

VERZURING DOOR ATMOSFERISCHE DEPOSITIE
EVALUATIERAPPORT

Januari 1984



ministerie van landbouw en visserij
ministerie van volkshuisvesting, ruimtelijke ordening en milieubeheer

174 348

Titel en subtitel : Verzuring door atmosferische depositie
- evaluatierapport -

Trefwoorden : verzuring, zure regen, depositie, SO₂, zwaveldioxide, NO_x, stikstofoxiden, NH₃, ammoniak, atmosfeer, bodem, grondwater, bodembioïologie, vegetatie, oppervlaktewater, hydrobiologie

Datum publicatie : januari 1984

Auteurs : A.R. Manuel, R.M. van Aalst, H. Bastiaens, A.H.M. Bresser
A. Don, J. Zoetelief

Uitvoerende organisaties : - Adviesbureau voor Watervoorziening IWACO B.V., Postbus 183, 3000 AD Rotterdam
- MT-TNO, Postbus 217, 2600 AE Delft
- Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening*), Postbus 450, 2260 MB Leidschendam
- Ministerie van Landbouw en Visserij (Staatsbosbeheer, hoofddirectie Natuurbehoud en Openlucht Recreatie en directie Algemene Zaken, Milieu en Planologie), Postbus 20401, 2500 EK Den Haag

Opdrachtgevers : - Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
- Ministerie van Landbouw en Visserij

Opmerkingen : Dit rapport bevat een evaluatie van de huidige kennis over de verzuring door atmosferische depositie in Nederland. Het is samengesteld op basis van de volgende vijf wetenschappelijke basisrapporten:

* Per 1-1-1984 onderdeel uitmakend van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne.

- atmosferische processen en depositie
- bodem
- bodembiologie
- vegetatie
- oppervlaktewater en hydrobiologie

Het rapport dient ter onderbouwing van een beleidsnotitie inzake verzuring, welke door de ministers van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en van Landbouw en Visserij begin 1984 aan de Tweede Kamer is aangeboden.

Samenvatting

: Naar aanleiding van een motie van mevrouw De Boois, op 21 februari 1983 in de Tweede Kamer ingediend, is een inventarisatie uitgevoerd naar de invloed - in brede zin - van zure atmosferische depositie ("zure regen") op de bodem. Dit houdt in, dat naast de effecten op bodem en grondwater tevens effecten op de vegetatie, het oppervlaktewater en de in bodem en water levende dieren in de inventarisatie zijn betrokken. De nadruk lag vooral op de huidige en mogelijke toekomstige schade door zure atmosferische depositie.

Een uitgebreide samenvatting van de resultaten is in paragraaf 1 van het rapport opgenomen. Hieruit blijkt, dat als gevolg van menselijke activiteiten de atmosferische depositie van de belangrijkste verzurende stoffen (SO_2 -, NO_x - en NH_3 -verbindingen) toegenomen is tot minstens het 5-voudige van het natuurlijke niveau. De jaarlijkse schade bedraagt, voor zover deze bekend is en in geld valt uit te drukken, naar schatting tientallen tot honderden miljoenen guldens. Daarnaast is kapitaalvernietiging van miljarden guldens in het geding, met name in geval van aantasting van de Nederlandse bossen.

Ook is schade geconstateerd die zich niet in geld laat uitdrukken. Het betreft veranderingen die op vrijwel alle

niveaus in ecosystemen optreden, zoals vermindering van de soortenrijkdom, het wegvallen van diersoorten en planten uit voedselketens, vermindering van voortplanting van planten en dieren en vermindering van vitaliteit en levensduur, vooral van bossen. Dit betekent een grootschalige achteruitgang in de opbouw en het functioneren van ecosystemen. Het huidige menselijk handelen is voor wat betreft emissies van verzurende stoffen kennelijk niet ecologisch inpasbaar.

Sommige oppervlaktewateren en bodems zijn onomkeerbaar veranderd. Andere zijn wellicht op lange termijn in hun oorspronkelijke kwaliteit terug te brengen. Herstel van bossen is op langere termijn mogelijk bij vermindering van de depositie tot ongeveer 20% van het huidige niveau. De geconstateerde en de te verwachten effecten zijn strijdig met het huidige regeringsbeleid betreffende natuurbehoud, bodembescherming, recreatie, drinkwatervoorziening en houtproduktie. Nader onderzoek naar een aantal aspecten van het beschouwde aandachtsveld is dringend gewenst.

Voorwoord:

Berichten over schade aan Zweedse meren en Tsjechische bossen vormden 10 à 15 jaar geleden het begin van een reeks meldingen in diverse delen van Europa en Noord-Amerika over milieu-aantastingen door zure atmosferische depositie ("zure regen").

Middels een door mevrouw De Boois op 21 februari 1983 ingediende motie tijdens de behandeling van het IMP-Lucht 1981-1985 sprak de Tweede Kamer haar bezorgdheid uit over de verzuring.

In deze motie werd de regering gevraagd een breed inventariserend onderzoek te verrichten naar de te verwachten schade op verschillend gebied door verzuring van de bodem en een programma van maatregelen op te stellen.

Het voorliggende rapport voorziet in het in de motie gevraagde onderzoek. Een aan dit rapport voorafgegaan literatuuronderzoek verscheen onlangs (in de reeks Bodembescherming, nr. 27). Het rapport bevat een inventarisatie van huidige en mogelijke toekomstige effecten en schade aan bodem, vegetatie, oppervlaktewater en fauna. Dankzij de inzet van medewerkers van veel instituten in Nederland was het mogelijk om een dergelijke omvangrijke inventarisatie in relatief korte tijd tot stand te brengen.

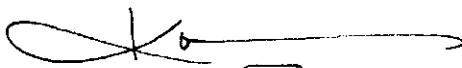
Vooraf de inbreng van de instituten die verantwoordelijk zijn voor de totstandkoming van de aan dit rapport ten grondslag liggende basisrapporten, wil ik graag vermelden. Het betreft MT-TNO, het Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, het Rijksinstituut voor Natuurbeheer en het Staatsbosbeheer.

Het rapport is samengesteld door een gezamenlijke projectgroep van de ministeries van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en van Landbouw en Visserij, onder voorzitterschap en projectmanagement van het Adviesbureau voor Watervoorziening IWACO B.V.. Het rapport is als bijlage gevoegd bij een notitie inzake verzuring, welke door de ministers van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer en Landbouw en Visserij begin 1984 aan de Tweede Kamer is aangeboden.

Deze notitie geeft een tussentijds overzicht van de verzuring. Een eerste overzicht van de schade en een aanzet voor het beleid ten aanzien van verzuring door atmosferische depositie is reeds in het IMP-Lucht 1984-1988 en het Voorlopig IMP-Bodem 1984-1988 gegeven.

Op basis van de in de notitie aangegeven hoofdlijnen zal in volgende IMP's een verdere programmering van maatregelen en onderzoek worden opgenomen, en zal over de voortgang van lopend onderzoek worden gerapporteerd.

Mede namens het Ministerie van
Landbouw en Visserij,



dr. ir. B.C.J. Zoeteman
DIREKTEUR LUCHT,
Ministerie van Volkshuisvesting,
Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.

rapport hun erkentelijkheid betuigen aan alle deskundigen van diverse wetenschappelijke instellingen, de leden van de Begeleidingscommissie en de leden van de Klankbordgroep, voor hun bijdrage gedurende het onderzoek. Door het krappe tijdschema van totaal slechts 4 maanden, moest op velen, ook buiten de reeds genoemden, een zwaar beroep worden gedaan.

Rotterdam,
januari 1984

De projectgroep:

Ir. A.R. Manuel	(IWACO B.V.)
Dr. R.M. van Aalst	(MT-TNO)
Ir. H. Bastiaens	(L & V/SBB)
Ir. A.H.M. Bresser	(VROM/RID)
Drs. A. Don	(L & V/NBOR)
Drs. J. Zoetelief	(L & V/AMP)

INHOUDSOPGAVE	PAGINA
TEN GELEIDE	2
1. SAMENVATTING	4
1.1 Algemeen	4
1.2 Depositie	4
1.3 Bodem	5
1.4 Vegetatie	8
1.5 Fauna	9
1.6 Oppervlaktewater	10
1.7 Schade	10
1.8 Vermindering van depositie	11
1.9 Nader onderzoek	12
2. INLEIDING	13
3. ATMOSFERISCHE PROCESSEN EN DEPOSITIE	16
3.1 Atmosferische processen	16
3.2 Depositie van zure en verzurende stoffen	17
4. INWERKINGEN OP HET MILIEU EN BEÏNVLOEDING VAN FUNCTIES EN BELANGEN	24
4.1 Systeembeschrijving	24
4.2 Bodem	26
4.3 Vegetatie	34
4.4 Fauna	38
4.5 Oppervlaktewater	40
4.6 Conclusies	43
5. HUIDIGE OPTREDENDE EFFECTEN	46
5.1 Bodem	46
5.2 Vegetatie	49
5.3 Fauna	51
5.4 Oppervlaktewater	51
5.5 Conclusies	53
6. TE VERWACHTEN EFFECTEN BIJ VERSCHILLENDE TOEKOMSTBEELDEN VOOR DEPOSITIES	55
6.1 Effecten bij voortzetting van het huidige depositieniveau	55
6.2 Effecten bij verlaging van de depositie	57
7. KNELPUNTEN, LEEMTEN IN KENNIS EN AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK	61
7.1 Knelpunten en leemten in kennis	61
7.2 Aanbevelingen voor onderzoek	62
Annex 1 : Motie de Boois	67
Annex 2 : Trekkerinstituten en medewerkende organisaties	69
Annex 3 : Begeleidingscommissie	72
Annex 4 : Klankbordgroep	74
Annex 5 : Begrippenlijst	76

TEN GELEIDE

In dit evaluatierapport wordt verslag gedaan van het inventariserend onderzoek "verzuring door atmosferische depositie", dat in opdracht van de Ministers van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) en van Landbouw en Visserij (L & V) is uitgevoerd in de periode van augustus tot en met november 1983. Het rapport dient ter onderbouwing van een beleidsnotitie, welke door de genoemde bewindslieden, naar aanleiding van de motie van Mevrouw De Boois (zie Annex 1), rond de jaarwisseling aan de Tweede Kamer wordt aangeboden.

Het rapport is gebaseerd op 5 wetenschappelijke basisrapporten en is een beleidsgerichte interpretatie hiervan. Het is opgesteld door een projectgroep van L & V, RID en TNO onder leiding van een van de directeurs van het Adviesbureau voor Watervoorziening IWACO B.V. te Rotterdam. De verantwoordelijkheid voor het evaluatierapport ligt bij deze projectgroep.

De projectgroep heeft tevens de organisatorische voorbereidingen getroffen voor het opstarten van het inventariserend onderzoek. Daarnaast heeft zij de procedures bewaakt, welke zijn gevolgd bij het samenstellen van de basisrapporten.

De basisrapporten zijn samengesteld onder verantwoordelijkheid van 5 "trekkerinstituten"; een twintigtal wetenschappelijke organisaties hebben bijdragen geleverd (zie Annex 2). Er is uitsluitend gebruik gemaakt van reeds beschikbare kennis. Nieuw onderzoek is niet uitgevoerd.

De werkzaamheden van de projectgroep zijn begeleid door een interdepartementale Begeleidingscommissie van VROM en van L & V (zie Annex 3). Tevens is de kwaliteit van zowel de basisrapporten als van het evaluatierapport getoetst door een uit acht deskundigen bestaande Klankbordgroep (zie Annex 4).

Langs deze weg willen de samenstellers van het evaluatie-

1. SAMENVATTING

1.1 Algemeen

Naar aanleiding van de motie van Mevrouw De Boois, op 21 februari 1983 in de Tweede Kamer ingediend, is een inventarisatie uitgevoerd naar de kennis van de invloed van zure regen op de bodem in Nederland. Tevens is de invloed op de vegetatie, op het oppervlaktewater met de daarin voorkomende organismen en op de landdieren in de inventarisatie betrokken. Voor de inventarisatie is gebruik gemaakt van reeds in Nederland beschikbare kennis; er is geen nieuw onderzoek verricht.

Eventuele maatregelen voor bestrijding van zure regen bij de bron en de kosten daarvan, worden in dit rapport niet behandeld. Deze onderwerpen komen aan de orde in de beleidsnotitie, waar dit rapport een bijlage van vormt.

Hoewel niet geheel juist, is de term "zure regen" gehandhaafd. Hieronder wordt verstaan de depositie vanuit de atmosfeer van stoffen met een verzurende werking. Hierbij zijn vooral zwaveldioxide (SO_2), stikstofoxiden (NO_x) en ammoniak (NH_3) alsmede de volgprodukten ammoniumsulfaat en ammoniumnitraat van belang.

In het buitenland zijn ernstige effecten geconstateerd, zoals aantasting van bossen en verzuring van meren, welke met grote waarschijnlijkheid (mede) het gevolg van zure regen zijn. In Nederland zijn soortgelijke effecten waargenomen. Gevreesd wordt dat een deel van de effecten onomkeerbaar is.

1.2 Depositie

Als gevolg van menselijke activiteiten is de depositie van de beschouwde verzurende stoffen toegenomen tot minstens het 5-voudige van het natuurlijke niveau. Daarbij is aangenomen dat ammoniak volledig door oxidatie in zure verbindingen wordt omgezet. In werkelijkheid is dit slechts voor een deel het geval. Natte depositie, waarbij

stoffen door vooral regen uit de atmosfeer worden verwijderd, vormt ongeveer 1/3 van het totaal. Het overige 2/3 deel, de droge depositie, wordt zonder tussenkomst van regen afgezet. Droge depositie is sterk afhankelijk van de aard en toestand van het ontvangende oppervlak (blad, droog of nat; kale bodem; water).

De totale huidige zure depositie is voor ongeveer:

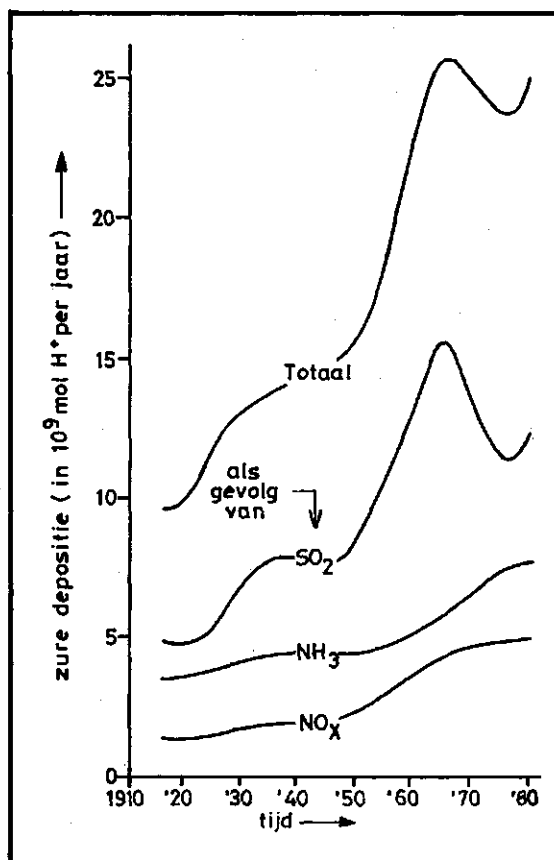
- de helft het gevolg van SO_2 emissies (vooral van de industrie);
- 1/3 het gevolg van NH_3 emissies (vooral van de vee-teelt);
- 1/5 het gevolg van NO_x emissies (vooral van het wegverkeer, maar ook van de industrie).

Globaal 3/4 van de depositie die het gevolg is van SO_2 en NO_x wordt veroorzaakt door buitenlandse bronnen. Overigens wordt er iets meer SO_2 en aanzienlijk meer NO_x "geëxporteerd" dan "geïmporteerd". Voor NH_3 zijn nog geen betrouwbare balansen beschikbaar; de totale depositie in Nederland is echter globaal gelijk aan de totale Nederlandse emissie. De geschatte ontwikkeling van de zure depositie in de afgelopen decennia is weergegeven in figuur 1.1.

1.3. Bodem

1.3.1. Verzuuringsproces

In de bodem vindt een groot aantal processen plaats die zuur produceren of consumeren. Het saldo van deze processen en de zuurtoevoer vanuit de at-



Figuur 1.1. Ontwikkeling van zure depositie in Nederland. (Schatting volgens Zwerver, Symposium Zure Regen, 's-Hertogenbosch, 1983).

mosfeer wordt zuurbelasting genoemd. Door menselijke activiteiten zijn zowel de toevoer uit de atmosfeer als de processen vaak ingrijpend veranderd.

Als gevolg van het bodemgebruik ontstaat in land- en tuinbouwgronden een aanzienlijke zuurbelasting. Deze wordt gecompenseerd door regelmatige toevoeging van kalk. De extra belasting door zure regen maakt het noodzakelijk maximaal enkele tientallen procenten meer kalk toe te voegen. In cultuurgebieden treedt daarom geen verlaging van de pH¹⁾ van de bodem op als gevolg van zure regen. Wel spoelen verscheidene stoffen versterkt uit naar het grondwater.

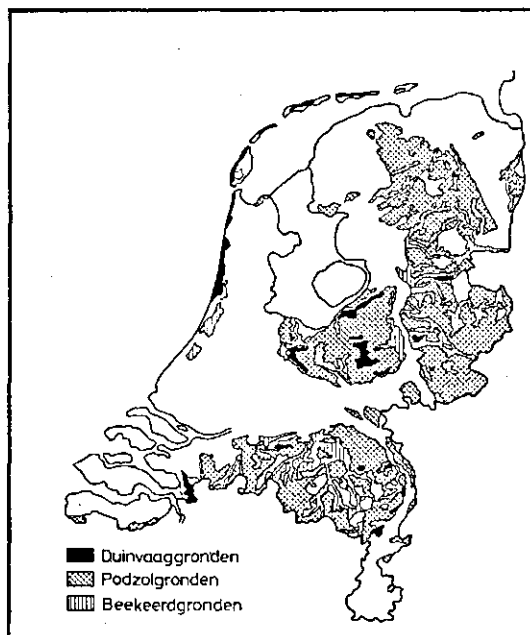
In natuurgebieden is de zuurbelasting over het algemeen gering indien geen door de mens veroorzaakte zure depositie plaats zou vinden. Onder bossen is ook in dat geval de zuurbelasting niet verwaarloosbaar en wordt nog versterkt door het kappen van bomen. Bodems onder bossen verzuren dan ook van nature, zij het langzaam. Bij een gegeven zuurbelasting zijn de gevolgen hiervan sterk afhankelijk van de samenstelling van de bodem. Voor zover nog in voldoende mate beschikbaar, zorgen in de bodem aanwezige stoffen voor neutralisatie van zuren; de zogenaamde bufferende werking. Bij afnemende pH waarden zijn dit achtereenvolgens kalk, mineralen, humus, aluminium- en ijzeroxiden. Bij deze buffering worden aan het bodemmateriaal gebonden metalen vrijgemaakt, en gaan in oplossing. Zo kunnen voor de planten noodzakelijke voedingsstoffen zoals kalium, calcium en magnesium uitspoelen naar het grondwater. In de bodem aanwezige toxische stoffen, zoals zware metalen en vooral aluminium, kunnen worden omgezet in vormen die schade aan organismen veroorzaken. Dit laatste gebeurt pas als de bodem reeds erg zuur is geworden doordat andere buffers niet snel genoeg werken of zijn opgebruikt.

- 1) De pH is een maat voor de zuurgraad. Hoe lager hoe zuurder. pH = 7 is neutraal. De pH van azijn is 3; de pH van accuzuur is 1.

Afhankelijk van de grootte van de zuurbelasting worden de bufferende stoffen meer of minder snel opgebruikt. Dit uitputtingsproces is in de meeste gevallen niet omkeerbaar.

De natuurgebieden in Nederland zijn veelal gelegen op bodems welke arm zijn aan bufferende stoffen en die daardoor gevoelig zijn. Figuur 1.2 geeft aan waar de gevoelige bodemtypen gelegen zijn. Schattingen geven aan dat de meest gevoelige bodems in natuurgebieden bij de

huidige depositie binnen korte tijd tot een aanzienlijke diepte een lage pH zullen hebben. Voor sommige gronden zou dit reeds het geval moeten zijn. Incidentele waarnemingen bevestigen dit. Voor de overige gevoelige bodems zal dit binnen (enkele) tientallen jaren kunnen gebeuren.



Figuur 1.2. Overzicht van de voor verzuring gevoelige bodems. (Bron: Stiboka 1970).

1.3.2 Grondwater

Doordat in Nederland de neerslag over een jaar groter is dan de verdamping, sijpelt een deel van het regenwater door de bovenste bodemlagen naar het grondwater. Afhankelijk van de samenstelling van de bodem voert het daarbij stoffen mee naar het grondwater. Bij (nog) weinig verzuurde bodems zijn dit vooral calcium, magnesium en kalium; bij sterk verzuurde bodems ook aluminium en ijzer. In alle gevallen worden sulfaten en nitraten meegevoerd. De als gevolg van de huidige zure depositie verhoogde toevoer van deze stoffen, bedreigt de bruikbaarheid van grondwater voor de drinkwatervoorziening. Alhoewel nog geen ontoelaatbare concentraties van deze stoffen zijn opgetreden bij de waterwinningen, is dit voor ongeveer 1/3 van de totale grondwaterwinning binnen enkele tientallen jaren

wel te verwachten. De totale Nederlandse drinkwaterbehoefte wordt momenteel voor circa 2/3 door grondwater gedekt.

1.3.3 Bodemleven

Van de invloed van zure regen op de in de bodem levende organismen is weinig bekend. In voor verzuring gevoelige bodems treedt een verschuiving in soortensamenstelling op, en algemeen vindt een vermindering van de soortenrijkdom plaats. Een geconstateerd effect is vermindering van de afbraak van organisch materiaal door het verdwijnen van de daarvoor benodigde soorten zoals bacteriën en regenwormen. Daarmee neemt de beschikbaarheid van voor de plant benodigde mineralen af. Het vrijkomen van (zware) metalen, in voor planten en dieren schadelijke vormen is reeds genoemd.

1.4 Vegetatie

Bij de gevolgen van zure regen voor planten moet onderscheid gemaakt worden tussen directe en indirecte inwerking.

Bij de directe inwerking van stoffen uit de atmosfeer op de bovengrondse delen van planten, hebben andere dan de beschouwde stoffen vaak een versterkend effect, met name ozon¹⁾. De bijdrage van de afzonderlijke stoffen is moeilijk te onderkennen. Indirecte inwerking kan plaats vinden als gevolg van de veranderingen van de bodem waarin de plant wortelt. Bekend is de aantasting van de schimmels die samenleven met de haarwortels. Deze schimmels vervullen een belangrijke rol bij de stofwisseling van de plant. De effecten van directe en indirecte inwerking zijn vaak moeilijk te scheiden.

- 1) Verhoogde concentraties van ozon (O_3) ontstaan in de atmosfeer onder invloed van zonlicht, vooral in aanwezigheid van organische verbindingen en stikstofoxiden, die door menselijke activiteiten in de atmosfeer komen.

Op grond van uitgevoerde proeven moet worden aangenomen dat het huidige niveau van luchtverontreiniging door directe inwerking een vermindering van de opbrengst van land- en tuinbouwgewassen veroorzaakt. Voor gevoelige gewassen zou dit volgens het Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek (IPO) wel 10% kunnen belopen. Voor de gehele produktie zal dit getal gemiddeld lager liggen. Nauwkeurige schattingen zijn vooralsnog niet beschikbaar. Aangezien de samenstelling van bodem in cultuurgebieden kunstmatig in stand gehouden wordt, spelen indirecte effecten hier (vrijwel) geen rol.

De inwerking van luchtverontreiniging op de vegetatie heeft in Nederland onder andere geleid tot een sterke achteruitgang van korstmossen en van een aantal soorten paddestoelen (vooral de cantharel).

Uit recent onderzoek van Staatsbosbeheer blijkt dat de vitaliteit van het Nederlandse bos minder is dan op grond van "normale" oorzaken verklaard kan worden. Met grote mate van waarschijnlijkheid is dit het gevolg van zowel directe als indirecte inwerkingen. Alhoewel zware beschadigingen zoals die in Duitsland optreden niet zijn gevonden, wordt de toestand door Staatsbosbeheer zorgwekkend genoemd. Een kwantificering is niet mogelijk omdat geen vergelijkbaar historisch onderzoek beschikbaar is. Verdere achteruitgang van het bos moet verwacht worden bij voortdurende van het huidige depositieniveau. Het risico bestaat dat de bossen op de meest gevoelige gronden op vrij korte termijn plaats maken voor soortenarme zuurresistente vegetaties.

De geconstateerde vergrassing van heidevelden en stuifzandbebossingen wordt ook aan zure regen geweten. Hierbij speelt waarschijnlijk de bemestende werking van de stikstofverbindingen NO_x en NH_3 mede een rol.

1.5 Fauna

Bekend is dat enkele insektensoorten (onder andere lieveheersbeestjes, loopkevers, stofluizen) en mijten (onder

andere de mosmijt) bij het huidige luchtverontreinigingsniveau in aantal verminderen of zelfs verdwijnen. Effecten op andere diersoorten zijn niet onderzocht of geconstateerd maar kunnen worden verondersteld als gevolg van wijzigingen in voedselketens, doordat bodemleven, vegetatie en insecten door zure regen worden beïnvloed.

1.6 Oppervlaktewater

De samenstelling van oppervlaktewater wordt beïnvloed door rechtstreekse depositie en door water dat over of door de bodem naar het oppervlaktewater afstroomt. Bij de grotere stromende en stilstaande wateren treden vrijwel geen effecten op. De honderden, oorspronkelijk zwak gebufferde, vennen en andere kleinere wateren op de in figuur 1.2 aangegeven gevoelige gronden zijn vrijwel alle verzuurd. In deze wateren is een aanzienlijke vermindering van de rijkdom aan soorten planten en dieren, alsmede een verandering van de soorten geconstateerd; de meeste vissoorten zijn verdwenen.

1.7 Schade

Slechts een gering deel van de effecten die bij de huidige depositiewaarden optreden, laten zich direct in geld uitdrukken. Globale schattingen van de schade door opbrengstvermindering in de land- en tuinbouw komen in de orde van tientallen tot honderden miljoenen guldens per jaar bij gelijkblijvende prijzen. Vermeerderde onderhoudsbekalking voor cultuurgronden kost tientallen miljoenen guldens per jaar. Op den duur kunnen de schade door verminderde houtopbrengst en de verhoogde kosten van (drink)watervoorziening elk tientallen miljoenen guldens per jaar belopen. Achteruitgang van de Nederlandse bossen betekent de aantasting van een in de loop van vele decennia opgebouwd kapitaal ter waarde van miljarden guldens.

Daarnaast is er echter sprake van belangrijke schade die zich niet in geld laat uitdrukken. De geconstateerde achteruitgang van natuurgebieden zal bij voortduring van de huidige depositie zeker verergeren. De toestand van de

Nederlandse bossen is nu reeds zorgwekkend. Het in snel tempo verdwijnen van buffers uit bodems en oppervlaktewateren in natuurgebieden is veelal een onomkeerbaar proces. In de meest gevoelige gebieden heeft zich dit reeds tot een aanzienlijke diepte voltrokken. Het verdwijnen van zeldzame dier- en plantensoorten zal doorzetten. De genoemde effecten zijn strijdig met het huidige regeringsbeleid betreffende natuurbehoud, bodembescherming, recreatie, drinkwatervoorziening en houtproductie.

Algemeen gesproken treden veranderingen op vrijwel alle niveaus in ecosystemen op, zoals vermindering van de soortenrijkdom, het wegvallen van diersoorten en planten uit voedselketens, vermindering van voortplanting van planten en dieren en vermindering van vitaliteit en levensduur, vooral van bossen. Dit moet worden gezien als een signaal van een grootschalige achteruitgang in de opbouw en het functioneren van ecosystemen, en daarmee van het feit dat het huidige menselijk handelen voor wat betreft emissies van verzurende stoffen niet ecologisch inpasbaar is.

1.8 Vermindering van depositie

Vermindering van zure regen als gevolg van vermindering van emissies kan geconstateerde effecten gedeeltelijk opheffen. Schade aan land- en tuinbouwgewassen wordt ongeveer evenredig met de vermindering van de depositie verlaagd. Schade aan bossen zal ook na vermindering van de depositie merkbaar blijven. Aanzienlijke vermindering van de depositie tot bijvoorbeeld de helft van het huidige niveau zal de achteruitgang van de bossen echter aanmerkelijk vertragen. Herstel op langere termijn is mogelijk bij vermindering tot ongeveer 20% van het huidige niveau. Sommige oppervlaktewateren en bodems zijn onomkeerbaar veranderd. Andere zijn op langere termijn, eventueel met kunstmatige ingrepen, in een min of meer natuurlijke staat terug te brengen. Het grondwater kan op de meeste plaatsen de oorspronkelijke samenstelling terugkrijgen indien de depositie tot het natuurlijke niveau wordt teruggedrongen. Dit is echter een zeer langdurig proces.

Opgemerkt wordt dat de doelstellingen van het IMP-Lucht 1984-1988 zouden leiden tot een reductie van het huidige depositie niveau met 50 à 60%.

1.9 Nader onderzoek

Nader onderzoek van een aantal aspecten van het beschouwde aandachtsveld is dringend gewenst. Dit betreft zowel de vele nog onvoldoende bekende processen als het ontwerpen en verifiëren van modellen waarin de samenhang tussen belasting met zure en verzurende stoffen en de effecten kwalitatief en kwantitatief wordt beschreven. Daarnaast moet gestreefd worden naar het verkrijgen van tijdreeksen van geconstateerde effecten in relatie tot de depositie, zoals de vitaliteitstoestand van de bossen en de verzuuring van de bodem met inbegrip van het grondwater.

Meer dan voorheen zal het onderzoek geïntegreerd, interdisciplinair en in internationaal verband moeten worden uitgevoerd.

2. INLEIDING

Reeds vele tientallen jaren geleden werd in Scandinavië een achteruitgang geconstateerd van de visstand in meren. Daarna is het tempo van achteruitgang sterk versneld, waardoor in veel meren de vissen inmiddels grotendeels verdwenen zijn. De afgelopen jaren zijn soortgelijke verschijnselen geconstateerd in meren in Canada, het noorden van de Verenigde Staten, Wales, Schotland en andere gebieden. Onderzoek in met name Scandinavië toonde een duidelijk verband tussen de steeds slechtere kwaliteit en de zuurgraad van de neerslag enerzijds en veranderingen in chemische samenstelling en processen in het water anderzijds, waardoor naar alle waarschijnlijkheid deze achteruitgang in de visstand werd veroorzaakt; de term "zure regen" deed opgang.

In diverse landen in Midden- en Oost Europa en met name in West-Duitsland is de laatste jaren geconstateerd dat de bossen over grote oppervlakten ernstig zijn aangetast. Onderzoek gaf aan dat er een correlatie is tussen de mate van luchtverontreiniging in de vorm van zwaveldioxide en de aantasting. De directe inwerking daarvan op de bomen kan echter niet alle effecten verklaren. Tenminste een deel van de effecten wordt kennelijk door andere processen veroorzaakt. Indirecte inwerking via de bodem van door depositie toegevoerde zwavel- en stikstofverbindingen wordt momenteel gezien als een belangrijk ander proces. Inmiddels worden soortgelijke effecten ook uit Canada, de Verenigde Staten en, hoewel in mindere mate, Nederland gemeld.

Er zijn verder sterke aanwijzingen dat in Nederland ook andere vegetaties, bijvoorbeeld heidevelden, zijn aangetast of worden bedreigd door de directe inwerking van zwavel- en stikstofverbindingen uit de lucht, of door het steeds voortschrijdende verzuringsproces van de bodem. Dit geldt ook voor delen van de fauna. Metingen van de kwaliteit van het ondiepe grondwater in Nederland geven een indicatie dat dit op enkele plaatsen reeds is beïnvloed door depositie vanuit de atmosfeer.

De berichten uit binnen- en buitenland worden steeds verontrustender. De verwachting dat een deel van de processen tot onomkeerbare effecten zal leiden, geeft reden tot toenemende bezorgdheid. Over de rol van het verzuringsproces bij de geconstateerde effecten bestaat echter nog steeds veel onzekerheid.

In februari 1983 werd in de Tweede Kamer een motie ingediend door Mevrouw De Boois waarin de regering wordt verzocht een breed inventariserend onderzoek te verrichten naar de huidige en te verwachten schade op verschillend gebied door verzuring van de bodem (zie Annex 1). De motie werd aanvaard en de ministers van VROM en van L & V zegden de Kamer toe rond de jaarwisseling een notitie hierover te zullen voorleggen.

Het inventariserend onderzoek dat hiervoor werd gestart kreeg als naam "Onderzoek verzuring door atmosferische depositie" en had een meerledig doel:

- het weergeven van de stand van de kennis over processen en werkingsmechanismen bij depositie van (potentieel) verzurende stoffen;
- het weergeven van de kennis over de aard en omvang van de huidige effecten en de daardoor veroorzaakte schade in Nederland;
- het aangeven van mogelijk in de toekomst te verwachten effecten en schade in Nederland;
- het aangeven van knelpunten en lacunes in de kennis over de processen, het aangeven van mogelijkheden om knelpunten en lacunes te verhelpen met nader onderzoek en het aangeven van prioriteiten voor dit onderzoek.

Het aandachtsveld betreft de bodem met inbegrip van zich daarin bevindende organismen en grondwater, vegetatie, fauna en oppervlaktewater.

Effecten van atmosferische depositie op gebouwen en dergelijke worden hier niet besproken. Evenmin worden eventuele maatregelen voor bestrijding bij de bron van zure regen, en de kosten daarvan, in dit rapport behandeld. Deze onderwerpen komen aan de orde in de beleidsnotitie, waar dit rapport een bijlage van vormt. Eventuele directe ef-

fecten van luchtverontreiniging op mensen en landbouwhuisdieren zijn niet beschouwd.

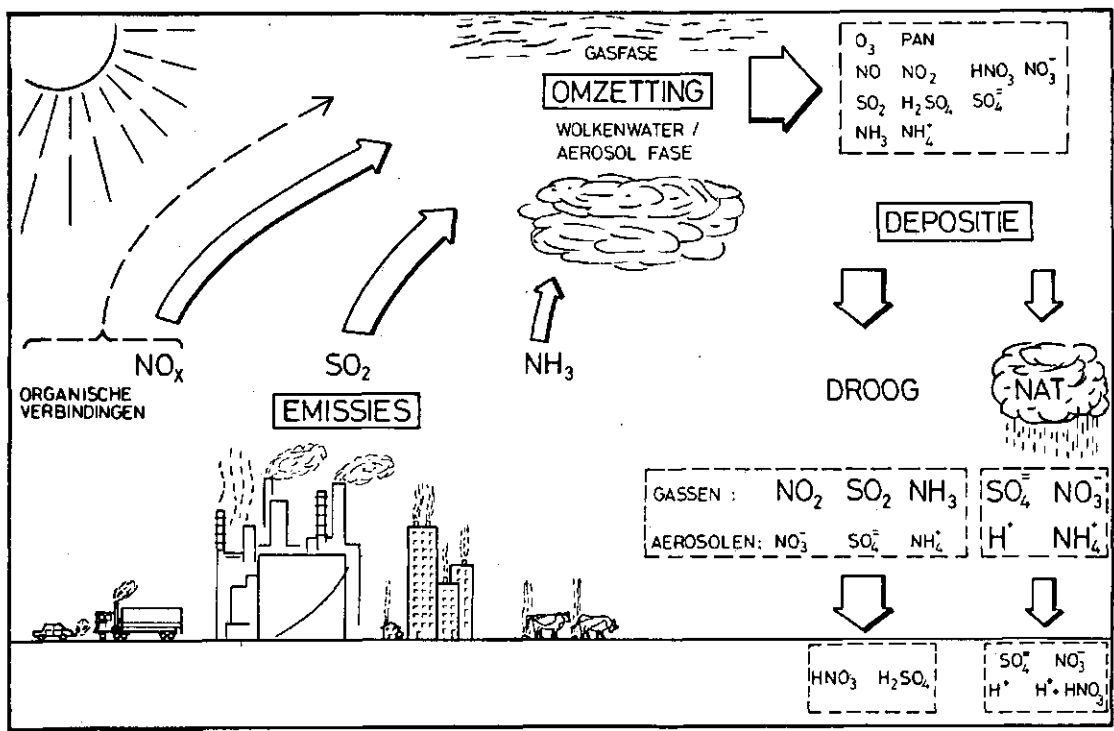
In dit rapport zal de nadruk liggen op de verzuring door atmosferische depositie. De belangrijkste beschouwde stoffen zijn zwaveldioxide (SO_2), stikstofoxiden (NO_x) en ammoniak (NH_3). Andere stoffen zijn soms lokaal wel van belang en zullen kort worden gememoreerd. De effecten van directe inwerking van verontreinigingen in de atmosfeer zijn echter vaak niet te scheiden van de effecten van verzuring. Ook zijn deze effecten samen vaak moeilijk te scheiden van effecten die door andere oorzaken ontstaan, zoals klimaatschommelingen, overbemesting, ziekten van bomen en dergelijke. Voor zover mogelijk zal toch worden getracht de effecten van verzuring apart aan te geven. Waar sprake is van versterkende of tegenwerkende processen als gevolg van andere oorzaken zal daar kort op worden ingegaan. Getracht is de beïnvloeding van ecosystemen als totaal centraal te stellen.

Voor de verklaring van de belangrijkste in dit rapport gebruikte (wetenschappelijke) begrippen en afkortingen wordt verwezen naar Annex 5. Literatuurverwijzingen zijn niet opgenomen. Hiervoor wordt verwezen naar de basisrapporten.

3. ATMOSFERISCHE PROCESSEN EN DEPOSITIE

3.1 Atmosferische processen

Depositie van zure en verzurende stoffen op bodem, water en vegetatie is een gevolg van emissies van luchtverontreinigende stoffen in de atmosfeer zoals is aangegeven in figuur 3.1.



Figuur 3.1. Overzicht emissies, atmosferische processen en depositie.

Door emissies worden stikstofoxiden - hoofdzakelijk stikstofmonoxide (NO) - zwaveldioxide en ammoniak in de lucht gebracht. Door verspreiding door wind en verdunning door turbulente menging in de atmosfeer kunnen deze verontreinigingen ook op aanzienlijke afstand van de bronnen in de lucht aanwezig zijn. Door omzettingen zowel in de gasfase als in wolkenwater en in zwevende deeltjes (aerosolen) worden uit de primaire luchtverontreiniging secundaire verontreinigingen gevormd, zoals salpeterzuur, zwavelzuur, sulfaten, nitraten en ammoniumzouten. Deze omzettingen kunnen worden beïnvloed door fotochemische processen, die op hun beurt afhankelijk zijn van emissies van organische verbindingen en stikstofoxiden.

Al deze stoffen kunnen uit de lucht worden verwijderd door droge of natte depositie, waarbij de stoffen op de bodem terecht komen. Bij natte depositie is neerslag betrokken; de stof wordt opgenomen in het water van een wolk, waaruit vervolgens regen valt, of de stof wordt ingevangen door vallende regendruppels. Men spreekt van droge depositie als de stof zonder tussenkomst van neerslag op de bodem komt. Voorbeelden zijn de absorptie van gassen zoals zwaveldioxide, stikstofdioxide en ammoniak op vegetatie, oppervlaktewater of bodem, en het "invangen" van aerosol-deeltjes door planten. Bepaalde meteorologische condities, zoals mist of dauw, kunnen hoge piekbelastingen veroorzaken.

3.2 Depositie van zure en verzurende stoffen

3.2.1 Relevante stoffen

Zure neerslag is vooral het gevolg van door menselijke activiteiten veroorzaakte emissies van stikstof- en zwaveloxiden. Zwaveldioxide wordt in de lucht, in de bodem of in het water geoxideerd tot zwavelzuur en al of niet geneutraliseerd tot sulfaat. De belangrijkste stikstofoxiden zijn stikstofmonoxide en stikstofdioxide (NO_2). NO wordt omgezet in NO_2 . Door omzetting van NO_2 in de lucht ontstaan salpeterzuur en nitraten. Andere volgprodukten van stikstofoxiden zoals peroxyacetylnitraat (PAN) en salpeterigzuur (HNO_2) geven slechts zeer geringe bijdragen aan de depositie. In regenwater komen van alle genoemde stoffen alleen sulfaat en nitraat voor. Daarnaast is in regenwater de concentratie van waterstofionen (H^+), die de zuurgraad bepaalt, vanzelfsprekend van belang.

Ammoniak, de enige kwantitatief belangrijke basische component in de atmosfeer, komt in de gasfase voor. Het ammonium (NH_4^+) is een belangrijke component in aerosolen en in het regenwater. Hoewel NH_3 in het algemeen zuur neutraliseert, is het op te vatten als potentieel zuur. Ammoniak en ammonium worden namelijk door nitrificerende bacteriën in de bodem geheel of gedeeltelijk in salpeterzuur omgezet. Bij het ammonium komt bij dit proces behalve

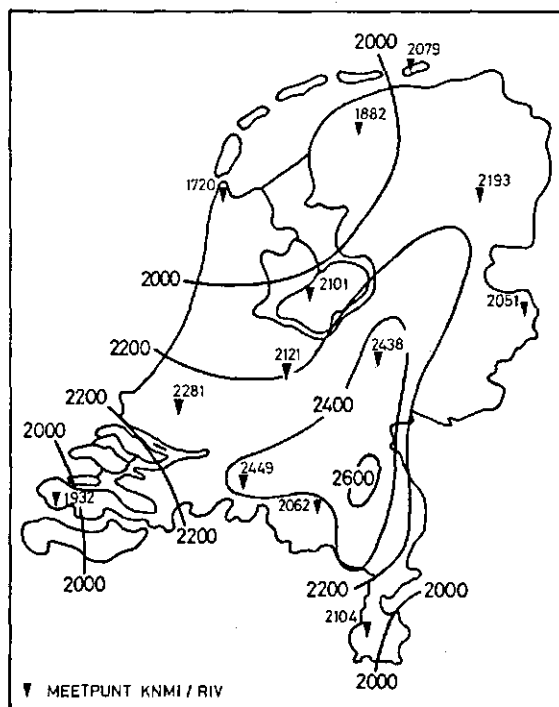
salpeterzuur (HNO_3) ook het zuur vrij, dat het NH_3 aanvankelijk in aerosolen of in regenwater had geneutraliseerd.

De bijdrage van zoutzuur, fluorwaterstof en van andere componenten aan de verzuring is relatief klein.

Bij de bepaling van de omvang van de depositie is hier aangenomen dat opname op de bodem van zuurvormende oxiden zoals NO_2 en SO_2 en ook opname van ammoniak volledig leidt tot vorming van zuur. Met name voor stikstofverbindingen is deze aanname niet altijd juist. Een deel van deze verbindingen wordt door planten als voedingsstof opgenomen, waarbij de verzurende werking gedeeltelijk wordt gecompenseerd. Dit is sterk verschillend per soort vegetatie. Ook is de nitrificatie niet altijd volledig. De hieronder vermelde schattingen dienen daarom als maxima te worden opgevat.

3.2.2 Omvang van de natte depositie

De depositie van zure en verzurende stoffen in regenwater is uit metingen bekend. Ze bedraagt voor Nederland gemiddeld 2100 mol zuur equivalenten per ha per jaar (periode 1978-1982). Deze depositie varieert over het land zoals aangegeven in figuur 3.2. De natte depositie hangt in Nederland niet af van de aard van het terrein.



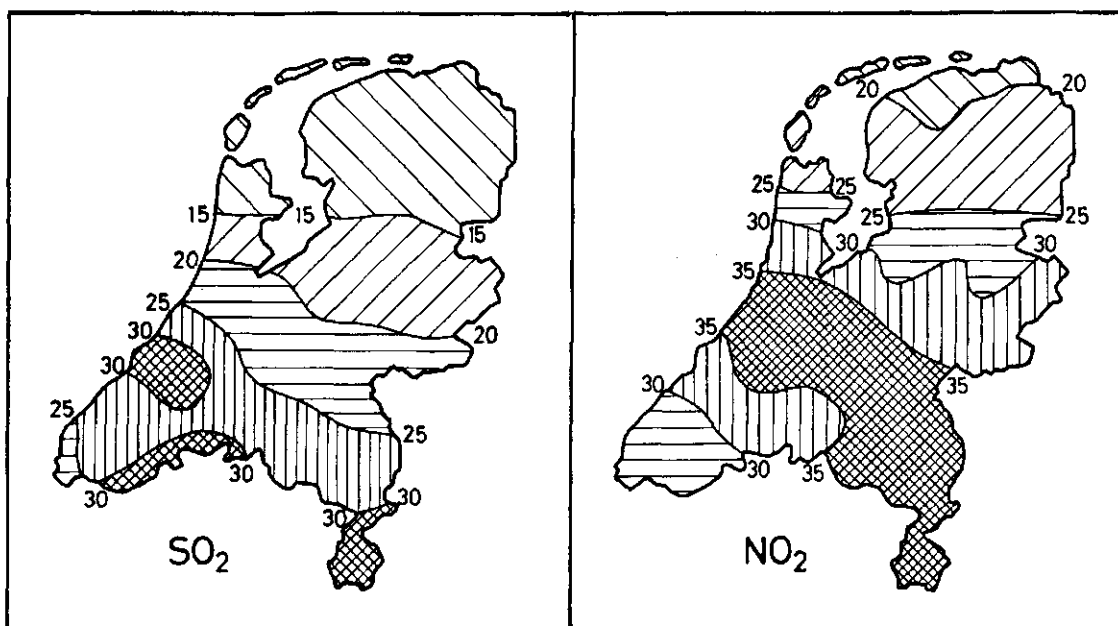
3.2.3 Omvang van de droge depositie

De droge depositie kan alleen worden geschat uit de gemeten concentraties in lucht in combinatie met

Figuur 3.2. Natte zuurdepositie in mol per ha per jaar. Periode 1978-1982. (Bron:KNMI 1983).

waarden van de zogenaamde depositiesnelheid uit de literatuur. Voor veel stoffen is de depositiesnelheid onvoldoende bekend. De gemiddelde droge depositie van zure en verzurende stoffen is voor Nederland naar schatting 3900 mol per ha per jaar (periode rond 1980).

De droge depositie hangt af van de aard van het oppervlak (bos, heide, akker, water, etc.; droog of nat oppervlak). De beschikbare gegevens zijn onvoldoende om de variatie van de droge depositie over Nederland aan te geven. De droge depositie is, gezien de concentraties in lucht (zie figuur 3.3), vermoedelijk het grootst in het midden en zuiden van Nederland.



Figuur 3.3. Concentratie van SO₂ en NO₂ in de lucht in microgram per m³. Jaargemiddelden voor de periode april 1980- april 1981. (Bron: Nationaal Meetnet Luchtverontreiniging).

3.2.4 Totale depositie.

De totale zure depositie op Nederland is sinds het begin van deze eeuw aanzienlijk toegenomen. Figuur 3.4 geeft een beeld van de geschatte historische ontwikkeling van de depositie.

In tabel 3.1 is de totale huidige depositie van zure en

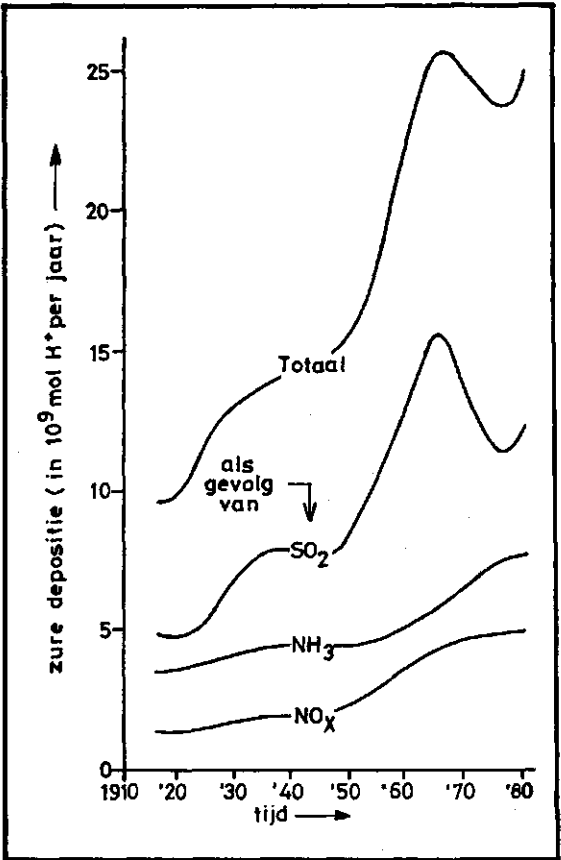
verzurende stoffen aangegeven, opgesplitst naar bijdragen van zwaveldioxide en volgprodukten, stikstofoxiden en volgprodukten, en ammoniak en ammonium. De depositie vindt voor ongeveer tweederde deel plaats in de vorm van droge depositie.

In gebieden met relatief hoge concentraties van NO_x en SO₂, of met belangrijke ammoniakemissies, is de depositie waarschijnlijk hoger dan gemiddeld over Nederland. Een voorlopige schatting voor een station in Noord-Brabant geeft circa 8500 mol per ha per jaar.

Tabel 3.1. Depositie van zure en verzurende componenten¹⁾ in mol zuurequiv. per ha per jaar in Nederland, uitgedrukt in SO₂, NO₂, NH₃ en hun volgprodukten. Schattingen voor de periode rond 1980.

Depositie	SO ₂	NO ₂	NH ₃	Totaal
Nat	890	420	790	2100
Droog	1860	890	1150	3900
	____+	____+	____+	____+
Totaal	2750(46%)	1310(22%)	1940(32%)	6000

1) Aangenomen is dat zuurvormende oxiden en ammoniak volledig worden omgezet in zuur.



Figuur 3.4. Historische ontwikkeling van de zure depositie in Nederland. (Schatting volgens Zwerver, Symposium Zure Regen, 's-Hertogenbosch 1983).

3.2.5 Depositie van bemestende stoffen.

De totale depositie van anorganische stikstofverbindingen (NO_x en NH_3) komt overeen met ongeveer 50 kg stikstof per ha per jaar. Hiervan is circa tweederde droge depositie. De depositie van zwavelverbindingen komt overeen met ongeveer 50 kg zwavel per ha per jaar (inclusief een bijdrage van zeezout, welke in tabel 3.1 niet inbegrepen is). De depositie van fosforverbindingen is vermoedelijk minder dan 1 kg fosfor per ha per jaar.

3.2.6 Bijdragen van binnen- en buitenlandse emissies aan de depositie.

De emissies in Nederland in 1980 van zwaveldioxide en stikstofoxiden zijn gegeven in tabel 3.2.

Tabel 3.2. Emissies van zwavel- en stikstofoxiden in miljoenen kg per jaar in Nederland in 1980.

Broncategorie	SO_2	NO_x ¹⁾
Industrie	419	197
Wegverkeer	15	282
Scheepvaart, vliegvelden	33	29
Ruimteverwarming	19	41
Tuinbouw	7	4
Overige	1	-
	— +	— +
Totaal	494	553

1) Uitgedrukt als NO_2 . Vooral de waarden voor NO_x zijn wat hoger dan als basisgegevens voor het NO_x beleid worden gebruikt, en welke zijn vastgesteld door de Technische Advies Commissie voor de SO_2 en NO_x bestrijding (TAC). De afwijking valt echter binnen de onnauwkeurigheidsmarge.

Voor SO_2 is circa 80% van de emissie afkomstig van - meest hoge - industriële puntbronnen (schoorstenen). Voor NO_x is dit circa 35%.

De totale emissie van ammoniak in Nederland bedraagt momenteel 130-160 miljoen kg per jaar. Hiervan is circa 85% afkomstig van dierlijke mest. Deze emissie is het hoogst op de Veluwe en het gebied rond de Peel.

De bijdragen van Nederlandse en buitenlandse emissies aan de depositie in Nederland zijn met behulp van een model geschat voor zwaveldioxide en voor stikstofoxiden, inclusief volgprodukten. Tabel 3.3 geeft een overzicht. Zoals daaruit blijkt is circa 75% van de depositie van zwavelverbindingen afkomstig uit het buitenland. Voor stikstofoxiden is dit circa 65%. De Bondsrepubliek, Groot Britannië, België en Frankrijk zijn de belangrijkste brongebieden. Voor ammoniak zijn dergelijke gegevens niet beschikbaar.

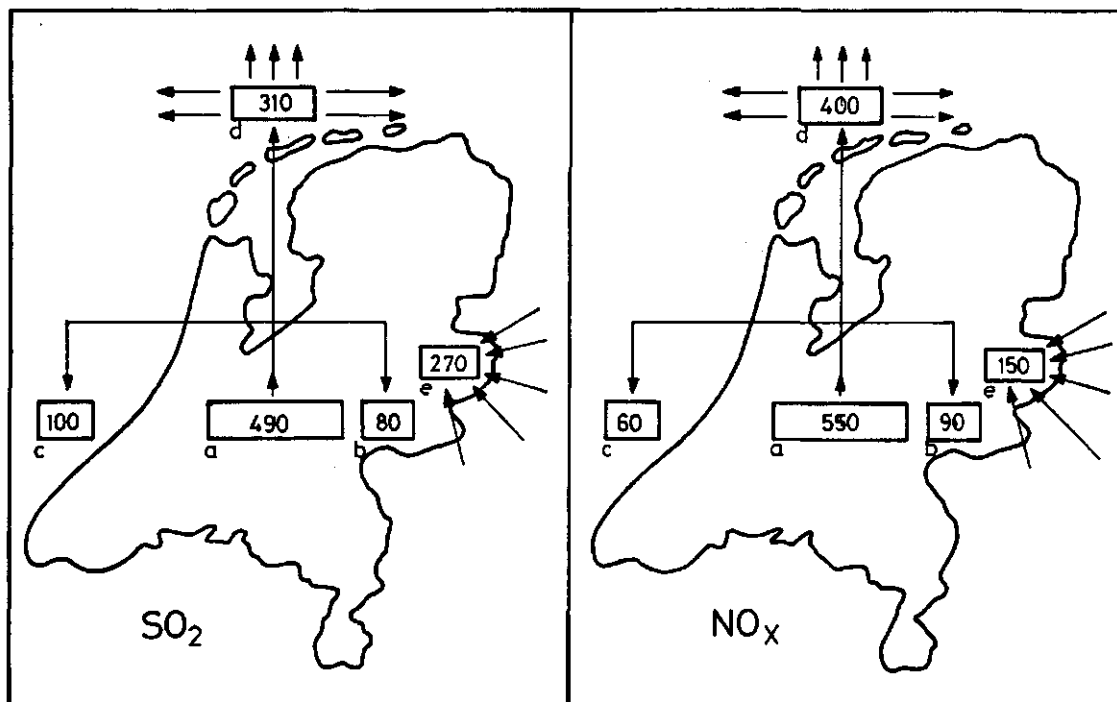
Tabel 3.3: Procentuele bijdrage¹⁾ van Nederlandse en buitenlandse bronnen aan de totale depositie van SO₂ en NO_x in Nederland, volgens modelberekeningen.

Herkomst	SO ₂	NO _x
Nederland	23	36
BRD	26	29
Groot Brittannië	19	15
België	15	10
Frankrijk	8	5
DDR	4	1
Polen	1	-
Tsjecho-Slowakije	1	-
Overig	3	4
	— +	— +
Totaal	100	100

1) De getallen zijn terwille van de overzichtelijkheid gegeven in procenten; de onnauwkeurigheid is echter aanzienlijk meer dan een procent.

Figuur 3.5 toont de emissie-depositie balansen voor Nederlandse emissies en de door buitenlandse bronnen veroor-

zaakte deposities voor SO_2 en NO_x . Hieruit blijkt dat, voor wat deze stoffen betreft, Nederland per saldo is op te vatten als een zuurexporterend land. Voor ammoniak ontbreken dergelijke gegevens nog. Wel blijkt uit de berekening de totale depositie op Nederlands grondgebied ongeveer gelijk te zijn aan de totale Nederlandse emissie.



Figuur 3.5. Emissie-depositie balansen voor Nederlandse emissies en deposities veroorzaakt door buitenlandse bronnen. Afgeronde waarden in miljoenen kilogrammen per jaar. a = totale Nederlandse emissie leidend tot depositie in Nederland (b), in zee (c) en in andere landen (d). e = depositie in Nederland van buitenlandse bronnen. NO_x is uitgedrukt in NO_2 . De depositie in zee is ontleend aan de publicatie-reeks "Lucht", no. 17.

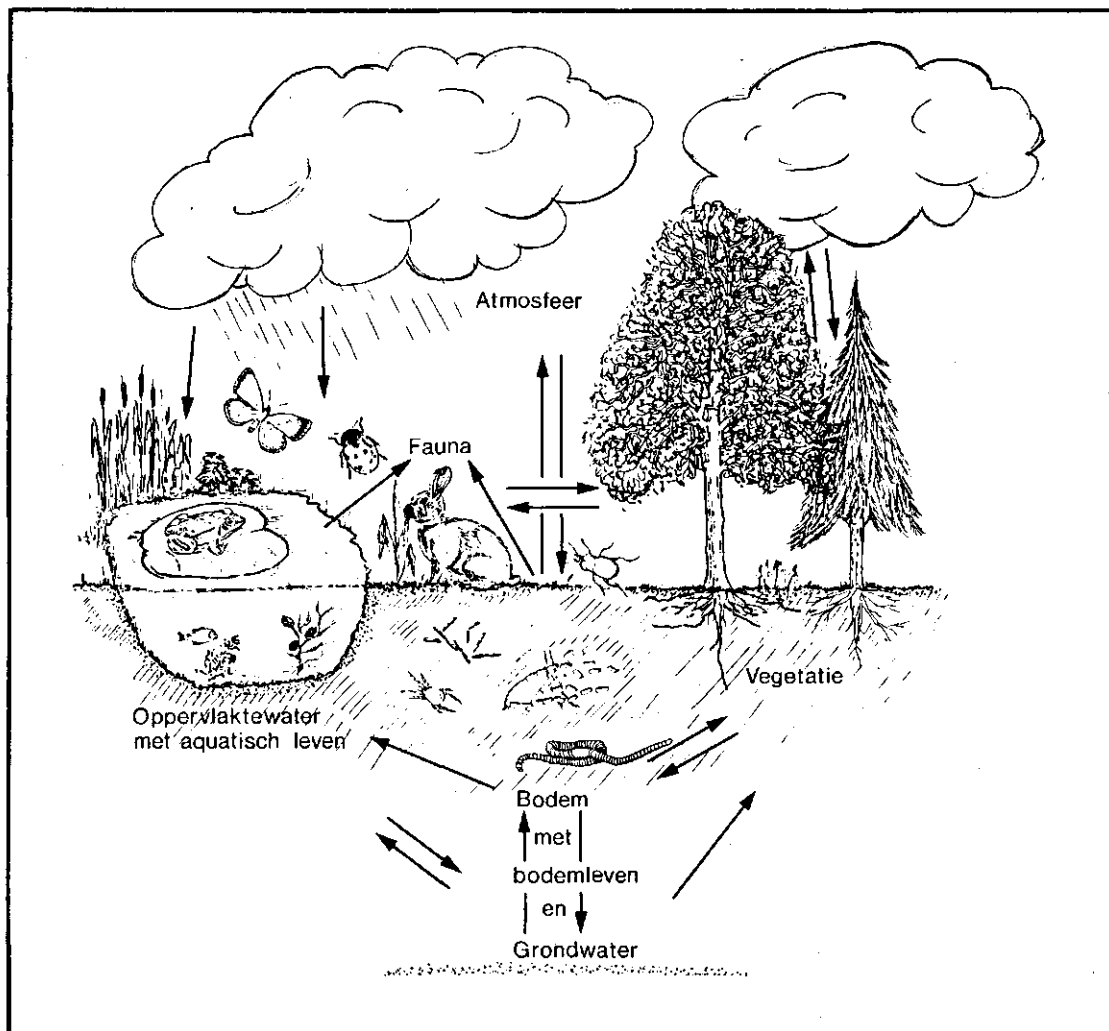
De geschatte natuurlijke zure depositie, dat wil zeggen die in afwezigheid van antropogene emissies, is minder dan 20% van de huidige depositie in Nederland.

4. INWERKINGEN OP HET MILIEU EN BEINVLOEDING VAN FUNCTIES EN BELANGEN

In dit hoofdstuk worden in kwalitatieve zin de processen beschreven die leiden tot effecten en schade in de beschouwde milieu componenten. Een kwantificering van de huidige en in de toekomst te verwachten effecten wordt gegeven in de hoofdstukken 5 en 6.

4.1 Systeembeschrijving

In figuur 4.1 is een schets gegeven van de beschouwde componenten van het milieu en van de relaties daartussen, die beïnvloed worden door depositie vanuit de atmosfeer van de stoffen die (potentiëel) verzurend werken.



Figuur 4.1. Beschouwde milieucomponenten en hun onderlinge relaties die beïnvloed worden door zure regen.

Op alle oppervlakken die in contact zijn met de lucht vindt depositie plaats van stoffen. Dit kan in natte (opgeloste) vorm zijn of in droge vorm. De natte depositie is evenredig aan de grootte van het water- of bodemoppervlak, de hoeveelheid neerslag en de concentraties van de beschouwde stoffen in de neerslag. De droge depositie is ook nog sterk afhankelijk van de aard van het ontvangende oppervlak. Droge depositie op plantendelen wordt voor een groot deel afgespoeld tijdens perioden met neerslag en bereikt zo de bodem.

Droge en natte depositie kunnen rechtstreeks invloed uitoefenen op planten en dieren. Zwavel- en stikstofverbindingen die eenmaal zijn afgezet worden in aanwezigheid van water en zuurstof relatief snel omgezet in sulfaten en nitraten. Daarbij komen waterstofionen vrij, zodat verzuring optreedt. Dit kan op plantendelen verdere schade veroorzaken.

In de bodem (en in beperkte mate ook op de vegetatie) bestaat een complex van chemische evenwichten. De aanwezigheid van kalk, bicarbonaten, zwakke organische zuren en mineralen kan ervoor zorgen dat de H^+ -ionen geheel of gedeeltelijk worden geneutraliseerd (gebufferd). Dit gaat dan gepaard met afvoer van kationen, zoals calcium (Ca^{2+}) en magnesium (Mg^{2+}), met het percolerende water naar het grondwater. Ook kunnen andere metalen zoals aluminium als ionen in oplossing gaan.

Als de buffercapaciteit van de bodem groot is (bijvoorbeeld in kalkrijke bodems), dan zal de verandering door verzuring voor de vegetatie en het bodemleven ook op langere termijn gering zijn. Bij geringe buffercapaciteit of als de buffering te langzaam verloopt, zal de zuurgraad (pH) betrekkelijk snel dalen en daardoor de omstandigheden voor vegetatie en bodemleven aanmerkelijk beïnvloeden. Dit kan ook doorwerken naar het grondwater indien de watervoevende pakketten weinig tot geen kalk bevatten.

Bepaalde functies van de bodem kunnen hierdoor worden aangetast. Genoemd worden de teeltfunctie, de ecologische

functie en de waterwinfunctie. Hierdoor kunnen belangen worden geschaad als het algemeen belang van de bescherming van de bodem, de land- en tuinbouw, de bosbouw, het natuur- en landschapsbehoud, de recreatie en de drinkwatervoorziening.

Water dat over de bodem of via het grondwater afstroomt naar het oppervlaktewater zal, samen met de directe droge en natte deposities op het oppervlaktewater, zorgen voor een toevoer van (potentieel) verzurende stoffen. Of dit tot verzuring leidt, is ook hier afhankelijk van de buffercapaciteit van het betreffende oppervlaktewater. In kalkarme wateren leidt dit al snel tot een soms aanmerkelijke verlaging van de pH waardoor aquatische ecosystemen zeer sterk worden beïnvloed. De relatie met de bodem kan ook omgekeerd lopen als het grondwater wordt gevoed vanuit het oppervlaktewater.

Op welke manier de dierenwereld (fauna) direct of indirect wordt beïnvloed door zure depositie is onzeker. Veranderingen in bodemleven en vegetatie door de geschetste processen zullen zeker doorwerken naar de fauna. Omgekeerd beïnvloedt de fauna de vegetatie (stuifmeelverspreiding bijvoorbeeld), zodat ook in deze zin effecten op wat langere termijn verwacht kunnen worden. Hierdoor kunnen de belangen van zowel de landbouw als de natuur- en landschapsbescherming worden aangetast.

4.2 Bodem

4.2.1 Beïnvloeding van de bodem

Bodemverzuring is de resultante van enerzijds de verschillende zuurproducerende en zuurconsumerende bodemprocessen die al van nature plaatsvinden en anderzijds de van oorsprong al enigzins zure depositie. Sedert tientallen jaren is de atmosferische zure depositie als gevolg van luchtverontreiniging door menselijke activiteiten zodanig toegenomen dat de bodemverzuring aanzienlijk wordt versterkt.

De zuurgraad alleen is geen goede maat om optredende

verzuring vast te stellen, omdat toevoer van H^+ -ionen niet altijd tot een pH daling hoeft te leiden als gevolg van de bufferende capaciteit van de bodem. Verzuring van de bodem wordt daarom gedefiniëerd als de afname van de zuurbufferende capaciteit van de bodem. De zuurbuffering is een tijdsafhankelijk proces, zodat ook de buffersnelheid van belang is.

In het algemeen kan men stellen dat in het bodemsysteem de volgende biochemische processen H^+ produceren:

- opname van ammonium en andere kationen door planten (met name in bossen), onder afgifte van H^+ ;
- mineralisatie van organische stof waarbij anionen en H^+ vrijkomen;
- oxidatie van stikstof- en zwavelverbindingen die onder andere als gevolg van depositie in het bodemsysteem terecht zijn gekomen;
- wortelademhaling (CO_2 -productie) en vorming van organische zuren (humuszuren).

De volgende biochemische processen consumeren H^+ :

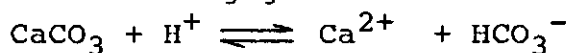
- opname van nitraat en andere anionen door planten (met name bij cultuurgewassen), met als gevolg neutralisatie van H^+ in het bodemvocht;
- mineralisatie van organische stof waarbij kationen vrijkomen (bijvoorbeeld mineralisatie tot ammonium) en denitrificatie;
- reductie van zwavelverbindingen.

Van nature zijn atmosferische depositie en biochemische processen niet altijd in evenwicht. De resultante hiervan wordt netto zuurbelasting genoemd. In bossen is deze van nature circa 0,5 kmol per ha per jaar. Door menselijke invloeden worden zowel de processen als de bruto depositie beïnvloed. In landbouwgebieden bijvoorbeeld veroorzaakt het bodemgebruik een jaarlijks overschot aan zuur tot maximaal 40 kmol per ha. Dit wordt gecompenseerd door onderhoudsbekalking. In bosgebieden wordt door houtproductie jaarlijks een overschot aan zuur van 0,5 à 1 kmol per ha veroorzaakt. Zure regen beïnvloedt de bruto input van zuur en de biochemische processen. In landbouwgebieden

betekent dit dat meer kalk moet worden toegevoegd. In natuurgebieden neemt de netto zuurbelasting toe.

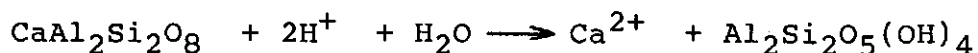
De netto zuurbelasting veroorzaakt verwerking van mineralen en humusdeeltjes, waarbij H^+ wordt opgenomen (gebufferd). Afhankelijk van de samenstelling van de bodem en de grootte van de netto zuurbelasting gaan de volgende verweringsprocessen achtereenvolgens een rol spelen:

- het calciumcarbonaat buffermechanisme vindt plaats bij een pH-KCl groter dan 6,5. Als kalk ($CaCO_3$) in de bodem aanwezig is, wordt dit buffersysteem als eerste gebruikt. Eenvoudig kunnen de evenwichtsreacties als volgt worden weergegeven:



De buffersnelheid is relatief hoog zolang de kalk homogeen in de bodem verdeeld is. Dit buffermechanisme blijft werkzaam zolang er kalk in de grond is; de pH blijft vrijwel constant.

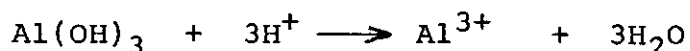
- het silicaatbuffermechanisme vindt plaats bij een pH-KCl lager dan 6,5. Een voorbeeld van silicaatverwerking is de omzetting van calciumveldspaat tot het kleimineraal kaoliniet:



De reactiesnelheid is echter gering; dientengevolge is ook de buffersnelheid gering. De silicaatbuffer lijkt dan ook van ondergeschikte betekenis.

- verwerking van klei- en humusdeeltjes vindt plaats bij een pH-KCl tussen 3 en 5. Bij dit proces worden bij klei- en humusdeeltjes kationen, zoals Ca^{2+} , K^+ en Mg^{2+} , uitgewisseld tegen H^+ . De buffersnelheid is laag maar neemt toe met dalende pH. De uitgewisselde kationen zijn, evenals de kationen die vrijkomen bij de silicaatverwerking, onderhevig aan uitspoeling.

- het aluminium (Al) en ijzer buffermechanisme vindt plaats bij een pH-KCl lager dan circa 3. Een voorbeeld van dit reactiemechanisme is:



Het aluminiumhydroxide is grotendeels afkomstig van de verwerking van kleimineralen. Wanneer de snelheid geringer is dan de zuurproduktie zal de pH verder dalen en

kan ook ijzer bufferend werken door verwerking van ijzer-oxiden en ijzerhydroxiden. De buffercapaciteit is relatief hoog; de buffersnelheid wordt groot bij zeer lage pH.

Uit het bovenstaande blijkt dat een toename van de netto zuurbelasting leidt tot de volgende effecten:

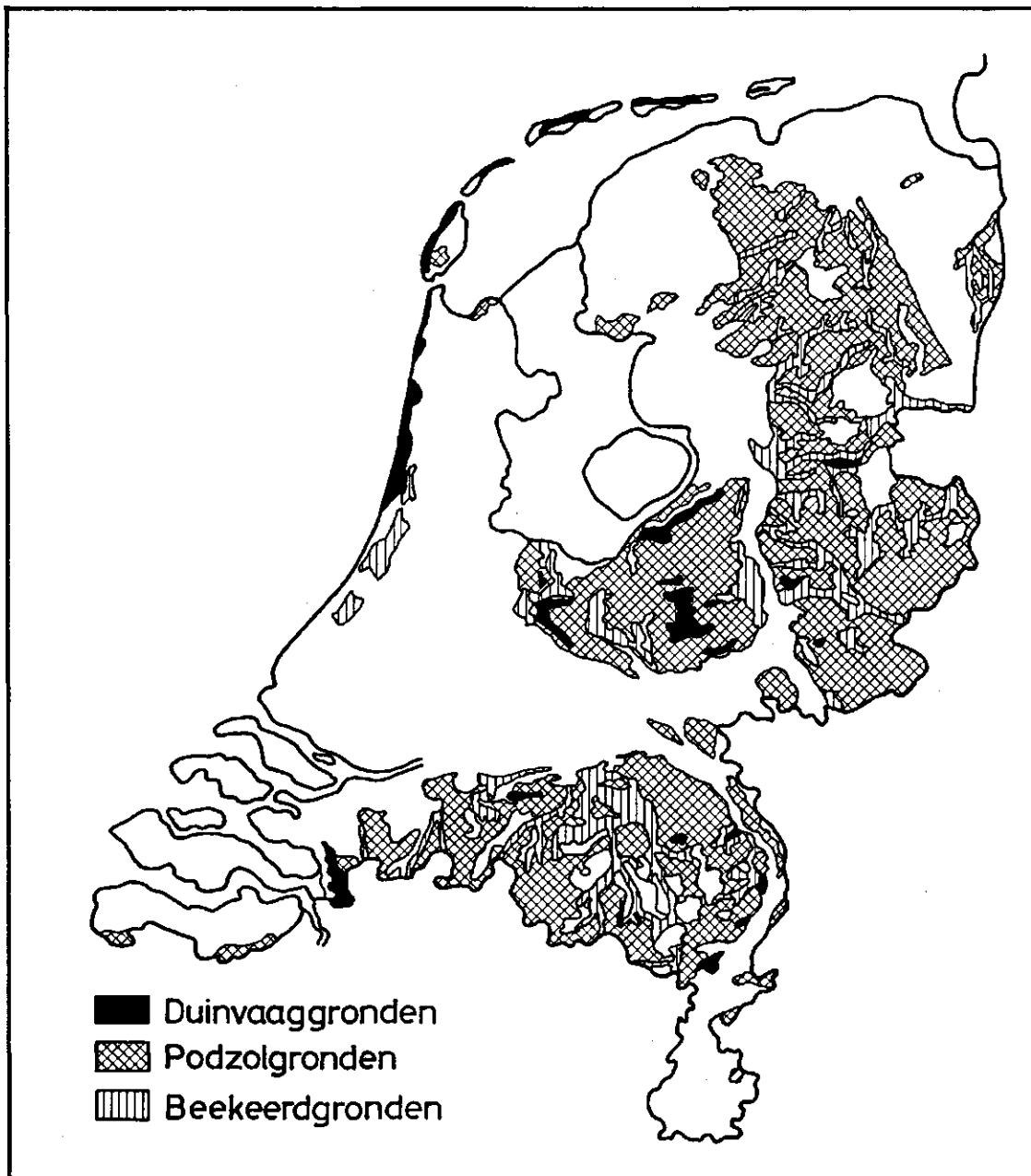
- toename van het oplossen van kalk;
- toenemende mobiliteit van de meeste elementen;
- toenemend verlies van bestaande kleimineralen;
- toename van uitspoeling van kationen te weten: voedingsionen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) en toxische ionen (aluminiumionen en eventueel aanwezige zware metalen);
- pH daling van het bodemvocht.

Als gevolg van de vergrote H^{+} -toevoer zullen "zuurfronten" zich door de bodem verplaatsen met een snelheid die bepaald wordt door de eigenschappen van de verschillende bodemlagen. De buffering van met name de kalkloze, humus-arme zandgronden is relatief klein, zodat deze gronden het meest kwetsbaar zullen zijn voor verzuring. Dit zijn:

- kalkloze duinvaaggronden (stuifzanden en duinen ten noorden van Bergen);
- podzolgronden;
- beekeerdgronden.

De ligging van deze bodemtypen is aangegeven in figuur 4.2.

In Nederland bestaat gemiddeld over een jaar een neerslagoverschot. Een deel van de regen sijpelt door de bovenste bodemlagen naar het grondwater en wordt uiteindelijk afgevoerd naar het oppervlaktewater. Met dit percolerende water worden H^{+} -ionen naar het grondwater afgevoerd tezamen met een reeks van andere kationen (voedingsstoffen en metalen zoals calcium, magnesium, kalium en aluminium) en anionen (voedingsstoffen zoals nitraat en sulfaat). De hoeveelheid H^{+} -ionen die wordt afgevoerd, en daarmee de pH, wordt bepaald door de buffermechanismen die in de bovengrond werkzaam zijn.



Figuur 4.2. Overzicht van voor verzuring gevoelige bodems.
(Bron: Stiboka 1970).

4.2.2 Beïnvloeding van het grondwater

Door de vergrote H^+ -toevoer kan het grondwater de volgende veranderingen ondergaan:

- pH daling;
- toenemend gehalte aan opgeloste stoffen (anionen- en kationentoeename).

Hydrologisch kan men in de bodem de volgende lagen onder-

scheiden:

- afdekkende en scheidende pakketten met een geringe doorlatendheid;
- watervoerende pakketten met betrekkelijk grote doorlatendheid.

Afdekkende pakketten en scheidende lagen bestaan in het algemeen uit klei, leem of veen met een relatief groot zuurbufferend vermogen. Dit in tegenstelling tot de doorgaans grofzandige watervoerende pakketten die, vooral als ze kalkloos zijn, een zeer geringe buffercapaciteit hebben. Natuurlijke ontkalking van deze pakketten is bij het ontbreken van afbreekbare organische stoffen gering. Mineralisatie vindt voornamelijk in de bovengrond plaats.

De kwetsbaarheid voor verzuring van het grondwater in een watervoerend pakket is afhankelijk van:

- de indringingssnelheid van het zuurfront. Deze is weer afhankelijk van de indringingssnelheid van het water, van de buffercapaciteit en -snelheid in bovenliggende bodemlagen en de dikte van deze lagen;
- de aanwezigheid van een afdekkend pakket of scheidende lagen;
- de mate van aerobie/anaerobie van het grondwater.

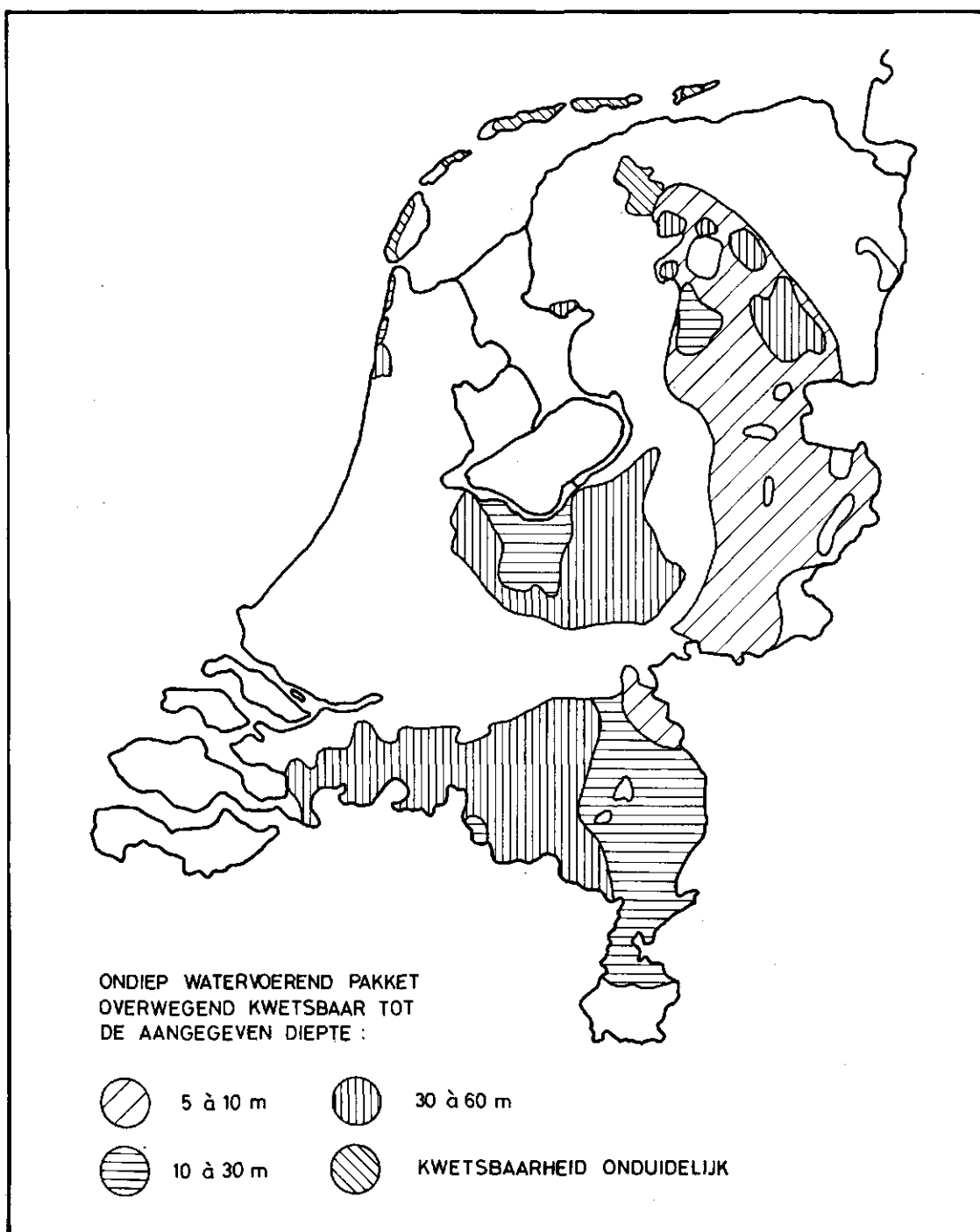
Dit betekent dat vooral in zandgebieden, waar de ondiepe bodem gevoelig is voor verzuring, waar geen scheidende lagen aanwezig zijn en waar het watervoerende pakket kalkloos en tot op grote diepte aerob is, het diepere grondwater kwetsbaar is voor verzuring. In figuur 4.3 is aangegeven waar en tot welke diepte dat het geval is.

4.2.3 De beïnvloeding van micro-organismen en microbiële processen

De microbiële processen zijn sterk afhankelijk van de pH. Uit verschillende onderzoeken blijkt, dat bij verlaging van de pH het organisch materiaal minder goed wordt afgebroken. De humificatie en mineralisatie verloopt trager. Dit uit zich zowel in een afname van de activiteit van de organismen zelf als in een accumulatie van deels afgebroken organische stof en humus op en in de bodem. Tabel 4.1

geeft een indicatie van de verschillen die optreden tussen bodems met pH 6 en 4.

Door verzuring verandert de beschikbaarheid van ionen in de bodem. Met name doordat aluminium en zware metalen als



Figuur 4.3. Kwetsbaarheid van watervoerende pakketten voor verzuring. (Bron RID).

Tabel 4.1. Verschil in microbiologische eigenschappen tussen gronden met pH circa 6 en circa 4.

Eigenschap	Grond met pH = 4 vergeleken met grond met pH = 6
Dominante micro-organismen	schimmels dominant in plaats van bacteriën.
Afbraak organische stof	veel lagere activiteit.
Ademhaling	veel lagere activiteit.
Enzym-activiteit	veel lagere activiteit.
Stikstof-mineralisatie	veel lagere activiteit (en (mogelijk meer heterotroof dan autotroof).
Denitrificatie	langzamer in anaerobe gronden; meer N ₂ O en NO.
Stikstofbinding:	
a. door vlinderbloemigen	geremd.
b. andere gewassen	geremd in sommige gevallen.
c. vrijlevende microben	sommige geremd, andere resistent.
Mycorrhiza	andere soorten.

kwik, koper en cadmium, in meer oplosbare vormen worden omgezet, worden microbiële processen mogelijk geremd. Ook directe effecten van SO₂ en NO_x op micro-organismen zijn vastgesteld, waarbij mengsels synergistisch kunnen werken. In het algemeen neemt bij verzuring het aantal bacteriën af en het aantal schimmels toe.

4.2.4 Beïnvloeding van ziekteverwekkende micro-organismen

Verlaging van de pH van de bodem kan leiden tot een toename van plantenziekten; een bekend voorbeeld in de landbouw is het optreden van knolvoet. Andere ziekteverwekkers worden daarentegen juist geremd door pH verlaging. De gevolgen voor de natuurlijke vegetatie en cultuurgewassen kunnen in dit opzicht dus zowel positief als negatief zijn.

4.2.5 Beïnvloeding van de bodemfauna

Bij toenemende verzuring zullen zuurminnende bodemdieren in aantal toenemen en zuurgevoelige soorten verdwijnen. In van nature zure (podzol)gronden, waar zuurminnende soorten de functies van zuurgevoelige soorten (bijvoorbeeld regenwormen) hebben overgenomen, zullen dus nauwelijks effecten van zure depositie optreden. Problemen ontstaan echter in minder zure grond, met name voor organismen die aan de bovenste bodemlaag zijn gebonden en dus ook direct blootstaan aan de verontreinigingen in de buitenlucht. Beerdiertjes verdwijnen bijvoorbeeld bij 50-200 microgram SO_2 per m^3 . Verzuring gaat meestal gepaard met een afname van de soortenrijkdom.

De afbraak van organisch materiaal wordt geremd als de daarvoor belangrijke soorten zoals regenwormen verdwijnen. In zuurgevoelige bodems met een relatief hoog gehalte aan zware metalen kan zure depositie leiden tot verhoogde opname van deze stoffen in bodemdieren, waardoor accumulatie in de voedselketen optreedt.

4.3 Vegetatie

De inwerking van atmosferische depositie op planten verloopt langs twee wegen: de directe inwerking op de bovengrondse delen van de plant en de indirecte inwerking via de bodem. Meestal spelen beide een rol, al kan lokaal en voor bepaalde planten de ene belangrijker zijn dan de andere. Bij de directe inwerking gaat het om meerdere stoffen: de zuren H_2SO_4 en HNO_3 , en hun voorlopers SO_2 en NO_x , maar ook nog een aantal andere stoffen (zoals NH_3 , O_3 en zware metalen). De effecten die deze stoffen veroorzaken zijn vaak moeilijk van elkaar te onderscheiden en bovendien treden veelvuldig interacties (versterking of verzwakking van effecten) tussen de diverse stoffen op.

Bij chronische blootstelling treden reeds bij veel lagere concentraties effecten op dan bij kortdurende blootstelling. Dit betekent dat natuurlijke vegetaties met vele langlevende soorten, gevoeliger zijn voor lage concentra-

ties dan (eenjarige) landbouwgewassen. Bovendien zijn (altijd groene) naaldbomen gevoeliger dan loofbomen. Daarnaast echter moet worden verwacht dat natuurlijke vegetaties juist voor schoksgewijze veranderingen in deposities zeer gevoelig zijn, omdat de noodzakelijke aanpassingstijd dan ontbreekt.

4.3.1 Directe inwerking op de vegetatie

Zuur dat met regenwater, mist of dauw op planten komt, kan leiden tot beschadiging van bladeren, bloeiwijzen en vruchten. Dit komt door aantasting van de cuticula en de buitenste cellagen. Een belangrijk effect is voorts de uitspoeling uit het blad van voedingsionen, welke groter is naarmate de pH lager is en de cuticula meer is aangetast. Bij een aantal gewassen is hierdoor opbrengstverlies en kwaliteitsverlies geconstateerd.

Zwavel dioxide en andere gasvormige luchtverontreinigingen worden door de planten voornamelijk via de huidmondjes opgenomen. De hoeveelheid opgenomen stof hangt mede af van de openingstoestand van de huidmondjes. Door de plant opgenomen SO_2 wordt snel omgezet in sulfiet en daarna gedeeltelijk en langzaam in sulfaat. Sulfiet (en ook bisulfiet) zijn sterk toxisch voor planten, doordat onder andere eiwitten worden afgebroken. SO_2 tast ook de cuticula van bladeren aan en beschadigt de huidmondjes waardoor deze meer of minder geopend blijven. Als de huidmondjes meer dan gewoonlijk geopend zijn, neemt de transpiratie toe en kan de plant verdrogen. Verder tast SO_2 de celmembranen aan en kan het chlorofyl afbreken. Zichtbare effecten zijn bladverkleuring en bladsterfte. Dit leidt tot opbrengstvermindering, kwaliteitsverlies en verhoogde gevoeligheid voor ziekten en vorst. Uit onderzoek blijkt dat geen ernstige, acute effecten aan naaldbomen te verwachten zijn bij SO_2 concentraties lager dan 70 microgram per m^3 . Als algemene effectgrenswaarde voor chronische blootstelling gedurende één vegetatie seizoen wordt voor bossen op droge zandgronden 25 microgram per m^3 genomen. Voor langduriger blootstelling zijn geen grenswaarden bekend.

Stikstofoxiden kunnen een belangrijke stikstofbron voor planten zijn. In de bladeren opgenomen NO_2 wordt omgezet in nitraat en nitriet en kan op deze manier direct bijdragen aan de normale omzettingen in de plant:

nitraat $\rightarrow$ nitriet $\rightarrow$ ammoniak $\rightarrow$ aminozuren $\rightarrow$ eiwitten.

In hoge concentraties zijn de stikstofoxiden echter schadelijk waarbij wordt aangenomen dat NO_2 giftiger is dan NO . Hoge concentraties leiden tot bladbeschadiging en remmen de groei. Als effectgrens voor groeivermindering en bladbeschadiging geldt ongeveer 250 microgram NO_2/m^3 .

Ammoniak wordt in de lucht en in en op de plant omgezet in ammonium en kan dan voor de plant als stikstofbron dienen. In hoge concentraties is ammoniak schadelijk; de koolhydraatproductie vermindert en de groei wordt geremd. Ook celmembranen worden aangetast. Een ander belangrijk effect van ammoniak is de toename van de vorstgevoeligheid, hetgeen vooral bij (wintergroene) naaldbomen een rol speelt. Gevoelig voor ammoniak zijn o.a. fijnspar, corsicaanse den en douglas; minder gevoelig zijn onder andere grove den en oostenrijkse den.

Ozon is al in lage concentraties schadelijk voor planten. Het tast cuticula en celmembranen aan en reageert met aminozuren en eiwitten. De effecten zijn zichtbaar als bladverkleuring en bladsterfte. Dit leidt dan weer tot opbrengstvermindering en kwaliteitsverlies. Uit onderzoek is gebleken dat de effectgrenswaarde ligt bij circa 60 microgram per m^3 . Deze waarde wordt in Nederland regelmatig overschreden.

Kombinaties van stoffen. Uit onderzoek is gebleken dat SO_2 en NO_2 in de gangbare concentraties afzonderlijk meestal geen bladbeschadigingen veroorzaken, dat $\text{SO}_2 + \text{NO}_2$ reeds veel schadelijker is, maar dat vooral combinaties met O_3 zeer effectief zijn om beschadigingen te veroorzaken. Dit laatste kan reeds bij de huidige concentraties van genoemde stoffen optreden. Voorts is SO_2 giftiger in zuur milieu door verschuiving van het evenwicht in de reactievergelijking naar de giftige component bisulfiet. Gebleken is dat zure nevel meer schade aan bladeren en naalden

veroorzaakt, nadat deze eerst aan O_3 waren blootgesteld.

4.3.2 Indirecte inwerking op de vegetatie

De indirecte inwerking van zure atmosferische depositie op planten verloopt via de bodem waarbij de toevoer van zuur, nitraat, ammonium en sulfaat van belang is. Van de toevoer van sulfaat zijn geen negatieve effecten bekend. Bij de toevoer van stikstof (nitraat en ammonium) kan men spreken van een bemestend effect. Bij voedselarme vegetaties kan dit leiden tot verruiging en het verdwijnen van aan die milieus gebonden soorten. Door het uitspoelen van voedingsionen en de remming van de strooiselafbraak wordt de voedingsstoffenkringloop verstoord.

Verhoogde concentraties van metalen kunnen de haarwortels van de planten en de daarmee in symbiose levende mycorrhiza aantasten. Hierdoor neemt het afsterven van haarwortels toe en wordt de ontwikkeling van het wortelstelsel geremd. Verder ontstaan er ingangen voor bodemparasieten en wordt mede door de achteruitgang van mycorrhiza de opname van vocht en voedingsstoffen belemmerd. Aluminiumvergiftiging wordt wel als een belangrijke oorzaak van de bossterfte in Midden-Europa beschouwd. Deze vergiftiging is inderdaad experimenteel aangetoond. Ook in het Nederlandse bos zijn hoge concentraties van aluminium gemeten en verschijnselen van aluminiumvergiftiging geconstateerd.

Al deze processen leiden tot een vermindering van de vitaliteit van planten. Bij bomen kan de groei worden geremd en de soortensamenstelling van vegetaties kan veranderen door het verdwijnen van gevoelige soorten en een verandering in de concurrentieverhoudingen tussen planten. Met name vegetaties van voedselarme, weinig gebufferde milieus zijn hiervoor gevoelig. Zo wordt de vergrassing en verarming van de vegetaties van heidevelden, stuifzandbebossingen en ook het afnemen of zelfs het verdwijnen van korstmossen op stuifzanden, met bodemverzuring in verband gebracht. Bodemverzuring is hierbij echter niet het enige proces. Ook de verhoogde stikstoftoevoer door depositie en (bij de heidevelden) veranderd beheer spelen hierin een

rol.

Bij land- en tuinbouwgewassen speelt de indirecte inwerking vrijwel geen rol door de (verhoogde) jaarlijkse onderhoudsbekalking en bemesting van de bodem.

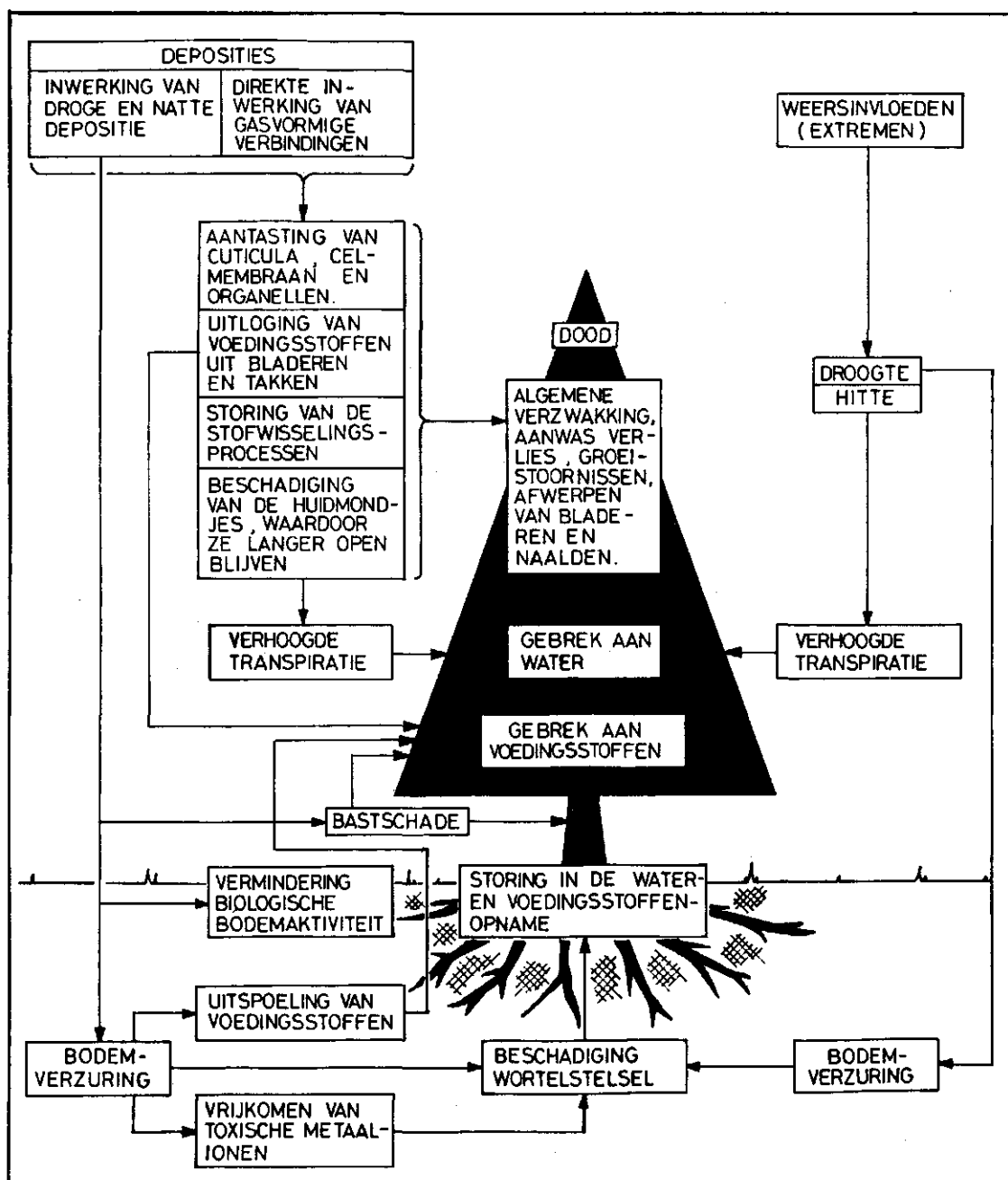
4.3.3 Interactie tussen directe en indirecte werking

Figuur 4.4 laat de mogelijke inwerkingen van zure atmosferische depositie op een boom zien. Hieruit blijkt duidelijk dat de directe en indirecte inwerking elkaar beïnvloeden. Bij de verstoring van de water- en voedingsstoffenhuishouding blijken deze elkaar te versterken, namelijk enerzijds een versterkte transpiratie en uitspoeling van voedingsstoffen uit de bladeren en anderzijds een beperkte opname van water en voedingsstoffen door beschadiging van het wortelstelsel en uitspoeling van voedingsstoffen uit de bodem.

Een belangrijk effect van de directe en indirecte inwerking is nog de algehele verzwakking van de plant, waardoor hij gevoeliger wordt voor klimatologische invloeden (zoals droogte, vorst, storm), ziekten en plagen. Met name parasieten zoals de dennescheerder, de letterzetter en de honingzwam, kunnen zich dan snel uitbreiden. Een sterke toename van de aantastingen door weersinvloeden of secundaire parasieten kan een aanwijzing zijn dat atmosferische depositie de planten heeft verzwakt.

4.4 Fauna

De "bovengrondse" dierenwereld bestaat uit een groot aantal groepen dieren, variërend van insecten tot zoogdieren, die elk hun eigen functies hebben in het ecosysteem. Tot nu toe zijn voornamelijk de effecten van zure regen op insecten bestudeerd. Insecten zijn van belang omdat ze functies vervullen bij ondermeer de bestuiving en zaadverspreiding van planten, de regulatie van aantallen plaagorganismen, de vertering van dode planten en dieren en de voedselvoorziening van hogere dieren.



Figuur 4.4. Mogelijke inwerkingen van luchtverontreiniging op een boom. (Bron: SBB).

4.4.1 Direkte inwerking op de fauna

Onderzoek betreffende de directe inwerking van zure atmosferische depositie is nog alleen in het buitenland verricht en voornamelijk gericht op effecten van SO_2 op insectensoorten. Reeds bij concentraties van minder dan 50 microgram SO_2 per m^3 worden soorten als loopkevers en mestkevers aangetast. Bij concentraties rond de 200 micro-

gram per m^3 is het verdwijnen aangetoond van verschillende mijtsoorten en lieveheersbeestjes.

4.4.2 Indirekte inwerking op de fauna

Indirekte beïnvloeding kan plaatsvinden via veranderingen in de onderlinge relaties tussen organismen en hun omgeving, bijvoorbeeld in hun voedselrelaties (kwalitatief en kwantitatief) of in hun leefomgeving. Onderzoek hieraan is weer alleen in het buitenland verricht.

De afname van het aantal stofluizen bij 150-225 microgram SO_2 per m^3 wordt verklaard door het verdwijnen van hun voedselbron, te weten korstmossen. Ook bepaalde zich met korstmossen voedende slakken kunnen sterk in aantal achteruit gaan als de boombast verzuurt tot een pH van 5 of lager. Het optreden van bladluisplassen in met SO_2 belaste gebieden wordt geweten aan het feit dat hun natuurlijke vijanden (bijvoorbeeld lieveheersbeestjes) ten gevolge van deze belasting zijn verdwenen.

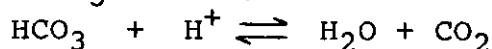
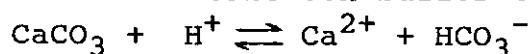
Door bodemverzuring kunnen sommige giftige stoffen (met name zware metalen) in verhoogde mate in de voedselketen terecht komen. Essentiële voedingselementen kunnen juist gaan ontbreken (deficiëntie). Of, en bij welke mate van verzuring, dit ook al tot effecten op de fauna heeft geleid, is niet bekend. Wel zijn geconstateerde tekorten van het essentiële element selenium in bijvoorbeeld elanden hieraan mogelijk toe te schrijven. Als het voedsel door zwaveldeposities meer zwavel gaat bevatten wordt de capaciteit van dieren om dergelijke essentiële stoffen op te nemen bovendien nog geremd.

4.5 Oppervlaktewater

De toevoer van zure en potentieel zure verbindingen naar het oppervlaktewater kan langs verschillende wegen plaatsvinden. Allereerst vindt er directe natte en droge depositie vanuit de atmosfeer plaats. Een tweede weg is het afstromen van water over de bodem. Een derde weg is die via het grondwater. Daarnaast kunnen bepaalde organismen

en processen in het water ook zuur produceren of juist consumeren.

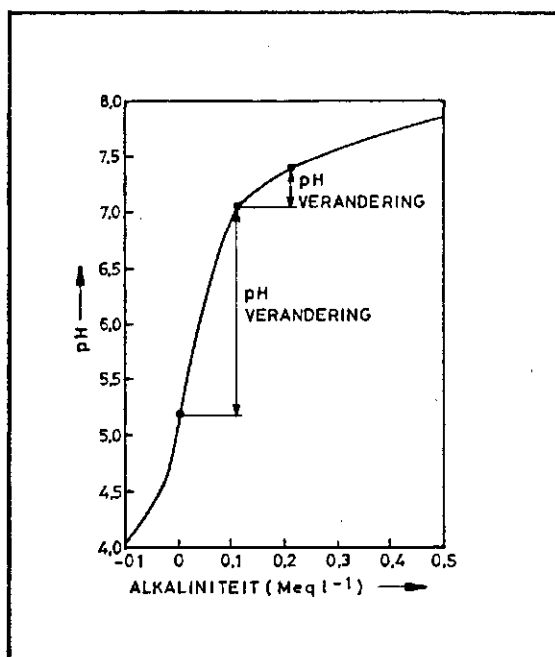
Het effect van de toevoer van zure en potentieel zure verbindingen op de kwaliteit van het oppervlaktewater is zeer sterk afhankelijk van lokale omstandigheden. Bij aanwezigheid van kalk in het bodemsediment of in de bodem die in contact staat met het water, vormt het kalkkoolzuur-evenwicht een buffer tegen verlaging van de pH:



Bij toevoeging van H^+ ionen verschuiven deze evenwichten naar rechts. CaCO_3 gaat in oplossing en H^+ wordt gebonden. Dit kan voortgaan zolang CaCO_3 - of HCO_3^- -ionen beschikbaar zijn. De concentratie H^+ -ionen in de oplossing (en dus de pH) verandert dan vrijwel niet. De relatie tussen de buffercapaciteit (ook wel alkaliniteit genoemd) en pH is weergegeven in figuur 4.5.

Op basis van de cijfers voor depositie kan voor ondiepe wateren zoals vennen een jaarlijkse bruto toevoer van 0,3-0,6 meq/l worden berekend. In voedselrijk water, zoals de meeste stromende en grotere stilstaande wateren, zijn natuurlijke processen veelal in staat dit te compenseren. In de voedselarme, van oorsprong zwak gebufferde vennen en andere kleine stilstaande wateren is deze compensatie niet volledig en leidt dit zeker tot een afname

van de buffercapaciteit en binnen een afzienbare tijd tot daling van de pH. Bij pH-waarden lager dan 4 à 4,5 gaan andere buffermechanismen een steeds belangrijker rol spelen. Dit zijn in hoofdzaak dezelfde verwerings en kationen



Figuur 4.5. Relatie tussen alkaliniteit en pH.

omwisselingsprocessen als bij de bodem zijn beschreven. Vooral de mobilisatie van metalen uit sediment en bodemmateriaal wordt dan belangrijk. In een aantal gevallen wordt verhoging van de hardheid van het water geconstateerd. De oplossing van kalk uit de bodem (in duingebieden), of de uitspoeling van kalk uit landbouwgebieden (in veengebieden) wordt verondersteld hiervan de oorzaak te zijn. Vooral in het laatste geval wordt het zuurbufferend vermogen verhoogd, samengaand met eutrofiëring.

Doorgaans is in het water niet de directe werking van de H^+ -ionen schadelijk voor planten en dieren. De effecten worden vooral veroorzaakt door veranderingen in de koolzuurhuishouding, ionenevenwichten en de toxische werking van zware metalen die bij lagere pH in verhoogde mate vrijkomen. Ook in de meest zure wateren komen organismen voor. Diverse soorten bacteriën, schimmels, wieren, mosseltjes en insecten komen voor in al lange tijd extreem zure wateren. Voor alle groepen organismen geldt dat de soortenrijkdom afneemt naarmate het water zuurder wordt en dat verschuivingen in de soortensamenstelling optreden.

Eén van de geconstateerde effecten van verzuring is vermindering van de afbraak van organisch materiaal. Hierdoor worden voedselkringlopen verstoord. In alle gevallen is een toename van schimmels geconstateerd en een verandering in de soortensamenstelling van bacteriën en een verminderde activiteit ervan. Dit kan resulteren in een toename van de hoeveelheid bodemslib. In verzuurde vennen met kleurloos water (weinig humus) nemen met name de vastzittende, vaak draadvormige algen toe bij verzuring. In humeuze wateren daalt de pH niet of nauwelijks en wordt ook geen daling van soortenrijkdom geconstateerd. Van de hogere waterplanten verdwijnen de waardevol geachte oeverkruid vegetaties bij een pH lager dan 4 en worden deels vervangen door *Sphagnum* (veenmos) of *Juncus bulbosus* (knolrus).

Wat de microfauna betreft zijn enkele soorten raderdier-tjes en zoöplankton vaak overheersend in verzuurde wateren. Bij hogere dieren treden verlaging van de soortenrijkdom en wijziging van soortensamenstelling op bij een

pH lager dan 5. Slakken verdwijnen al bij een pH lager dan 6 en daarmee ook de bloedzuigers, die vaak van slakken leven. Hetzelfde geldt voor de grotere kreeftachtigen en de meeste steenvliegsoorten. Diverse insectenlarven nemen in aantal toe, al is ook binnen de groep insecten een verschuiving in soortensamenstelling geconstateerd.

Dieren die in de bodem leven komen met een minder lage pH in aanraking dan vrijzwemmende dieren, waarschijnlijk door de grotere buffering in de bodem. De eieren en de poppen van verschillende dieren zijn de stadia die het meest gevoelig zijn. Voor de amfibieën is een pH van circa 4 meestal dodelijk. Bij een pH van 6 treden al effecten op. Met name de voortplanting lijkt bij hogere pH te moeten plaatsvinden. Gebleken is dat eimassa's van kikkers in toenemende mate geïnfecteerd raken door schimmels als de pH daalt van 5 tot 3,5. Verzuring, vooral beneden een pH van 5, veroorzaakt het verdwijnen van vispopulaties. Als eerste wordt de voortplanting geremd of zelfs verhinderd. Toxische invloed van aluminium, koper en zink is geconstateerd in verschillende mate bij verschillende pH-trajecten. Verhoogde kwikgehalten zijn geconstateerd in vissen zonder overigens lethale effecten te veroorzaken. De fysiologische functies van dieren die door verzuring worden beïnvloed zijn vooral: de natriumregulatie, de calciumregulatie, de ademhaling en de zuur-base balans.

Voor vogels en zoogdieren die sterk aan aquatische systemen zijn gebonden zullen de hiervoor genoemde veranderingen in biotopen zeker effecten geven. Ook de accumulatie van metalen in voedselketens zal voor bijvoorbeeld vis-etende vogels en otters een indirect effect geven.

Concluderend kan worden gesteld dat verzuring en daarmee samenhangende mobilisatie van metalen zowel direct als indirect invloed heeft op alle schakels in aquatische ecosystemen.

4.6 Conclusies

Ook van nature ontstaat in de bodem een zuuroverschot.

Verwerking van kalk- en kleimineralen en groei- en afbraakprocessen in de bodem en in het water zorgen voor het in zekere mate bufferen van het milieu tegen dit zuuroverschot.

In de gebieden die in figuur 4.2 staan aangegeven is de beschikbare buffercapaciteit gering of wordt de buffering slechts langzaam gerealiseerd. De als gevolg van door menselijke activiteiten tot meer dan het 5-voudige vergrote toevoer van zuur tast de buffers versterkt aan. In zwak gebufferde stilstaande oppervlaktewateren zoals venen leidt dit al snel tot uitputting van de buffer, waarna daling van de pH optreedt. In zwak gebufferde bodems spelen meer buffermechanismen een rol bij verschillende pH trajecten. Naar beneden gaand in het bodemprofiel kunnen daardoor meerdere pH-fronten worden geconstateerd, die dieper doordringen naarmate meer bodem "uitgeput" raakt. Deze doordringing van zuur kan het grondwater bereiken en ook dit verzuren als in de watervoerende pakketten geen kalk of veenlagen voorkomen. De gebieden die hiervoor kwetsbaar zijn, staan in figuur 4.3 aangegeven.

In cultuurgebieden speelt naast de natuurlijke processen vooral ook de onderhoudsbekalking een rol. Hiermee wordt voorzien in een voldoende buffer om pH daling te voorkomen.

Door de versnelde verwerking spoelen allerlei stoffen versneld uit naar het grond- en oppervlaktewater. Verhoging van de hardheid en soms ook verhoging van de voedselrijkdom van water is in die gevallen een van de afgeleide gevolgen van bodemverzuring.

Ook de planten- en dierenwereld wordt door de verhoogde zuurtoevoer beïnvloed. In gebieden waar nog voldoende buffering aanwezig is om pH verlaging tegen te gaan, zijn vrijwel uitsluitend directe effecten van zure depositie op planten en dieren te verwachten. Vooral korstmossen, sommige paddestoelsoorten, een aantal hogere wilde plantensoorten, sommige insektensoorten en diverse cultuurgewassen en bomen (met name naaldbomen) zijn hiervoor gevoelig.

In gebieden waar de bodem onvoldoende buffering heeft, worden de directe effecten nog versterkt door indirecte via veranderingen in de bodem. Verlaging van de pH beïnvloedt allerlei bodemorganismen waardoor afbraakprocessen worden geremd. Bacteriën worden verdrongen door schimmels, regenwormen verdwijnen, voor de stofwisselingsprocessen rond plantenwortels noodzakelijke schimmels worden aangetast, haarwortels van planten worden aangetast, etc. Bomen en planten worden hierdoor minder vitaal, waardoor ze meer vatbaar zijn voor andere invloeden zoals de directe inwerking van luchtverontreiniging, storm en ziekten. De oppervlaktewateren in deze gebieden verzuren, tenzij ze langs andere wegen bufferstof toegevoerd gekregen hebben (recreatie, rivierwatertoevoer).

Bij sterke verlaging van de pH kunnen aluminium en diverse zware metalen in oplossing gaan vanuit het bodemmateriaal. In die vorm zijn metalen vaak toxisch voor planten en dieren. De effecten daarvan versterken nog de hiervoor reeds genoemde.

Verdwijnen van natuurlijke buffers is in veel gevallen een onomkeerbaar proces. De versneld optredende verwerking kan niet ongedaan worden gemaakt. Uitgespoelde essentiële voedingsstoffen kunnen moeilijk of niet weer in natuurgebieden worden toegevoerd. In Nederland uitgestorven vegetaties en dieren kunnen veelal niet terugkeren. Doch ook minder ernstig lijkende verschijnselen zijn signalen van het feit dat de natuur niet in staat is om het tempo van de extra zuurdepositie bij te houden en dat er sprake is van een sluipende aantasting van het ecosysteem.

5. HUIDIGE OPTREDENDE EFFECTEN

5.1 Bodem

5.1.1 Cultuurgronden

Op cultuurgronden vindt jaarlijks bekalking en bemesting plaats. Daarmee wordt onder andere voorkomen dat de bodem verzuurt. Reeds in de bovenste centimeters van de bouwvoor wordt de zure depositie meestal volledig gebufferd. De verhoging van de kalkgift die nodig is om de verzuring tengevolge van atmosferische depositie te neutraliseren wordt voor verschillende gronden in tabel 5.1 weergegeven.

Tabel 5.1. Verhoging van de kalkgift op cultuurgronden als gevolg van zure regen.

Type grond	Verhoging als % van de totale gift	Totale kalkgift in kg CaO per ha per jaar
Kalkrijke kleigronden	5-10	840-1225
Kalkloze kleigronden	9-17	440- 725
Veengronden	8-27	515- 600
Dalgronden	12-29	350- 435
Zandgronden	18-39	240- 325

In hoeveelheden kalk (CaO) uitgedrukt betekent dit dat per jaar 40 à 125 kg meer onderhoudsbekalking per ha nodig is om de zure depositie te neutraliseren. In geld uitgedrukt is dit globaal 15 tot 50 miljoen gulden per jaar. Omdat op deze wijze wordt voorkomen dat de pH daalt, zijn effecten op het bodemleven in deze gebieden dan ook niet te verwachten.

5.1.2 Natuurgebieden

Een groot deel van de Nederlandse natuurgebieden is gele-

gen op zandgronden. Voor bosgronden is betrekkelijk veel informatie beschikbaar over depositie en verzuring. Voor bijvoorbeeld de heidegebieden aanmerkelijk minder.

Uit berekeningen volgt dat bij het huidige niveau van de depositie de netto zuurbelasting van de bodem onder bossen 3 à 6 kmol per ha per jaar bedraagt. Op grond van berekeningen met transportmodellen kan bij deze netto zuurbelasting worden aangegeven met welke snelheid verzuring van de bodem tot een pH-KCl van 3 à 4 plaatsvindt. Dit is uitgevoerd voor een beperkt aantal bodemprofielen met een dikte van 1 meter; de meeste planten wortelen tot maximaal deze diepte. Aangezien de mate waarin de verwerking van kleimineralen bijdraagt aan de buffering nog onzeker is, ontstaan er ruime marges in de gevonden resultaten. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de verzuringstijden, terwijl de ligging van de bodemtypen is aangegeven in figuur 4.2.

Tabel 5.2. Verzuringstijden voor 1 meter bodemprofiel.

Bodemtype	Tijd in jaren
Duinvaaggrond	5 - 25
Podzolgrond	40 - 280
Beekeerdgrond	45 - 600

De extra zuurbelasting duurt al tientallen jaren. Er kan dan ook worden verwacht dat vrijwel alle duinvaaggronden al over de volledige wortelzone zijn verzuurd of dit binnen afzienbare tijd zullen zijn. Voor de podzolgronden en beekeerdgronden kan dit langer duren. Verzuring over enkele centimeters tot decimeters kan al schade veroorzaken aan ondiep wortelende planten (onder andere pioniervegetaties).

Metingen in enkele gebieden bevestigen het feit van verzuring van bosgronden. Op grond van berekeningen mag worden verwacht dat bij de huidige niveau's van depositie, in bosgebieden uiteindelijk een pH van lager dan 4 zal voor-

komen. In enkele gebieden is dit reeds waargenomen. Een indicatie van wat dit voor het bodemleven inhoudt is in tabel 4.1 gegeven.

5.1.3 Grondwater

Verzuring van grondwater kan pas optreden als de buffer in de onverzadigde zone onvoldoende is geworden om de zuur-input te neutraliseren. De meest kwetsbare situaties voor verzuring van grondwater zijn de gebieden waar afdekkende, slecht doorlatende klei- en veenlagen ontbreken en waar het freatische pakket tot op grote diepte kalkloos en zuurstofhoudend is (zie figuur 4.3).

In de kalkloze en kalkarme natuurgebieden wordt momenteel al op enkele plaatsen een zuurgraad van 3,2 tot 5 gemeten op een diepte van 10 meter en meer. Deze lage pH waarden gaan gepaard met hoge sulfaat- en nitraatgehalten die alleen te wijten kunnen zijn aan depositie vanuit de atmosfeer. Bij onderzoek naar het ondiepe grondwater onder natuurgebieden bij Leusden zijn de eigenschappen van het ondiepe grondwater gemeten zoals die in tabel 5.3 zijn weergegeven.

Tabel 5.3. Kwaliteit ondiep grondwater bij Leusden.

Eigenschap	Onder bos	Onder heide
pH	3,4 - 4,2	5,2 - 6,5
NO ₃ ⁻ (mgN/l)	16 - 43	0,2 - 0,5
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	200 - 562	25 - 37

De verschillen die hieruit blijken tussen grondwater onder heide en bosgebieden kunnen slechts worden verklaard als wordt aangenomen dat zowel de depositie als de processen in de bodem duidelijk verschillend zijn.

Behalve de reeds aangegeven nitraten en sulfaten, spoelen diverse andere stoffen uit naar het grondwater. Bij pH waarden lager dan 3,5 zijn dit ook aluminium en andere

metalen. Als deze uitspoeling in het diepere grondwater dezelfde concentraties geeft als thans al regelmatig in ondiep grondwater worden geconstateerd, dan zal dit ernstige schade aan de drinkwatervoorziening geven. In enkele pompputten van pompstations die ondiep freatisch water winnen in natuurgebieden zijn al verhoogde concentraties nitraat en sulfaat geconstateerd, die naar alle waarschijnlijkheid aan zure regen zijn te wijten.

5.2 Vegetatie

Bij cultuurgewassen komen incidenteel en lokaal acute bladbeschadigingen voor als gevolg van hoge concentraties van luchtverontreinigingscomponenten. Zo zijn gevallen bekend van effecten op groenten en bloemgewassen door mengsels van luchtverontreinigingscomponenten. De geclaimde schaden variëren van enkele tonnen tot een miljoen gulden per geval. Ook zijn effecten van NH_3 op naaldbomen en van O_3 , al of niet in combinatie met SO_2 en/of NO_2 waargenomen. Maar veel belangrijker zijn waarschijnlijk de onzichtbare effecten van chronische blootstelling aan combinaties van stoffen die elk in lage concentraties voorkomen. Bij proeven met gewassen in kasjes met gefilterde en niet-gefilterde lucht bleek een aantal gewassen tot 40% minder te produceren in de kasjes met de niet-gefilterde lucht. In veldbegassing is geconstateerd dat ook gras minder eiwitten bevat en de verteerbare fractie kleiner is. Regenwater met een pH van 4,1 geeft een reductie in opbrengst van circa 10% bij sojabonen ten opzichte van regenwater met een pH van 5,6. Bij radijs en een pH van 4,6 wordt een reductie van circa 15% gevonden.

In de buitenlucht wordt de opbrengst-reductie als gevolg van luchtverontreiniging door het Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek op circa 10% geschat voor gevoelige gewassen. De gemiddelde opbrengstvermindering van alle in Nederland verbouwde gewassen zal dus vrijwel zeker lager zijn. Gebaseerd op gelijkblijvende marktprijzen kan dit een schade van tientallen tot honderden miljoenen guldens per jaar betekenen.

Bij onderzoek in zuidoost en zuidwest Brabant bleken in de naalden van grove den en corsicaanse den aanzienlijk hogere zwavelgehaltes voor te komen dan als normaal wordt beschouwd (circa 0,20% in plaats van normaal circa 0,12% S). Bij de corsicaanse den werd bovendien magnesiumgebrek geconstateerd. Dit zijn typische effecten van zure depositie. In Drente is een sterke achteruitgang van de mycorrhiza bij zomereik, grove den, fijnspar, douglas en japanse larix geconstateerd, wellicht mede als gevolg van aluminiumvergiftiging, en tegelijkertijd een toename van schimmelparasieten. Dit hangt waarschijnlijk met verzuring van de bodem en verzwakking van de bomen samen.

Uit het vitaliteitsonderzoek van Staatsbosbeheer van 1983 komt naar voren dat de vitaliteit van het Nederlandse bos in grote delen van het land aanzienlijk geringer is dan op grond van normale, bosbouwkundige en natuurlijke oorzaken (zoals verkeerd beheer, ziekten, plagen) kan worden verklaard. Er zijn indicaties dat hier sprake is van een proces van achteruitgang. Deze achteruitgang in vitaliteit hangt zeer waarschijnlijk met zure atmosferische depositie samen. Veel naaldbomen hebben een geringe hemelafdekking, een slechtere kleur van de naaldmassa en een geringere naaldzetting (minder tweejarige of oudere naalden) dan hun vitale soortgenoten. Deze kenmerken worden ook in West-Duitsland met zure regen in verband gebracht. Ernstige schadegevallen zoals deze in Duitsland optreden, zijn in Nederland nauwelijks waargenomen. De toestand van het Nederlandse bos wordt door Staatsbosbeheer echter zorgwekkend genoemd.

Bij andere vegetaties valt vooral de sterke achteruitgang van de epifyten op, welke met SO_2 concentraties is gecorreleerd. Zo verdween uit de omgeving van 's-Hertogenbosch sinds 1900 ruim de helft van de daar voorkomende epifytensoorten. Verder zijn er aanwijzingen dat de achteruitgang van de korstmosvegetaties op stuifzand (zowel in soortenrijkdom als in vitaliteit) en van een aantal groepen paddestoelen, met name cantharellen en stekelzwammen, met verzuring te maken heeft. En tenslotte wordt ook de vergrassing van heidevelden en stuifzandbebossingen met at-

mosferische depositie in verband gebracht. Waarschijnlijk speelt hier de bemestende werking van stikstofverbindingen ook een rol. De invloed van veranderd beheer en natuurlijke successie kan echter nog niet worden uitgesloten.

5.3 Fauna

Veldonderzoek naar beïnvloeding door zure regen van dieren is in Nederland niet verricht. Weliswaar is de rijkdom van de Nederlandse fauna de laatste decennia sterk achteruitgegaan, doch daarvoor zijn verschillende oorzaken aan te wijzen. Aangezien uit correlatief onderzoek in het buitenland blijkt dat reeds bij in Nederland voorkomende concentraties van SO_2 insektensoorten werden aangetast, mag men zeker voor deze diergroep verwachten dat zure regen een belangrijke oorzaak is. Of bijvoorbeeld sommige ziekten en plagen bij planten vaker optreden ten gevolge van veranderingen in insektenpopulaties of verzwakking van de planten door zure regen is onbekend, maar in een aantal gevallen wel aannemelijk (bijvoorbeeld in Duitsland toename van de letterzetter bij verzwakte fijnsparren).

5.4 Oppervlaktewater

De kleine, stilstaande oppervlaktewateren in de in figuur 4.2 aangegeven gebieden zijn gevoelig voor verzuring. Uit onderzoek naar meer dan 100 kleinere wateren in deze gebieden (hoofdzakelijk vennen) kan het volgende worden afgeleid:

- Van alle stilstaande wateren met oorspronkelijk een gering bufferend vermogen is circa $3/4$ verzuurd; circa $1/4$ is vrij sterk verontreinigd. In het laatste geval is kunstmatig een extra buffer gevormd tegen verzuring. Oorspronkelijk waren in deze gebieden vele honderden vennen zwak gebufferd. Momenteel zijn dit er nog slechts enkele tientallen.
- Wateren met een humeus karakter, zoals in hoogveengebieden, in Drente en hier en daar in Noord-Brabant, hadden vanouds een pH van 4 à 6. Deze is enigszins gedaald, maar deze wateren bezitten nog enig bufferend vermogen. Het betreft hier enkele duizenden, veelal kleine wateren

(vennen, sloten, plassen).

- In de duingebieden waar de bodem enige kalk bevat, treedt verhoging van de hardheid van het water op. Dit betreft enkele tientallen wateren.
- Verzuring van water gaat gepaard met sterke verhoging van onder andere het ammonium-, het aluminium- en soms het sulfaatgehalte.
- Na verzuring van het water treedt verzuring van de onderwaterbodem op; dit proces is langduriger.
- Plaatselijke verschillen in uitgangssituatie, waterhuishouding en landgebruik geven grote verschillen in effecten.

Opgemerkt wordt dat vergelijking met historische situaties bijzonder moeilijk is. Vrijwel alle oude pH metingen zijn niet rechtstreeks bruikbaar en bovendien is het tijdstip en de plaats van de metingen onvoldoende beschreven. Het is daarom niet altijd met zekerheid te zeggen wanneer de geconstateerde effecten ontstaan zijn.

De effecten op flora en fauna, zoals de in hoofdstuk 4 beschreven, zijn geconstateerd in vrijwel alle vennen in de in figuur 4.2 aangegeven gebieden. In het algemeen betekent dit een sterke vermindering van het oorspronkelijk aantal soorten, waarbij in het oog lopende groepen als hogere waterplanten en vissen geheel zijn verdwenen. Daarnaast is een verschuiving opgetreden naar een beperkt aantal zuurtolerante organismen. Dit betekent vanuit natuurwetenschappelijk oogpunt een grote verarming in wateren die juist om de grote ecologische waarde bijzondere bescherming genieten. Oeverkruid (Litterellion) vegetaties met o.a. waterlobelia, zijn bijvoorbeeld vrijwel verdwenen uit Nederland. De heikikker en de grote modderkruiper worden sterk bedreigd. Het wegvallen van schakels in voedselketens en het verlies van biotopen, mede veroorzaakt door zure regen, is wellicht één van de redenen voor de achteruitgang van enkele hogere diersoorten, zoals watervogels. De verzuurde of met verzuring bedreigde wateren hebben, naast de betekenis voor natuurbehoud, een recreatieve functie. Ook deze is in de betreffende gebieden aangetast.

5.5 Conclusies

Duidelijk verzuurde situaties, waarvoor depositie vanuit de atmosfeer de enige verklaring vormt, zijn aanwezig in de vele vennen in de gebieden met kalkarme tot kalkloze zandgronden (zie figuur 4.2). Waardevolle vegetaties en diersoorten zijn uit deze wateren grotendeels verdwenen.

Uit schattingen voor een beperkt aantal monsters van kalkloze zandgronden onder bosbestanden valt af te leiden dat het verzuringsproces voortschrijdt met een snelheid van 1 meter per 5 à 25 jaar voor duinvaaggronden, 40 à 280 jaar voor podzolgronden en 45 à 600 jaar voor beekkeerdgronden. Dit proces is reeds tientallen jaren geleden gestart met een sterke toename van de zure depositie. Er kan dan ook worden verwacht dat veel van de natuurgebieden op duinvaaggronden binnen afzienbare tijd een zure bodem zullen hebben over de volledige wortelzone of dit reeds hebben. Voor de podzolbodems kan deze periode veel langer zijn. Metingen in het grondwater onder enkele natuurgebieden geven aan dat dit soms tot op meer dan tien meter inmiddels is verzuurd. Dit geeft aan dat de snelheid van verzuring wellicht in een aantal gebieden groter is dan de schattingen aangeven.

Veranderingen in de zuurgraad ook van slechts de bovenste centimeters of decimeters van een bodemprofiel kan reeds aanmerkelijke invloed hebben op het bodemleven en de vegetatie. Voor het bodemleven bestaat het vermoeden dat de geconstateerde afname van de bacterie-activiteit en toename van met name parasitaire schimmels, zure regen als oorzaak hebben. Ook de afname van het aantal regenwormen wordt mede hieraan geweten. In het algemeen betekent dit een verslechtering van de levensomstandigheden van bomen en planten. Geconstateerd is dat de bossen aanzienlijk minder vitaal zijn dan op grond van andere omgevingsfactoren mag worden verwacht. De toestand van de bossen wordt door Staatsbosbeheer als zorgwekkend omschreven. Daardoor is niet alleen het door het bos vertegenwoordigde kapitaal aangetast, maar ook de natuurwetenschappelijke waarde en de belevingswaarde zijn verminderd.

Voor de effecten op planten en dieren kan in het algemeen worden gesteld dat achteruitgang van de soortenrijkdom en met name van enkele waardevolle, zuurgevoelige soorten is gecorreleerd aan de zure regen.

In cultuurgebieden treedt geen verzuring van de bodem op, maar wel een verhoogde uitspoeling van verscheidene stoffen naar het grond- of oppervlaktewater. Een verhoogde bekalking zorgt ervoor dat de vergrote zuurbelasting door zure regen wordt gebufferd. De kosten hiervoor bedragen enkele tientallen miljoenen guldens per jaar voor geheel Nederland. Cultuurgewassen worden wel rechtstreeks door luchtverontreiniging aangetast. Het opbrengstverlies dat hierdoor optreedt is vrijwel zeker minder dan 10%. Gebaseerd op gelijkblijvende marktprijzen kan dit een waarde van tientallen tot honderden miljoenen guldens per jaar vertegenwoordigen.

Belangrijker dan de direct in geld te waarderen schade is het verlies van waardevol geachte ecosystemen. Hieronder vallen onder andere de vennen, bossen en heidevegetaties, en de verdere aantasting van bodemfuncties zoals de waterwinningsfunctie en de algemene ecologische functie van de bodem. De ontwikkelingen zijn zodanig dat de doelstelling van het huidige beleid voor natuurbescherming, bodembescherming, drinkwatervoorziening en houtproductie geweld wordt aangedaan.

6. TE VERWACHTEN EFFECTEN BIJ VERSCHILLENDE TOEKOMSTBEELDEN VOOR DEPOSITIES

6.1 Effecten bij voortzetting van het huidige depositieniveau

Bij handhaving van het huidige depositieniveau zal de uitputting van het bufferend vermogen van water en bodem met de geschetste snelheid voortgaan. Dit zal leiden tot effecten op alle onderdelen van de beschouwde ecosystemen.

6.1.1 Bodem

Voor het a-biotische deel van de bodem betekent dit dat de huidige processen zich zullen voortzetten. Op cultuurgronden komt dit neer op een blijvende extra bekalking van 40-125 kg CaO per ha per jaar. De kosten hiervan bedragen enkele tientallen miljoenen guldens per jaar. In natuurgebieden, met name op de kalkloze gronden met een laag gehalte aan organische stof, is op betrekkelijk korte termijn een daling van de pH te verwachten tot 3,5 à 4. De versnelde uitputting van de buffers is in vele gevallen niet herstelbaar. In gebieden waar het grondwater kwetsbaar is voor verzuring zal op langere termijn ook het grondwater een vergelijkbare zuurgraad krijgen. In totaal liggen circa 60 pompstations voor grondwaterwinning in het betreffende gebied, waarvan ongeveer de helft in gronden die tot 30 à 60 meter kwetsbaar zijn. De winningen zijn hierbij uit het kwetsbare pakket. De huidige capaciteit van deze pompstations is circa 200 miljoen m³ per jaar. Dit is circa 30% van de totale grondwaterwinning voor de drinkwatervoorziening en ongeveer 20% van de totale drinkwatervoorziening. De grondwaterwinningen in deze gebieden zullen soms naar diepere lagen kunnen worden verplaatst; in andere gevallen moeten òf de zuiveringen worden aangepast, òf de winplaatsen moeten worden verlaten. In elk geval betekent dit naast kwaliteitsverlies voor de drinkwatervoorziening extra kosten die op langere termijn in de orde van enkele tientallen miljoenen guldens per jaar zullen belopen.

Een pH-daling zoals hierboven is weergegeven zal in de

daarvoor gevoelige gebieden voor het bodemleven leiden tot een voortschrijdend optreden van de in hoofdstuk 4 genoemde effecten. Vanwege de essentiële rol die bodembioologische processen spelen in de voedselkringloop heeft dit de achteruitgang of zelfs het verdwijnen van planten- en diersoorten ten gevolge. In het algemeen zal de nivellering van de natuurlijke variatie zich in versneld tempo verder voortzetten, waardoor de natuurwetenschappelijke en rekreatieve waarde van natuurgebieden versneld afneemt.

6.1.2 Vegetatie

Bij land- en tuinbouwgewassen is er alleen sprake van directe effecten. De opbrengstvermindering zal dan ook op het huidige niveau blijven, hetgeen een waarde van enkele tientallen tot honderden miljoenen guldens per jaar vertegenwoordigt bij de huidige marktprijzen. In natuurgebieden spelen ook de toenemende blootstellingsduur en indirecte effecten een belangrijke rol. Het risico bestaat dat op vrij korte termijn (enkele tientallen jaren) de bossen op de meest gevoelige gronden (zie figuur 4.2) plaatsmaken voor soortenarme, zuurresistente vegetaties. Naast een jaarlijkse opbrengstvermindering van hout van enkele tientallen miljoenen guldens per jaar, vindt hierdoor een aantasting van een in de loop van vele decennia opgebouwd kapitaal ter waarde van vele miljarden guldens plaats. Ook voor andere natuurgebieden moet een voortschrijdende achteruitgang in de rijkdom van de plantenwereld verwacht worden. Het regeringsbeleid betreffende natuurbehoud, milieubeheer, recreatie en houtproductie zal hierdoor zeker niet gerealiseerd kunnen worden.

6.1.3 Fauna

Bij een voortzetting van de huidige depositie zullen insectensoorten verder in aantal achteruitgaan ten gevolge van directe effecten. Het verdwijnen van insectensoorten kan leiden tot effecten op de vegetatie (afname van bestuiving, toename van ziekten en plagen). Hoe de indirecte effecten zich zullen ontwikkelen is niet voorspelbaar. De risico's ten gevolge van accumulatie van zware metalen

zijn het grootst voor dieren aan het eind van de diverse voedselketens, zoals das, vos, egel, steenuil en andere roofvogels. Kwantificering hiervan is nog niet mogelijk. Het accepteren van een verhoogd risico van het verdwijnen van beschermde diersoorten is strijdig met het huidige overheidsbeleid.

6.1.4 Oppervlaktewater

De degeneratie van verzuurde wateren zal zich voortzetten. Er zullen nog maar enkele plantensoorten voorkomen en naast draadwiermatten zal zich een laag onverteerd plantenmateriaal vormen. Ook de fauna neemt in soortenrijkdom verder af; de nog aanwezige differentiatie in zure wateren zal verdwijnen. Dit betreft de honderden niet-geëutrofeerde vennen en andere kleinere wateren in het gebied dat in figuur 4.2 is aangegeven. Van de humeuze wateren zal naar verwachting ook een deel verzuren. Op welke termijn is nog niet aan te geven. Een aantal van deze effecten is onomkeerbaar.

6.2 Effecten bij verlaging van de depositie

In het IMP-Lucht 1984-1988 is aangegeven dat gestreefd wordt naar het verlagen van de totale emissie van verzurende stoffen in Europa tot $1/3$ à $1/4$ van de huidige waarde. Dit zou globaal een vermindering van de zure depositie in Nederland met 50 à 60% betekenen. Ook in het voorlopig IMP-Bodem 1984-1988 wordt de noodzaak voor vermindering van de zure depositie onderstreept. In enkele basisrapporten is getracht een raming van effecten te geven bij halvering van het huidige depositieniveau. Tevens zijn zo mogelijk depositieniveaus aangegeven waarbij (vrijwel) geen effecten worden verwacht. Daarbij dient te worden bedacht dat de natuurlijke depositie van de beschouwde zure en verzurende stoffen minder dan 20% is van het huidige niveau.

6.2.1 Bodem

In bodems onder veel natuurgebieden heeft reeds gedurende

lange tijd een versnelde afbraak van de buffercapaciteit plaatsgevonden. Verlaging van de zure depositie betekent een vermindering van de snelheid van verwerking, min of meer evenredig met de netto zuurbelasting. Onder bosgronden is deze van nature 0,5 à 1 kmol per ha per jaar (ook van nature dus enige verzuring), waarvoor de verwerking van mineralen en humus in veel gevallen gedurende zeer lange tijd voldoende buffering geeft tegen verlaging van de pH-KCl beneden circa 5. Bij halvering van depositie zal de netto zuurbelasting veelal 2 à 3 kmol per ha per jaar bedragen. Hierdoor zullen veel bosbodems nog steeds versneld verzuren. De pH-KCl zal ook dan verder dalen tot circa 3, waarbij het aluminiumbuffer werkzaam wordt. Het aluminium gaat in oplossing met de in de voorgaande hoofdstukken geschetste gevolgen.

Voor andere natuurgebieden zoals bijvoorbeeld heidevelden bestaan aanwijzingen dat de depositie en de biochemische processen afwijken van die bij bossen. Halvering van de depositie zou kunnen inhouden dat de netto zuurbelasting hier tot vrijwel nul wordt teruggebracht. De beschikbare kennis laat echter niet toe om te schatten bij welk depositieniveau geen extra verwerking meer optreedt.

Op cultuurgronden is de vergroting van de kalkgift ongeveer evenredig met de zuurtoevoer vanuit de atmosfeer. De kosten zullen min of meer evenredig met de verlaging van de depositie dalen.

De effecten op het bodemleven worden sterk bepaald door de pH van het bodemvocht en de concentraties van metalen in de oplossing, met name aluminium. In bosbodems die bij halvering van de depositie nog verzuren zal ook het bodemleven verder worden aangetast. Bij verlaging van de depositie tot ongeveer het natuurlijke niveau is geen blijvend effect te verwachten op het bodemleven. Effecten in andere gebieden dan bossen zullen waarschijnlijk al beperkt blijven op een hoger niveau van depositie dan het natuurlijke.

Bij verlaging van de depositie zal het grondwater ook in de meest kwetsbare gebieden minder snel verzuren. Voor een

belangrijk aantal pompstations, in gebieden waar de buffersnelheid en -capaciteit voor verwerking van mineralen en humus niet wordt overschreden, mag worden verwacht dat geen verlaging van de pH meer zal optreden. Bij sterke vermindering kan zelfs enige verhoging van de pH in het ondiepe grondwater optreden, maar de buffercapaciteit is niet te herstellen. Het uitspoelen van kalk, metaalionen, sulfaat en nitraat naar het grondwater zal blijven plaatsvinden ongeveer naar evenredigheid van de depositie. Uitspoeling van metalen zoals aluminium treedt echter alleen op als de pH-KCl in de bodem tot circa 3 daalt.

6.2.2 Vegetatie

Directe effecten op planten (zowel acuut als chronisch) worden merkbaar vanaf het depositieniveau waarop geen effect optreedt. Het geen-effect-niveau is per plantesoort echter sterk verschillend. Informatie hierover is slechts beperkt beschikbaar. Bij halvering van de depositie wordt verwacht dat gemiddeld minder dan 5% produktieschade bij de Nederlandse cultuurgewassen optreedt. Voor natuurlijke vegetaties kan worden verwacht dat diverse soorten die thans sterk worden bedreigd, bij halvering van de depositie zullen herstellen.

De indirecte effecten hangen sterk samen met de pH verandering in de bodem. Een halvering van de depositie zal de achteruitgang van de bossen vrijwel zeker aanmerkelijk vertragen. Voor herstel zal de depositie tot ongeveer 20% van de huidige waarde moeten worden teruggebracht. Voor de overige natuurgebieden op zandgronden is de onzekerheid nog dermate groot, dat niet kan worden aangegeven tot welk niveau de depositie zou moeten worden teruggebracht om indirecte effecten op te heffen.

6.2.3 Fauna

De directe effecten op de fauna zullen zeker beduidend minder zijn bij lagere depositieniveaus. Gezien de nog grote onzekerheid over de huidige effecten en over geen-effect-niveaus zijn echter geen voorspellingen te maken.

Dieren, die sterk afhankelijk zijn van vegetaties die bedreigd worden door verzuring, zullen min of meer naar evenredigheid van de effecten op die vegetaties verdwijnen.

6.2.4 Oppervlaktewater

Vrijwel alle van oorsprong zwak gebufferde wateren op de kalkloze zandgronden zijn al verzuurd of verontreinigd. Herstel van een zwak gebufferd milieu is vrijwel niet mogelijk. Bij sterke vermindering van de depositie is het wellicht mogelijk, in combinatie met het beheer gericht op het behouden van een zwakke buffering, de enkele tientallen wateren die nog niet zijn verzuurd in stand te houden. De humeuze wateren zullen naar verwachting bij halvering van de zuurtoevoer voldoende buffering houden om niet te verzuren.

6.2.5 Conclusies

Vermindering van de depositie tot de helft van het huidige niveau, wat globaal overeenkomt met wat in het IMP-Lucht 1984-1988 als doelstelling is opgenomen, zal voor de directe effecten globaal een evenredige verlaging geven. Tevens mag worden verwacht dat de achteruitgang van het Nederlandse bos aanzienlijk zal worden afgeremd. Voorkomen of herstel van de aantasting van bossen en vennen vraagt echter een verdere beperking van de depositie. Herstel van de buffercapaciteit van bodems en oppervlaktewateren is veelal niet mogelijk. Wel kan de pH in een aantal gevallen worden teruggebracht naar een niveau waarop tenminste een deel van de effecten niet meer optreedt.

7. KNELPUNTEN, LEEMTEN IN KENNIS EN AANBEVELINGEN VOOR ONDERZOEK

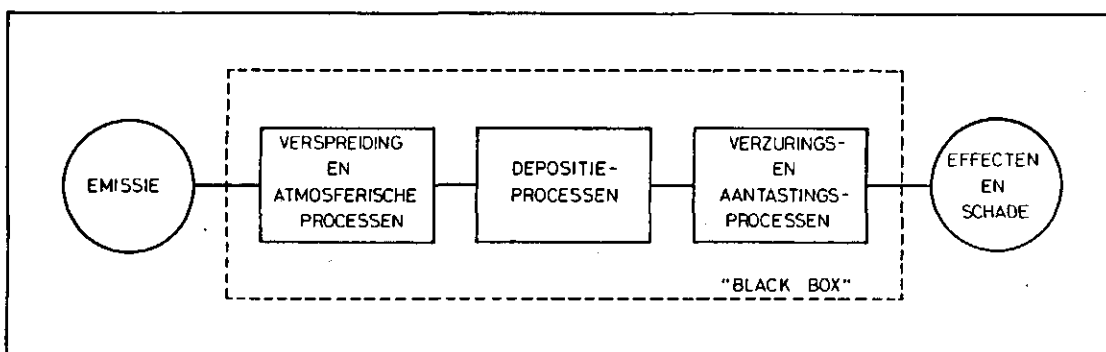
In de vijf wetenschappelijke rapporten die de basis vormen voor dit evaluatierapport wordt een groot aantal aanbevelingen voor onderzoek gedaan, voortkomend uit geconstateerde leemten in kennis en knelpunten. Diverse gelijksoortige aanbevelingen worden vanuit meerdere afzonderlijke onderzoeksterreinen gegeven. Er bestaat sterke behoefte aan een meer geïntegreerde, interdisciplinaire benadering.

In dit hoofdstuk is gepoogd de leemten in kennis en knelpunten, alsmede de meest relevante onderzoeksaanbevelingen tot een samenhangend geheel te maken. Bij de selectie van deze aanbevelingen is vooral gelet op:

- de relevantie van de te verwachten resultaten van het onderzoek voor het overheidsbeleid;
- de aansluiting op de buitenlandse onderzoekingen vooral gezien de initiatieven die thans worden genomen met betrekking tot internationale coördinatie van onderzoek in EG en ECE kader.

7.1 Knelpunten en leemten in kennis

De gehele keten van oorzaak naar effect is in figuur 7.1 geschetst.



Figuur 7.1. Oorzaak-effect keten.

In deze keten zijn nog vele schakels onzeker. De mechanismen die aan de onderdelen ten grondslag liggen zijn nog onvoldoende bekend. Voor het beleid is uiteindelijk de

relatie emissie-effect van belang. Het tussenliggende kan dan als zogenaamde "black-box" worden beschouwd. Nadere invulling daarvan is slechts zover nodig, dat de emissie-effectrelatie voldoende nauwkeurig kan worden bepaald.

Het eerste deel van de keten is gedeeltelijk beschikbaar in de vorm van verspreidingsmodellen voor SO_2 en NO_x . Voor ammoniak is dit niet het geval. De beschrijving van depositieprocessen is nog duidelijk onvoldoende. Gemiddelden voor grote gebieden zijn met de verspreidingsmodellen te bepalen; meer gedetailleerde berekeningen voor gevoelige gebieden zijn nog niet voldoende nauwkeurig te maken.

De kennis over de relatie tussen depositie en verzuring is in redelijke mate beschikbaar. De relatie met aantastingsprocessen is echter nog onvoldoende bekend om tot duidelijke kwantitatieve voorspellingen van effecten te kunnen komen.

Het opstellen van oorzaak-effect relaties geschiedt op empirische en theoretische gronden. Om hier ook een voorspellende waarde aan te kunnen toekennen is verificatie noodzakelijk. Daarvoor zijn uitgebreide meetreeksen noodzakelijk. Een evaluatie van de bestaande meetprogramma's is daarbij een eerste stap. Combinatie en eventueel aanpassing van meetprogramma's voor depositie, bodem, grondwater, oppervlaktewater, vegetatie (onder andere bossen) en wellicht ook bodemleven en fauna lijkt onontbeerlijk.

7.2 Aanbevelingen voor onderzoek

Een onderverdeling van de onderwerpen is zowel parallel gemaakt aan de indeling van dit rapport als naar de onderscheiden typen van onderzoek, te weten onderzoek naar mechanismen en processen en onderzoek gericht op de ontwikkeling van modellen en op de verificatie daarvan.

7.2.1 Bronnen en emissies.

- a. Antropogene emissies van NH_3 , in relatie tot de natuurlijke uitstoot. Inventarisatie van de uitstoot van NH_3 ,

in en vooral buiten Nederland.

- Stand van kennis : miniem voor buitenland.
- Gewenst type onderzoek: veldwaarnemingen, emissieregistratie.

7.2.2 Atmosferische processen.

- a. De studie van het gedetailleerde depositieproces (nat, droog, mist, dauw); verschillen in de depositie als gevolg van verschillen in het ontvangend oppervlak.
 - Stand van kennis : fragmentarisch.
 - Gewenst type onderzoek: proces onderzoek, veldwaarnemingen.
- b. Modelstudies naar de relatie tussen emissie van SO_2 , NO_x en NH_3 en depositie in Europa.
 - Stand van kennis : modellen voor SO_2 en NO_x zijn beschikbaar, modellen voor NH_3 ontbreken.
 - Gewenst type onderzoek: model ontwikkeling.
- c. Meting van de droge depositie, met name van gassen (SO_2 , NO_2 , NH_3) met de nadruk op metingen in voor verzuring gevoelige gebieden.
 - Stand van kennis : onvolledig.
 - Gewenst type onderzoek: veldwaarnemingen.
- d. Concentratieniveau's van NH_3 in Nederland.
 - Stand van kennis : slechts op enkele punten in Nederland gemeten.
 - Gewenst type onderzoek: veldwaarnemingen.

7.2.3 Bodem.

- a. De rol van ammoniak en ammonium bij verzuring van de bodem bij verschillende pH-trajecten en verschillende bodemtypen.
 - Stand van kennis : fragmentarisch, voornamelijk uit de bemestingsleer.
 - Gewenst type onderzoek: proces onderzoek, massabalans studies.
- b. Adsorberend vermogen, buffercapaciteit en buffersnelheid van verschillende bodems bij verschillende pH's.
 - Stand van kennis : miniem voor bodems in natuur-

- gebieden.
- Gewenst type onderzoek: veldmetingen in natuurgebieden, laboratorium onderzoek in kolommen.
- c. De invloed van verzuring op de beschikbaarheid en chemische vorm van aluminium.
- Stand van kennis : in ontwikkeling.
 - Gewenst type onderzoek: proces- en model onderzoek.
- d. De invloed van verzuring op de kringloop van organisch materiaal.
- Stand van kennis : in beperkte mate aanwezig voor reeds van nature zure gronden.
 - Gewenst type onderzoek: veldwaarnemingen, proces- en modelonderzoek.
- e. De relatie tussen verzuring en stikstofhuishouding in natuurgebieden.
- Stand van kennis : weinig kennis over processen bij verschillende pH-niveaus.
 - Gewenst type onderzoek: model- en proces onderzoek.
- f. Het transport en de beschikbaarheid van zware metalen in de bodem en de invloed van verzuring hierop; het gedrag van zware metalen in voedselketens.
- Stand van kennis : alleen kennis over de effecten op sommige plantensoorten en regenwormen.
 - Gewenst type onderzoek: proces onderzoek, modelonderzoek naar voedselketens.

7.2.4 Oppervlaktewater.

- a. De invloed van verzuring op de kringloop van organisch materiaal in oppervlaktewater.
- Stand van kennis : gedeeltelijk beschikbaar.
 - Gewenst type onderzoek: procesonderzoek.
- b. De relatie tussen verzuring en stikstofhuishouding en fosfaathuishouding, zowel in water als in sedimenten.
- Stand van kennis : fragmentarisch.
 - Gewenst type onderzoek: proces- en modelonderzoek.
- c. Achterhalen van de historische ontwikkeling in thans verzuurde wateren door sedimentonderzoek (diatomeeën,

plantenresten, resten van macrofauna).

- Stand van kennis : redelijk voor diatomeeën, fragmentarisch voor andere organismen
- Gewenst type onderzoek: retrospectief onderzoek ter verificatie van modellen.

7.2.5 Vegetatie.

a. De relatie tussen depositie en effecten op vegetaties, zowel voor directe effecten als voor indirecte via de bodem verlopende effecten.

- Stand van kennis : geringe kennis over verschillen tussen typen vegetaties en aandeel directe/ indirecte inwerking.
- Gewenst type onderzoek: proces onderzoek, modelontwikkeling voor directe effecten.

b. Een regelmatig terugkerende vitaliteitskartering van bossen, met name op droge, voedselarme gronden.

- Stand van kennis : alleen momentopname beschikbaar.
- Gewenst type onderzoek: veldwaarnemingen.

c. Veldbegassingsexperimenten ter verkrijging van inzicht in dosis-effect relaties van (combinaties van) SO_2 , NO_x , NH_3 en ozon op planten.

- Stand van kennis : geringe kennis over relatieve aandeel van stoffen en synergetische / cumulatieve effecten.
- Gewenst type onderzoek: proces onderzoek.

d. De relaties tussen schade aan bomen en planten en de verschillende stress-factoren die daarop worden uitgeoefend, zoals gasvormige luchtverontreiniging; directe effecten van zure regen, mist en dauw op bladeren; effecten via de bodem op mycorrhiza en wortels; schimmels en ziekten; insectenvraat; klimaatfactoren als vorst, droogte; beheersfactoren zoals bemesting, etc.

- Stand van kennis : minieme kennis over aandeel van verschillende invloeden

in geconstateerde effecten.

- Gewenst type onderzoek: proces onderzoek.

7.2.6 Fauna

Het onderzoek naar effecten op de fauna is veelal het beste uit te voeren als extra stap in onderzoeken naar effecten op bodem, water en vegetatie. Zo zal de fauna in 7.2.3-f als onderdeel van voedselketens (meestal als laatste in een reeks) dienen te worden opgenomen. De onderzoeken genoemd in 7.2.5 onder a en d dienen een extra stap te omvatten waarin de gevolgen van veranderingen in vegetaties voor de fauna worden bestudeerd. Daarnaast speelt de fauna een rol in de effectmechanismen bij vegetatie. Dit is reeds in 7.2.5-d opgenomen.

Apart voor de fauna dienen nog onderzocht te worden de directe effecten van verzuring op nuttige insecten.

- Stand van kennis : geringe kennis uit correlatief onderzoek verkregen.
- Gewenst type onderzoek : proces onderzoek door kleinschalige begassingsproeven.

ANNEX 1

MOTIE DE BOOIS

Tweede Kamer der Staten-Generaal**2**

Zitting 1982-1983

Rijksbegroting voor het jaar 1983

17 600

Hoofdstuk XI
Departement van Volkshuisvesting,
Ruimtelijke Ordening en
Milieubeheer
(IMP-luchtverontreiniging
1981-1985)

Nr. 84**MOTIE VAN HET LID DE BOOIS**

Voorgesteld in de uitgebreide commissievergadering van 21 februari 1983

De Kamer,

gehoord de beraadslaging;

verontrust door berichten dat de verzuring van de bodem ook in Nederland reeds aantoonbaar is;

verzoekt de Regering, een breed inventariserend onderzoek te verrichten naar te verwachten schade op verschillend gebied door verzuring van de bodem;

en tevens, voor zover mogelijk, een aanvang te maken met het opstellen van een programma van maatregelen ter voorkoming en bestrijding van verzuring van de bodem,

en gaat over tot de orde van de dag.

De Boois

ANNEX 2

TREKKERINSTITUTEN EN MEDEWERKENDE ORGANISATIES

ANNEX 2 TREKKERINSTITUTEN EN MEDEWERKENDE ORGANISATIES

A. Atmosferische processen en depositie

1. TNO (Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie), Delft *
2. TNO (Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie), Apeldoorn
3. Rijksuniversiteit Utrecht (Instituut voor Meteorologie en Oceanografie)
4. Rijksinstituut voor de Volksgezondheid, Bilthoven
5. Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten
6. N.V. KEMA, Arnhem
7. TNO (Studiecentrum voor Milieuonderzoek), Delft
8. TNO (Instituut voor Milieuhygiëne en Gezondheidstechniek), Delft
9. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt

B. Bodem

1. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren *
2. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen
3. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen
4. Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, Voorburg
5. Landbouw Hogeschool Wageningen (vakgroep Bodemkunde en Geologie)
6. Instituut De Dorschkamp, Wageningen
7. Universiteit van Amsterdam (Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium)

C. Bodembioologie

1. Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Arnhem *
2. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren
3. Landbouw Hogeschool Wageningen (vakgroep Bodemkunde en Plantenvoeding)
4. Stichting ITAL, Wageningen

* Trekkerinstituut

D. Vegetatie

1. Staatsbosbeheer, Utrecht *
2. Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek, Wageningen
3. Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Leersum
4. Landbouw Hogeschool Wageningen (vakgroep Vegetatiekunde, Plantenecologie en Onkruidkunde)
5. Instituut De Dorschkamp, Wageningen
6. N.V. KEMA, Arnhem

E. Oppervlaktewater en Hydrobiologie

1. Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Leersum *
2. Katholieke Universiteit Nijmegen (vakgroep Aquatische Oecologie)
3. Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, Voorburg

* Trekkerinstituut

ANNEX 3

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

ANNEX 3 BEGELEIDINGSCOMMISSIE

1. Ir. J.C.A.M. Bervaes
Ministerie van Landbouw en Visserij (Staatsbosbeheer)
2. Ir. H. Jongenburger
Ministerie van Landbouw en Visserij (directie Veehou-
derij en Zuivel)
3. Drs. B.H. van Leeuwen
Ministerie van Landbouw en Visserij (hoofddirectie
Natuurbehoud en Openlucht Recreatie)
4. Drs. K. Meijer
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening
en Milieubeheer (directie Lucht)
5. Dr. J.E.T. Moen
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening
en Milieubeheer (directie Bodem, Water en Stoffen)
6. Drs. S. Zwerver*
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening
en Milieubeheer (directie Lucht)

* Voorzitter

ANNEX 4

KLANKBORDGROEP

ANNEX 4 KLANKBORDGROEP

1. Prof. Dr. E.H. Adema
Landbouw Hogeschool Wageningen (vakgroep Luchthygiëne
en -verontreiniging)
2. Drs. E. Buysman
Rijksuniversiteit Utrecht (Instituut voor Meteorologie
en Oceanografie)
3. Prof. Dr. Ir. P.J.C. Kuiper
Rijksuniversiteit Groningen (Biologisch Centrum)
4. Dr. Ir. F.Th.M. Nieuwstadt
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De
Bilt
5. Dr. J.B. Opschoor
Vrije Universiteit Amsterdam (Instituut voor Milieu-
vraagstukken)
6. Prof. Dr. G.G.J.M. Poeth
Interuniversitaire Interfaculteit Bedrijfskunde, Delft
7. Dr. H.A. Udo de Haes
Rijksuniversiteit Leiden (Centrum voor Milieukunde)
8. Prof. Dr. J.M. Verstraten
Universiteit van Amsterdam (Fysisch Geografisch en
Bodemkundig Laboratorium)

ANNEX 5

BEGRIPPENLIJST

ANNEX 5 BEGRIPPENLIJST

Accumulatie

De opname van een stof door een levend organisme of niet levende materie als gevolg waarvan de concentratie van die stof in (delen van) het organisme of materie significant boven de normale uitstijgt, en wel bij verhoogde concentraties in het milieu. Voor milieuvreemde stoffen betekent dit dat de concentraties in het organisme of materie hoger worden dan die in de omgeving; voor natuurlijke stoffen dat de concentraties in het organisme of de materie hoger worden dan ze bij normale concentraties in het milieu zouden zijn.

Aeroob

Zuurstofhoudend.

Aerosolen

Zwevende vaste of vloeibare deeltjes in de atmosfeer.

Alkaliniteit (zuurbufferende capaciteit)

De hoeveelheid zuur die vereist is om de pH van het water tot een bepaalde waarde te verlagen.

Anaeroob

Zuurstofloos.

Anionen

Zie ionen.

Beekeerdgronden

Kalkloze zandgronden die veel voorkomen in beekdalen met een opwaartse grondwaterstroming (kwel). In de ondergrond komt vaak nog ondiep (2 à 3 meter beneden maaiveld) kalk voor. De grondwaterstand is in het algemeen hoger dan in podzolgronden.

Bodem

Het vaste deel van de aarde met het zich daarin bevindende grondwater; dit omvat ook de bodemorganismen en de gasvormige fase. Naast deze definitie van bodem wordt soms uit

praktische overwegingen, ook in dit rapport, het begrip "bodem" in engere zin gebruikt, waarbij dan het grondwater en de ondergrond niet inbegrepen zijn. De inhoud van het begrip blijkt echter steeds uit de context.

Buffercapaciteit

Het vermogen om veranderende concentraties van zuur te neutraliseren of op te vangen.

Cuticula

Bedekkend huidje. Niet uit cellen bestaande bedekking van plantecellen die in rechtstreekse verbinding met de buitenwereld staan. De cuticula bestaat vooral uit vetachtige stoffen; het hoofdbestanddeel is cutine, een ester van hogere alcoholen en vetzuren. De cuticula dient vooral om waterverlies door verdamping tegen te gaan en is bij planten in een droog klimaat meestal zeer sterk ontwikkeld.

Depositie

De afzetting op, of de opname door bodem, water, vegetatie en dieren van gassen en aerosolen uit de atmosfeer. Waar in het rapport sprake is van depositie wordt bedoeld de depositie van zure of verzurende stoffen. Natte depositie vindt plaats via regen, sneeuw etc. Droge depositie vindt plaats zonder tussenkomst van regen, sneeuw, etc. In Nederland is de droge depositie twee maal zo groot als de natte depositie.

Droge depositie

Zie depositie.

Duinvaaggronden

Kalkloze stuifzandgronden in het zandgebied van Oost-Nederland en de duingronden ten noorden van Bergen. Deze gronden zijn relatief nog zeer jong waardoor ze nog vrijwel geen humus bevatten.

Ecologische functie van de bodem

Deze is te onderscheiden in een algemene ecologische functie (de functie die de bodem vervult als onderdeel van de

algemene ecologische kringlopen) en een specifieke ecologische functie (de functie die de bodem vervult als verblijfplaats voor bodemorganismen).

Ecosysteem

Een samenhangend geheel van levende organismen en een niet-levende omgeving, inclusief de relaties tussen de samenstellende onderdelen.

Epifyten

Op bomen groeiende mossen en korstmossen.

Eutrofiëring

Proces van verrijking met stoffen die voedsel zijn voor planten. De gevolgen zijn ondermeer verandering van de soortensamenstelling en vermindering van de diversiteit.

Fauna

Dierenwereld.

Flora

Plantenwereld.

Fotochemische processen

Chemische processen in de atmosfeer die het gevolg zijn van de adsorptie van licht.

Freatisch grondwater

Grondwater met een vrije waterspiegel. Komt veelal voor in gebieden waar de bovenste bodemlagen uit zand bestaan.

Humificatie

Vorming van humus

Humus

Humus is een vormloos zwartbruin product bestaande uit organische reststoffen die door het bodemleven moeilijk worden aangetast (lignine, harsen, vetten, etc.) en een nieuwe organische verbinding die waarschijnlijk door bacteriën uit ammoniak en lignine wordt gevormd.

Ionen

Bij oplossing in water vallen veel stoffen uiteen in een positief en een negatief geladen deel. Bijvoorbeeld keukenzout (NaCl) valt uiteen in de positief geladen ionen (kationen) Na^+ en de negatief geladen ionen (anionen) Cl^- .

Kationen

Zie ionen.

Mineralisatie

Het proces waarbij organisch materiaal door micro-organismen, onder gebruik van zuurstof, wordt afgebroken, waarbij de mineralen als regel in een vorm worden gebracht waarin ze door planten kunnen worden opgenomen.

Meq/l

Milli-equivalent per liter. $1 \text{ meq/l} = 1 \text{ millimol/liter}$ bij eenwaardige ionen, $1/2 \text{ millimol/liter}$ bij tweewaardige ionen, etc. Bijvoorbeeld $1 \text{ meq/l Ca}^{2+} = 1/2 \text{ millimol Ca}^{2+}/\text{l}$.

Mobiliteit

Beweeglijkheid. Een complex van eigenschappen dat aangeeft in welke mate en met welke snelheid een stof zich kan verspreiden in het milieu. Daarbij spelen een rol: zuurgraad, oplosbaarheid in water, adsorptie eigenschappen, etc.

Mol

Een mol of molair is een vast gedefiniëerd aantal atomen of moleculen van een bepaalde stof. 1 mol atomen of moleculen weegt juist zoveel gram als het atoom- of molecuulgewicht van die stof aangeeft.

Mycorrhiza

Schimmels die in symbiose leven met plantenwortels en die van belang zijn voor haarwortelfuncties en de voedselvoorziening van planten.

Natte depositie

Zie depositie.

Natuurgebieden

Gebieden die uit het oogpunt van natuur- en landschapsbehoud, bosbouw of recreatie van bijzonder belang zijn. Het betreft ruim 12% van het oppervlak van Nederland. In het rapport worden met dit begrip met name bossen (8% van het oppervlak van Nederland), heidevelden, stuifzandvegetaties en vennen aangeduid welke gelegen zijn op de kalkloze, humusarme zandgronden in het oosten en zuiden van Nederland. Opgemerkt wordt dat vrijwel al deze gebieden mede door toedoen van de mens ontstaan zijn en veelal ook door gericht onderhoud in stand gehouden worden.

Natuurlijke omstandigheden of situatie

Hiermee wordt in het rapport bedoeld de situatie die zou heersen in afwezigheid van door de mens veroorzaakte depositie.

Nitrificatie

Nitrificatie is een biochemisch proces waarbij ammonium via nitriet wordt omgezet in nitraat. Deze omzettingen worden door bacteriën uitgevoerd.

Ozon (O_3)

Ozon is een zuurstofverbinding met een sterk oxiderende werking. Het komt van nature in vrij grote hoeveelheden in de atmosfeer voor. Aanzienlijke verhoging van de concentratie ontstaat in de aanwezigheid van organische verbindingen en stikstofoxiden, die door menselijke activiteiten in de atmosfeer komen.

pH of zuurgraad

De negatieve logaritme van de waterstofionenconcentratie in mol per liter ($-\log H^+$), dus een maat voor de concentratie van H -ionen in water. De schaal loopt van 0 tot 14 waarbij 7 het neutrale punt is. Hoe lager de waarde, des te hoger de zuurgraad. Daling van de pH met 1 eenheid wil zeggen een toename van H^+ -ionen met een factor 10; daling met 2 eenheden een toename van H^+ -ionen met een factor 100. De pH van azijn is 3; de pH van accuzuur is 1. In het rapport wordt met de pH de zuurgraad van water of bodemvocht aangeduid.

pH-KCl

De zuurgraad van de bodem bepaald in een kaliumchloride oplossing, waarbij de concentratie aan H^+ -ionen hoger is dan in waterige oplossing omdat kalium met H^+ omwisselt. De pH-KCl is veelal lager dan de pH in een gegeven bodemonster.

Podzolgronden

Zandgronden waarbij in de bovenste lagen verwerking is opgetreden gevolgd door uitspoeling van onder andere aluminium, ijzer en humuszuren naar dieper gelegen lagen. Daar zijn deze stoffen voor een deel neergeslagen. Kalk en andere gemakkelijk oplosbare stoffen zijn geheel verdwenen.

Stuifzand

Door windverstuiving ontstane zandafzetting zoals kustduinen en rivierduinen.

Synergisme

Onderling versterkende werking. Men spreekt van synergisme indien de werking van een aantal stoffen gezamenlijk sterker is dan de som van de inwerkingen van de afzonderlijke stoffen.

Toxiciteit

De eigenschap van een stof waardoor een levend organisme dat met bepaalde hoeveelheden van die stof in aanraking komt, in een bepaalde levensfase of tijdens zijn gehele levensduur in zijn gezondheid geschaad wordt; dat wil zeggen òf sterft òf zodanige veranderingen ondergaat, dat deze niet door compenserende acties van het organisme opgevangen worden.

Vegetatie

Planten, inclusief bomen, zowel op cultuurgronden als in natuurgebieden.

Verwerking

Processen in de bodem die ondermeer plaatsvinden onder invloed van de toevoer van H^+ -ionen. Afhankelijk van de

samenstelling en pH van de bodem worden hierbij door kalk, kleimineralen, aluminium- en ijzerhydroxiden H^+ -ionen geheel of gedeeltelijk geneutraliseerd. Dit gaat gepaard met het uiteenvallen, oplossen of gedeeltelijk veranderen van de genoemde stoffen.

Vitaliteit van bossen

Gezondheidstoestand van bossen gebaseerd op visuele kenmerken zoals de ouderdom van naalden, de bezettingsgraad van twijgen met bladeren of naalden, kleur van de naalden, dichtheid van de kroon, needscheuten, het voorkomen van hars, etc.

Zure regen

De totale depositie van zure of verzurende stoffen. Aangezien in Nederland het grootste deel gevormd wordt door droge depositie, is de term zure regen feitelijk onjuist.

Zuurgraad

Zie pH.