. Verzuring van bodem en grondwater als gevolg van atmosferische depositie. ICW nota 1480, Wageningen, 27 p.
- JANSEN, P.C., 1986. De potentiële verdamping van (half-)natuurlijke vegetaties. ICW nota 1703, Wageningen, 35 p.
- KEMMERS, R.H. en P.C. JANSEN, 1980. De invloed van chemische factoren in grondwater en bodem op enkele vegetatietypen in het CRM reservaat Groot Zandbrink. ICW nota 1181, Wageningen, 37 p.

- KEMMERS, R.H. en P.C. JANSEN, 1982. Redoxpotentialen en calcium in relatie tot de stikstof- en fosfaathuishouding van de schraallandjes in het CRM reservaat Groot Zandbrink, ICW nota 1330, Wageningen, 45 p.
- KOLENBRANDER, G.J. Zure regen. concept artikel, niet gepubliceerd.
- KNMI, 1985-1987. Maandelijkse overzicht van de hoeveelheden neerslag. KNMI, De Bilt.
- KNMI, RIVM, 1986. Chemische samenstelling van de neerslag over Nederland. Jaarrapport 1984. KNMI De Bilt, RIVM, Bilthoven.
- MULDER, J., 1987. The aluminium chemistry of Spodosols, impact by strong acid inputs. Proc. GEOMON Workshop, Geological Survey Prague Csechoslovakia.
- OOSTEROM, H.P. en J.H.W.M. VAN SCHIJNDEL, 1979. De chemische samenstelling van het bovenste grondwater bij natuurlijke begroeiingen op kalkarme zandgrond. Nota ICW, 1075, Wageningen. 27 p.
- ULRICH, B., 1981. Okologische Gruppierung von Boden nach ihren chemischen Bodenzustand. Z. Pflanzenernahr. Bodenk. 144: 289-305.