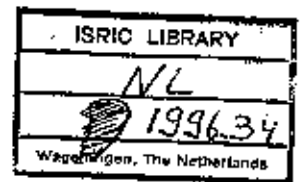


Scanned from original by ISRIC - World Soil Information, as ICSU World Data Centre for Soils. The purpose is to make a safe depository for endangered documents and to make the accrued information available for consultation, following Fair Use Guidelines. Every effort is taken to respect Copyright of the materials within the archives where the identification of the Copyright holder is clear and, where feasible, to contact the originators. For questions please contact soil.isric@wur.nl indicating the item reference number concerned.



Trends in bodemontwikkeling in de Nederlandse binnenduinrand

Bodemvorming in relatie tot verzuring, afhankelijk van substraat, vegetatie en
ouderdom van het oppervlak

Onderzoeksvoorstel

Leonie Dekker (9212345)
Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium
Universiteit van Amsterdam
November 1996

23665

Voorwoord

Dit onderzoeksvoorstel is geschreven in het kader van module 3.2.2 van de studie Fysische Geografie van de Universiteit van Amsterdam. Het onderzoeksvoorstel vormt een vast onderdeel van het studieprogramma en is al dan niet gekoppeld aan het Eigen Onderzoek (module 3.4 t/m 3.6).

Het onderzoek 'Trends in bodemontwikkeling in de Nederlandse binnenduinrand' zal als onderdeel van de afstudeervariant Bodemgeografie in de periode november 1996 - april 1996 daadwerkelijk worden uitgevoerd. De uitvoering zal zoveel mogelijk gebeuren zoals in dit stuk is omschreven. Voorstel en onderzoek sluiten aan bij die van Jorien van Blom (Fysische Geografie, Universiteit van Amsterdam) waarbij een deel (te weten fase 1: inventarisatie van bestaande gegevens) gezamenlijk wordt uitgevoerd.

Begeleider bij het schrijven van het voorstel en bij de uitvoering van het onderzoek is de prof. dr. J. Sevink van de vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde van de Universiteit van Amsterdam (landschapsecologie, landevaluatie en bodeminventarisatie).

Het voorstel is in drie stukken opgedeeld. In hoofdstuk 1 worden aanleiding (§ 1.1), probleemstelling (§ 1.2) en doelstelling (§ 1.3) van het onderzoek behandeld en wordt tevens een korte uitleg gegeven van de werkwijze die bij de uitvoer gehanteerd wordt (§ 1.4). Hoofdstuk 2 gaat dieper in op de achtergronden van het onderzoek. Hierbij wordt een opsplitsing gemaakt tussen algemene achtergronden van bodemverzuring enerzijds (§ 2.1) en de karakteristieken van de binnenduinrand en diens relatie tot doorgaande verzuring anderzijds (§ 2.2). In hoofdstuk 3 wordt de werkwijze van het uit te voeren onderzoek verder uitgewerkt, ingaand op de onderzoeksvragen (§ 3.1), de aanpak (§ 3.2), de methoden en technieken (§ 3.3) en het werkplan (§ 3.4).

Inhoud

VOORWOORD

INHOUD

| | |
|---|-----------|
| 1 AANLEIDING EN ONDERZOEK | 5 |
| 1.1 Inleiding | 5 |
| 1.2 Probleemstelling | 5 |
| 1.3 Doelstelling | 6 |
| 1.4 Werkwijze | 6 |
| 2 ACHTERGRONDEN | 5 |
| 2.1 Bodenverzuring | 7 |
| 2.1.1 Principes | 7 |
| 2.1.2 Invloed van vegetatie | 8 |
| 2.1.2.1 Organische stof | 8 |
| 2.1.2.2 Atmosferische depositie | 9 |
| 2.1.2.3 Beworteling | 9 |
| 2.1.3 Effecten | 9 |
| 2.1.3.1 Aluminium | 9 |
| 2.1.3.2 Stikstof | 10 |
| 2.1.4 Doorgaande verzuring | 10 |
| 2.2 Binnenduinrand | 11 |
| 2.2.1 Opbouw en ouderdom | 11 |
| 2.2.2 Moedermateriaal | 11 |
| 2.2.3 Bodem en vegetatie | 12 |
| 2.2.4 Verzuring | 12 |
| 2.2.5 Verzuring op lange termijn | 13 |
| 2.2.4.1 Modelmatig | 13 |
| 2.2.4.2 Praktijkonderzoek | 14 |
| 3 WERKWIJZE | 17 |
| 3.1 Vraagstelling | 17 |
| 3.1.1 Gebiedsafbakening | 17 |
| 3.1.2 Karakterisering binnenduinrand | 17 |
| 3.1.3 Trendbeschrijving | 18 |
| 3.2 Benadering | 18 |
| 3.2.1 Fase 1: Inventarisatie van bestaande informatie | 19 |
| 3.2.2 Fase 2: Vervolgonderzoek | 19 |

| | |
|--|----|
| 3.3 Onderzoeksmethoden en -technieken | 19 |
| 3.3.1 Verzameling gegevens | 19 |
| 3.3.2 Verwerking gegevens | 20 |
| 3.4 Werkplan | 21 |
| 4 LITERATUUR | 22 |

1 Aanleiding en onderzoek

1.1 Inleiding

De afgelopen decennia is in West-Europa een aanzienlijke achteruitgang van de bossen geconstateerd (Van den Berg & Oosterbaan 1992; Hilgen 1994). Door het grote aantal factoren dat op bossen van invloed is en de complexiteit van boscosecosystemen, is de precieze oorzaak van deze achteruitgang moeilijk vast te stellen. Klimaat, weer, bodemgesteldheid, atmosferische depositie, grondwaterstandverlaging, ziekten, insektenplagen en beheer zijn belangrijke elementen die bepalend zijn voor het functioneren van bossen als ecosysteem.

De bovengenoemde zogenaamde *stressfactoren* staan over het algemeen echter niet op zichzelf. Zij zijn op vele manieren met elkaar verbonden en kunnen een versterkende of afzwakkende invloed op elkaar hebben. Een voorbeeld hiervan is de grotere gevoeligheid van bossen voor droogte of insektenplagen wanneer als gevolg van overmatige stikstofdepositie de nutriëntenhuishouding verstoord is. Of de grotere gevoeligheid voor vorst door blootstelling aan verhoogde ozonconcentraties in de atmosfeer (Heij et al. 1991).

Verzuring en de daaraan gekoppelde verhoogde depositie van stikstof, droogte (watertekort in het vegetatie seizoen) en nadelig gebruik en beheer worden gezien als belangrijkste stressfactoren voor terrestrische ecosystemen in Nederland (Dopheide & Verstraten 1995; Oosterbaan et al. 1992). Er wordt in Nederland een groot aantal onderzoeken uitgevoerd om tot een meer gefundeerd inzicht te komen in de complexe interacties tussen deze factoren. Met de uit dit onderzoek voortkomende inzichten in boscosecosystemen wordt getracht aan de hand van aangepast beheer en een aantal herstelmaatregelen het bos in een betere conditie te brengen en het voor de toekomst te behouden. De studies richten zich op het bepalen van bosvitaliteit, stressfactoren en hun onderling relatie, het aangeven van herstelmaatregelen en het bepalen van de effecten van herstelmaatregelen op de bosvitaliteit (Dopheide & Verstraten 1990; Mohren 1991; Hilgen 1994; Coppus 1996; Oosterbaan et al. 1992).

Een deel van de onderzoeken naar stressfactoren richt zich specifiek op de effecten van overmatige depositie van zuren en verzurende stoffen en de daaraan verbonden bodemverzuring (De Vries et al. 1995; Dopheide & Verstraten 1995; Heij et al. 1991; Mulder & Stein 1994; Van der Salm & Verstraten 1993; Verstraten et al. 1989/1990). De mate waarin bodemverzuring optreedt, is afhankelijk van de grootte van de zuurinput en de capaciteit van de bodem om deze zuren te bufferen (de zuur neutraliserende capaciteit, ZNC). Zo zijn naaldbossen op arme Pleistocene zandgronden vanwege een grote zuurinput via de vegetatie en een lage ZNC van de bodem zeer gevoelig voor verzuring. Ulrich (1983, In: Mohren 1991) stelde, dat de in deze systemen van nature optredende bodemverzuring de laatste decennia wordt versterkt door verhoogde depositie van zuren en verzurende bestanddelen vanuit de atmosfeer (met name stikstof). Bodemverzuring gaat gepaard met daling van de bodem-pH, daling van de hoeveelheid beschikbare basen en verhoging van de concentraties toxisch aluminium in de bodemoplossing. De veranderingen in bodemchemische toestand, die als gevolg van verhoogde atmosferische depositie versneld optreden, zouden in combinatie met andere stressfactoren een belangrijke factor kunnen zijn in de afname van bosvitaliteit.

1.2 Probleemstelling

De afgelopen decennia is de kennis over actuele processen die met verzuring samenhangen, zowel in de atmosfeer als in bodem en vegetatie, aanzienlijk vergroot. Over welke processen op lange termijn een rol gaan spelen bij verzuring is echter nog weinig bekend. Wel kunnen op grond van de kennis van actuele processen voorspellingen worden gedaan omtrent de ontwikkeling in de toekomst (bijv. De Vries et al. 1994). Om betere uitspraken te kunnen doen over wat er werkelijk gebeurt bij doorgaande verzuring, is het zaak gericht te kijken naar de meest verzuurde bodem-vegetatie-systemen. Dit zullen, gezien het voorgaande, systemen zijn op gronden met een lage zuurneutraliserende capaciteit, die bovendien een zekere ouderdom hebben, zodat natuurlijke bodemverzuring geruime tijd heeft kunnen doorgaan.

De bossen van de Nederlandse binnenduinstrand kunnen gezien worden als voorbeeld voor de toestand welke in de toekomst bij voortgaande verzuring zal ontstaan in de stuif- en dekzandbodems van het Pleistoceen. In het in samenstelling zeer arme moedermateriaal van het duingebied zullen zich bodems ontwikkeld hebben met een lage ZNC. Gerelateerd aan de chronologische opbouw van de kust bevinden de oudsten hiervan zich in het oostelijke gedeelte, een gebied wat over het algemeen wordt aangeduid als 'binnenduinstrand'. Moedermateriaal en ouderdom geven reden om aan te nemen, dat natuurlijke verzuring hier verregaand heeft plaatsgevonden en dat deze trend de laatste decennia als gevolg van verhoogde atmosferische depositie van zuren en verzurende stoffen versneld is doorgezet.

Op het moment is er nog weinig bekend over de bodemkundige toestand van de binnenduinstrand als geheel. Diverse organisaties beschikken voor gebieden die onder hun beheer vallen waarschijnlijk over gedetailleerdere informatie dan op landelijk niveau bekend is. Om meer zicht te krijgen op hoe de bodem zich bij doorgaande verzuring zal ontwikkelen, is het van belang de informatie die zich bij verschillende instanties bevindt bijeen te brengen en op grond daarvan tot een completer beeld te komen van de situatie in dit specifieke deel van het kustgebied.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is te komen tot een beschrijving van de bodemkundige situatie in de binnenduinstrand in relatie tot verzuring. Het onderzoek is gericht op het achterhalen van trends in bodemontwikkeling als functie van de primaire mineraalrijkdom van het substraat, de ouderdom van het oppervlak en de bodemvorming die daarmee samenhangt, en verschillende kenmerken van de vegetatie, te weten type, leeftijd en beheersverleden.

De trends zouden een indicatie kunnen geven van welke processen en verschijnselen in dit gebied een rol spelen bij verzuring en welke op termijn ook elders in de Noord-Westeuropese zandgronden kunnen gaan optreden.

1.4 Werkwijze

Om tot de inventarisatie te komen wordt allereerst het onderzoeksterrein afgebakend. Dit gebeurt op grond van geologie en ouderdom van het oppervlak. Daarna worden voor de terreinen in het onderzoeksgebied *bestaande* gegevens verzameld omtrent substraat, bodem en vegetatie. Deze data zullen worden verkregen van kaartmateriaal (op landelijk niveau), onderzoeksrapporten en detailinformatie van diverse behorende instanties. De verzameling van substraatgegevens richt zich op mineralogische samenstelling en kalkgehalte. De bodemkundige gegevens betreffen klassifikatie zoals die op bodemkaarten (1:50.000) gehanteerd wordt en meer specifieke karakteristieken als ouderdom, ontkalkingsdiepte, humusvorm, beworteling en chemische samenstelling. Bij vegetatie wordt aandacht besteed aan type, leeftijd van de opstand en beheersverleden, en zo mogelijk aan groei en vitaliteit.

Op basis van de hoeveelheid bruikbare informatie die uit deze eerste fase van het onderzoek voortkomt, wordt het besluit genomen over het verloop van een tweede fase. Indien er genoeg informatie lijkt te zijn voor een redelijk betrouwbare uitspraak, zal op basis hiervan een analyse worden uitgevoerd aan de hand van een GIS (Geografisch Informatie Systeem) om tot een trendbeschrijving te komen. Aanvullend zal de betrouwbaarheid van de uitgevoerde analyse in het veld worden getoetst (scenario 1).

Indien blijkt dat de informatie niet toereikend is, wordt in het veld aanvullende informatie verzameld om tot een completer beeld te komen van de heersende situatie. Bij de analyse die daarna alsnog wordt gedaan, wordt gebruik gemaakt van zowel de bestaande informatie als van de informatie die direct uit het veld verkregen is. Met het combineren van de bestaande en nader te verzamelen gegevens zal een beter inzicht worden verkregen in de huidige bodemkundige en vegetatieve toestand van de binnenduinstrand (scenario 2).

Hoe het veldonderzoek eruit komt te zien, is afhankelijk van de bestaande gegevens en zal dan ook pas verder vorm krijgen na een inventarisatie van de omvang en bruikbaarheid van het beschikbare materiaal.

2 Achtergronden

Om inzicht te geven in het proces van bodemverzuring worden in het volgende de principes van verzuring, de factoren die daarbij een rol spelen en de effecten op bodem en vegetatie nader besproken en wordt ingegaan op processen en effecten van verzuring op lange termijn.

Om de lokatiekeuze van dit onderzoek te plaatsen wordt een verdere uitwerking gegeven van de in het kader van verzuring belangrijke karakteristieken van de binnenduinrand, te weten substraat en ouderdom.

2.1 Bodemverzuring

Hoewel bodemverzuring in goed gedraineerde gronden in humide klimaten een natuurlijk proces is (Sevink 1991), is de laatste decennia door uitstoot van luchtvervuilende stoffen vanuit industrie en landbouw de snelheid van verzuring flink toegenomen. Deze uitstoot kan op planten zowel een direct schadelijk effect hebben via de stomata, als een indirect schadelijk effect via de bodem. De verhoogde atmosferische depositie van stikstof- (NH_x en NO_x) en sulfaatcomponenten (SO_x) betekent een extra input van zuren en verzurende stoffen in ecosystemen, wat in zuurgevoelige milieus het natuurlijke verzuringsproces versnelt.

2.1.1 Principes

Bodemverzuring wordt gedefinieerd als een verlaging van de zuurneutraliserende capaciteit (ZNC) van een bodem (Verstraten et al. 1989). De ZNC wordt bepaald door tal van protonproducerende en -consumerende reacties en kan worden aangeduid als de netto protonconsumptie. Bij bodemverzuring treedt er een onomkeerbare flux op van protonen naar de bodem, waardoor de reserve voor protonconsumptie, de ZNC, afneemt.

Protonproductie

De protonproductie of zuuraanvoer kan zowel van interne als externe oorsprong zijn. *Interne* protonbronnen zijn dissociatie van CO_2 en organische zuren, en de netto assimilatie van kationen door de vegetatie plus de netto mineralisatie van anionen uit dood organisch materiaal. De *externe* aanvoer bestaat uit atmosferische depositie van H^+ en SO_2 en de netto H^+ bron gevormd door ammonium aanvoer min nitraataanvoer, is in Nederlandse systemen echter de belangrijkste verzuringsbron. Het zuur dat vrijkomt bij de laatst genoemde stikstofomzettingen is kwantitatief het grootst (Verstraten et al. 1989; Verstraten et al. 1990).

Buffering

Welke reacties de grootste bijdrage leveren aan de protonconsumptie en dus de zuurbuffering is afhankelijk van de bodemsamenstelling en de pH. De belangrijkste buffers

en de voornaamste pH-trajecten waarbinnen zij werkzaam zijn, zijn weergegeven in tabel I.

Het in oplossing gaan van calciumcarbonaat of kalk, de *carbonaatbuffer*, is een protonconsumerende reactie die alleen relevant is in bodems met een pH hoger dan 6.2. Alleen dan zal er voldoende kalk aanwezig zijn. Is de pH lager, dan wordt zuur met name gebufferd door verwerking van silicaten (*silicaatbuffer*). In het pH-traject 5.0 - 4.2 zal de kationuitwisselingscapaciteit (CEC) een belangrijker rol gaan spelen. De *kationuitwisselingsbuffer* wordt gevormd door kleimineralen en organische stof. De grootte ervan wordt bepaald door de kleimineralogische samenstelling van het moedermateriaal, het kleigehalte en het humusgehalte. Hierbij treedt verlaging van de effectieve kationadsorptiecapaciteit op, onder andere door vorming van 'Al-hydroxy interlayering' bij bepaalde kleimineralen, i.e. het afdekken van het kleioppervlak door Al-hydroxy kationen, en verdringing van basen aan het adsorptiecomplex door Al^{3+} . Heeft de pH waarden

| Bufferingsmechanisme | pH-traject |
|---------------------------|------------|
| carbonaatbuffer | 6.2 - 8.2 |
| silicaatbuffer | 5.0 - 6.2 |
| kationuitwisselingsbuffer | 4.2 - 5.0 |
| aluminiumbuffer | 3.8 - 4.2 |
| ijzerbuffer | < 3.8 |

Tabel I. De belangrijkste buffermechanismen en bijbehorende pH-trajecten (Naar: Besse 1995).

tussen 3.8 en 4.2, dan zal protonconsumptie voornamelijk plaats vinden door *aluminiumbuffering*. Deze wordt gevormd door een aantal specifieke verweringsreacties van silicaten en kleimineralen, waarbij via verschillende tussenstappen en bijbehorende Al-verbindingen uiteindelijk Al^{3+} vrij komt. Tenslotte gaat bij zeer lage zuurgraad (< 3.8) de *ijzerbuffer* een rol spelen, dat wil zeggen de oplossing van amorfe ijzeroxiden in aanwezigheid van opgeloste organische stof of zelfs oplossing van amorf anorganisch ijzer (pH < 3.2).

Verzuring

Bij een grote aanvoer van zuur (zowel natuurlijk als bij verhoogde depositie) zullen na verloop van tijd de werkzame buffers uitgeput raken, wat een daling van de ZNC inhoudt. De uitputting van buffers gaat gepaard met een daling van de pH, waarna de zuurbuffering door een ander mechanisme wordt overgenomen. In afhankelijkheid van de grootte van de zuurinput en de grootte van de buffers zullen de buffertrajecten meer of minder snel doorlopen worden. Hieruit blijkt het belang van de zuurneutraliserende capaciteit bij verzuring en tevens de ouderdom van een bodem. In oudere bodems zullen (semi-) natuurlijke processen, zoals uitspoeling van kalk en nutriënten en mobilisatie van aluminium, langere tijd zijn doorgegaan.

Hoewel al deze mechanismen bijdragen aan protonconsumptie, kunnen binnen het verzuringsvraagstuk een aantal reacties buiten beschouwing worden gelaten. De verwerking van silicaten en kleimineralen bijvoorbeeld verloopt dermate traag, dat zij niet in relatie staat tot de hoeveelheid zuur die per tijdseenheid het systeem binnenkomt. In de praktijk wordt daarom alleen de zogenaamde 'snelle buffering' in beschouwing genomen. De pool van snelle buffering bestaat uit kalk, het adsorptiecomplex en de amorfe metalen.

2.1.2 Invloed van vegetatie

Dat de vegetatie invloed heeft op verzuring wordt direct duidelijk als bodemvorming onder naald- en loofbos vergeleken wordt. Op vergelijkbaar substraat zal verzuring onder naaldbos zich verder ontwikkelen dan onder loofhoutsoorten als berk, beuk of eik. Er zijn een aantal fundamentele manieren waarop vegetatie bodemcondities beïnvloedt en waarbij verschillen optreden tussen *vegetatietypen* (Wardenaar & Sevink 1992; Miles 1985; Raulund-Rasmussen & Vejre 1985) en opstanden van verschillende *leeftijden* (Emmer & Sevink 1994).

Hoewel vegetatie en bodem op vele manieren gekoppeld zijn (strooisel, beworteling, opname van nutriënten, invang van atmosferische gassen etc.), zal de invloed van vegetatie op organische stof (een van de belangrijkste buffers) en atmosferische depositie en de beworteling nader worden toegelicht.

2.1.2.1 Organische stof

Organische stof vormt in de Nederlandse arme zandgronden een van de belangrijkste pools voor buffering. Tevens is het de belangrijkste nutriëntenbron in de bodem. Accumulatie en afbraak zijn regulerende processen die de totale hoeveelheid organische stof in de bodem bepalen en daarmee (een deel van) de buffercapaciteit en de nutriëntenkringloop in het ecosysteem.

Het grootste deel organische stof ligt opgeslagen in de strooisellaag. De turn-over van organische stof in de strooisellaag en daarmee de vorming van humustypen is afhankelijk van een complex aan processen, die voor een groot deel bepaald worden door chemische en fysische omstandigheden van de ectorganische laag als geheel (Emmer & Sevink 1994). Hierbij zijn grootte van input, maar vooral ook de samenstelling van het strooisel belangrijke factoren. Beiden zijn in hoge mate soortafhankelijk (Miles 1985). Het belang van samenstelling is vooral gerelateerd aan de C/N-ratio, waarbij de hoogste afbraaksnelheid samenhangt met lage ratio's, dus met een relatief hoog stikstofgehalte.

Behalve de samenstelling van het strooisel is voor de afbraaksnelheid ook het microklimaat van invloed (Emmer & Sevink 1994; Tietema et al. 1992). Microklimaatfactoren als temperatuur en vocht zijn zowel gekoppeld aan de eigenschappen van de strooisellaag zelf als aan de vegetatie (Emmer & Tietema 1990). Onder andere de structuur van de opstand en de ondergroei speelt hierbij een rol. Deze wordt naast het vegetatietype (Miles 1985) bepaald door factoren als dichtheid, hoogte en vitaliteit (De Vries et al. 1995). Onder andere door de rol van hoogte en dichtheid kunnen verschillen in afbraak optreden tussen opstanden met verschillende leeftijden.

Tot een bepaalde leeftijd van de opstand zullen zowel afbraaksnelheid als strooiselproductie met de ouderdom van de vegetatie veranderen. Dit heeft uiteraard zijn weerslag in het stofprofiel. Onderzoek naar humusprofielontwikkeling onder den (Emmer & Sevink 1994) gaf een indicatie dat na ongeveer 100 jaar stabilisatie optreedt en de profielopbouw niet significant meer verandert.

Het grootste verschil in strooiseltype is te vinden tussen naald- en loofbomen. Naaldbomen hebben bijvoorbeeld een zuur type strooisel, dat moeilijk afbreekbaar is, zodat over het algemeen een mor-type humus wordt gevormd (Klinka-klassifikatie)(Emmer & Sevink 1994; Besse 1995, Miles 1985). Mor-humusproductie blijkt onder eik en berk op soortgelijk substraat minder uitgesproken te zijn.

2.1.2.2 Atmosferische depositie

Een met betrekking tot verzuring andere belangrijk aspect van vegetatie is de invloed op de input van nutriënten via atmosfeer. Dit zijn zowel directe verbanden, namelijk de opname van atmosferische gassen door bladeren of naalden, ofwel droge depositie, als indirecte verbanden, dat wil zeggen de invloed op doorval van droge en natte depositie. Bij dit laatste speelt is met name de structuur of kroonbedekking van de opstand van belang. Gezien de rol van de structuur van de opstand bij atmosferische depositie van zuren en verzurende stoffen, worden in de bodem onder verschillende type opstanden verschillende hoeveelheden van deze stoffen gevonden (De Vries et al. 1995). De laagste waarden van zuren in de bodemoplossing zijn te vinden onder loofbomen (eik, berk), de hoogste onder spar. Den neemt een middenpositie in. Dit is het gevolg van een lagere droge depositie en evapotranspiratie (De Vries et al. 1995; Raulund-Rasmussen & Vejre 1995).

2.1.2.3 Beworteling

De uitscheiding van H^+ door wortels, wat plaatsvindt bij opname van nutriënten, vormt een bijdrage aan de interne zuurproductie (§ 2.1.1). Het bewortelingspatroon is daarom een belangrijke factor in de relatieve bijdrage van natuurlijke protonproductie aan de totale zuurinput en dus aan de mate van verzuring op verschillende diepten in het bodemprofiel.

Het bewortelingspatroon is afhankelijk van de boomsoort, de vitaliteit, het gedrag van aluminium (bepaald door de verzuringstoestand), de grondwaterstand en het substraat.

2.1.3 Effecten

Bodemverzuring gaat gepaard met een aantal negatieve effecten op de vegetatie. Hierbij speelt aluminium een grote rol. De pH-verlaging die het gevolg is van de grote zuurinput en het doorlopen van de buffertrajecten beïnvloedt in hoge mate de vorm waarin verschillende componenten in de bodem voorkomen. Met name de veranderingen in het gedrag van aluminium leidt hierbij problemen voor de vegetatie (aluminiumtoxiciteit, nutriënttekorten). Ook een belangrijke component in verband met verzuring is stikstof. Deze heeft zowel een verrijkend als een verzurend effect en geeft bovendien, net als aluminium, verstoringen in de nutriëntenhuishouding.

2.1.3.1 Aluminium

Allereerst komen bij kationuitwisseling de door aluminium- en waterstofionen van het adsorptiecomplex verdrongen basen vrij in de bodemoplossing (kationmobilisatie). Op zeer korte termijn zal dit een verhoogde beschikbaarheid van nutriënten voor de vegetatie betekenen. In een humide klimaat en een vrij drainerende bodem zullen deze basen echter binnen afzienbare tijd uitspoelen en de verlaging van de baseverzadiging zal tot aanzienlijke nutriënttekorten voor de vegetatie leiden.

Is de pH laag genoeg voor aluminiumbuffering, dan zal vrij Al^{3+} in verhoogde concentraties in de bodemoplossing komen. Al^{3+} is zeer toxisch voor planten. De aanwezigheid van dit ion beperkt de opnamecapaciteit van de wortels voor basen, waardoor nutriënttekorten verder zullen toenemen.

pH-verlaging is behalve door het effect op aluminiumgedrag ook via mycorrhiza schadelijk voor de vegetatie. Dit houdt verband met de functie van mycorrhiza: waarschijnlijk vormen zij een bescherming voor wortels tegen toxisch Al^{3+} , maar bij lage zuurgraad neemt de hoeveelheid van deze schimmels in de bodem af (Jansen et al. 1990. In: Heij et al. 1991).

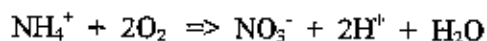
De gevoeligheid van planten voor toxisch aluminium is niet voor alle soorten gelijk. Voor bomen kan bijvoorbeeld gesteld worden, dat eik en den minder gevoelig zijn dan spar (Coppus, 1996).

De hoge concentraties van vrij Al^{3+} in de bodemoplossing leiden uiteindelijk tot afname van het aantal fijne en een toename van het aantal grotere wortels (Murach 1984. In: Mohren 1991). Deze verschuiving lijkt met name verband te houden met een verhoogde Al^{3+}/Ca^{2+} -verhouding bij pH-waarden lager dan 4.0 (Rost-Siebert 1985. In: Heij et al. 1991; Boxman and Van Dijk 1988. In: Heij et al. 1991). Aangezien nutriënten door de fijnere wortels worden opgenomen is verschuiving in de wortelverhoudingen ook een bijdrage aan het nutriëntentekort van de vegetatie.

Overigens kan de schadelijke werking van aluminium verminderd worden bij de aanwezigheid van organische stof. Complexatie van Al^{3+} -ionen met organische verbindingen verlaagt de concentratie vrije ionen in de bodemoplossing

2.1.3.2 Stikstof

De verhoogde depositie van stikstof heeft zowel een verrijkend als een verzurend effect op de bodem. De groei van de Nederlandse bossen is over het algemeen stikstofgelimiteerd, wat inhoudt, dat verhoogde N-beschikbaarheid als gevolg van atmosferische depositie groeibevorderend werkt. Dit geldt zowel voor de boomopstand als de ondergroei. Een bekend voorbeeld hiervan is de dominantie van grassen als *Deschampsia flexuosa* (bochtige smele) of *Molina caerulea* (pijpestrootje) in bossen en op heideterreinen (Ellenberg 1985. In: Heij et al. 1991). Indien na verloop van tijd stikstof niet meer limiterend is, wordt fosfor de beperkende factor. De grotere beschikbaarheid van stikstof komt tevens ten goede aan de microbiële biomassa. Deze is verantwoordelijk voor de afbraak van organische stof en de omzetting van ammonium in nitraat (nitrificatie). Nitrificatie vormt de feitelijke protoninput via atmosferische depositie van stikstof, dat als externe protonbron de grootste bijdrage levert aan de daling van de ZNC en dus verzuring (Verstraten et al. 1989; Verstraten et al. 1990). Bij de (natuurlijke) reactie komen per ammoniumion twee protonen vrij:



In eerste instantie zal de verhoogde beschikbaarheid van stikstof een grotere microbiële activiteit tot gevolg hebben en daarmee versnelde afbraak en extra nitrificatie. Na niet al te lange tijd echter, zal het negatieve effect dat verzuring heeft op het voor afbraak verantwoordelijke deel van de microbiële biomassa, de gunstige invloed van stikstof gaan overheersen. Nitrificatie kan echter tot bij zeer lage pH-waarden doorgaan (Tietema 1992), waardoor uiteindelijk dus geremde afbraak zal gaan optreden.

Naast de verrijkende en verzurende effecten van stikstofdeposities, is de depositie van het ammonium-species verantwoordelijk voor verschuivingen in de nutriëntenbalans. Stikstof kan zowel als nitraat als ammonium door planten worden opgenomen. Opname van NH_4^+ heeft echter de voorkeur, zodat bij verhoogde ammoniumconcentraties de stikstofhuishouding in de vegetatie verstoord raakt. De voorkeur voor NH_4^+ geldt ook ten opzichte van basen. In geval van bodemverzuring zal, net als bij Al_3^+ , zowel de beschikbaarheid van basen als de opnamecapaciteit van planten voor basen, verminderen, waardoor nutriënttekorten (met name fosfor (P), kalium (K) en magnesium (Mg)), kunnen ontstaan (Keltjens & Van Loenen 1989. In: Mohren 1991)

2.1.4 Doorgaande verzuring

Veel processen die leiden tot bodemverzuring zijn redelijk bekend. Op grond van deze kennis kan een voorspelling gedaan worden voor ontwikkelingen in de toekomst (Mohren 1991). Wat er op lange termijn gebeurt met deze processen, bijvoorbeeld nitrificatie, is echter maar tot op zekere hoogte duidelijk.

Het proces van doorgaande verzuring tot in het aluminiumbuffertraject (pH 3.8-4.2) is beschreven in §2.1.1. Daalt de pH tot onder 3.8, dan gaan andere processen spelen. Door de grote oplosbaarheid van aluminium bij $pH < 4.2$ zal na verloop van tijd door uitspoeling de Al-concentratie in de bodemoplossing zakken. Door grotere oplosbaarheid van ijzer bij $pH < 3.8$ zal de Fe-concentratie toenemen. Als gevolg daarvan zou door vorming van ijzerfosfaat en fosfor-aluminiumverbindingen een fosfaatgebrek kunnen gaan optreden (Mohren

1991). In het ijzerbuffertraject zal de pH in de minerale bodem verder dalen tot 2.8-2.9. Verwacht wordt dat door buffering door organische zuren de pH in de organische horizonten niet verder zal afnemen.

Genoemde bodemkundige effecten van verzuring zijn door uitspoeling van buffercomponenten onomkeerbaar. Bij onveranderde depositieniveaus zal de vitaliteit van vegetatie en bodemleven verder geremd worden (Mohren 1991). Speciaal de verstoringen in de nutriëntenhuishouding en de werking van mycorrhizas zou de gevoeligheid van vegetatie voor droogte, plagen, ziekten etc. verder doen toenemen. Bovendien zou bij doorgaande verzuring grotere hoeveelheden nitraat en aluminium in het grondwater terecht kunnen komen. Dit zou nog niet extreem verzuurde gebieden kunnen aantasten en bovendien de kwaliteit van drinkwater kunnen bedreigen (Mulder et al. 1990. In: Mohren 1991).

2.2 Binnenduintrand

De relevantie van de binnenduintrand als studiegebied voor onderzoek naar doorgaande verzuring is tweedelig: de bodems hebben een relatief hoge ouderdom en een lage zuurneutraliserende capaciteit. De hoge ouderdom heeft te maken met de chronologisch opbouw van het Nederlands kustgebied; de lage zuurbuffercapaciteit is gerelateerd aan de arme samenstelling van het moedermateriaal waaruit de duinen bestaan.

In het volgende wordt een verdere uitwerking gegeven van deze twee aspecten en de koppeling met verzuring. Tevens wordt aandacht besteed aan voortgaande verzuring in dit gebied en de aanwijzingen die tot nu tot hiervoor zijn gevonden.

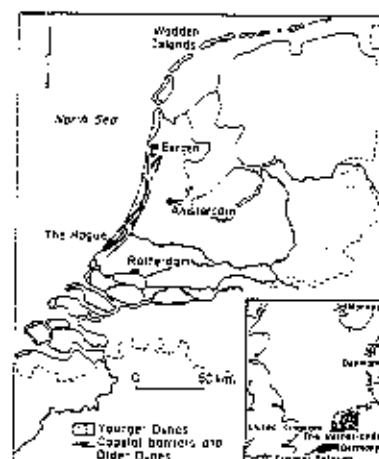
2.2.1 Opbouw en ouderdom

Het Nederlands kustgebied (fig. 1) vertoont een duidelijke sequentie in ouderdom. Deze chronologie ligt nagenoeg parallel aan de kust, waarbij de oudste afzettingen, de strandwallen met de daaropgelegen Oude Duinen, zich het meest oostelijk bevinden; de Jonge Duinen ten westen daarvan dateren van verscheidene latere afzettingsperioden (Klijn 1980; Bakker et al. 1979). De strandwallen en Oude Duinen vormen samen met de vroegere strandvlakten tussen de strandwallen het zogenaamde 'oude duinlandschap'. Onder de binnenduintrand wordt in dit onderzoek de duinen verstaan die zich in het kustgebied het meest landinwaarts bevinden, dat wil zeggen, de strandwallen en Oude Duinen en de oudere Jonge Duinen.

2.2.2 Moedermateriaal

Het moedermateriaal van de duinen is zeer arm aan verweerbare mineralen, waardoor een aantal belangrijke componenten die bijdragen aan snelle zuurbuffering (kleimineralen, amorfe metalen) schaars zijn. Bovendien bevatten zandgronden zeer weinig organische stof, een bestanddeel wat samen met klei de (snelle) kationuitwisselingsbuffer vormt.

Hoewel duinzand over het algemeen als arm kan worden aangeduid, kan het Nederlands duingebied op grond van moedermateriaal in twee districten worden opgedeeld. De zanden van het Waddendistrict (ten noorden van Bergen) zijn relatief het armst, terwijl het Duindistrict ten zuiden van Bergen iets rijker van samenstelling is (Jelgersma et al. 1970; Rozema et al. 1985). De hoeveelheid verweerbare mineralen is van belang, maar vooral ook het kalkgehalte. Kalk is in duinbodems namelijk een zeer belangrijke component die bijdraagt aan zuurbuffering bij hoge pH-waarden (Verstraten et al. 1989; Van der Salm & Verstraten 1993). In het Waddendistrict bevat het zand een primair kalkgehalte van minder dan 2% of soms zelf van minder dan 0.5%. Ten zuiden van Bergen komen veel hogere waarden voor, variërend van 2% tot bijna 10%. De zuidelijke zanden zijn tevens rijker aan ijzer, wat zich uit in ijzerhuidjes rond de zandkorrels en zodoende een zekere bruinkleuring die in het Waddendistrict ontbreekt.



Figuur 1. Het Nederlands kustgebied (De Vries et al. 1994)

Ook binnen de twee districten bestaat een zekere mate van variatie. Texel en Schiermonnikoog hebben binnen het Waddendistrict relatief hoge kalkgehalten (0,5-1,5%) en in het Duindistrict worden ter hoogte van Haarlem hogere waarden gevonden dan op Schouwen en Walcheren (Rozema et al. 1985; Bakker et al. 1979).

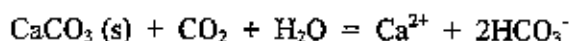
2.2.3 Bodem en vegetatie

De chronologische opbouw van het duingebied is terug te vinden in zowel bodem als vegetatie. De bodems van strandwallen en Oude Duinen worden gekarakteriseerd door diepe uitloging van oplosbare bodembestanddelen (voornamelijk kalk)(Klijn 1981). In de Jonge Duinen is de periode van bodemontwikkeling te kort geweest voor dergelijke verarming. Met de west-oost sequentie in leeftijd van het oppervlak is de bodem beter ontwikkeld (ontkalking, humusprofielontwikkeling) en bevindt de vegetatie zich in een later stadium van successie, wat vooral loofbos zou zijn (eik, beuk). In de lager gelegen, nattere strandvlakten tussen de strandwallen heeft zich veenvorming voorgedaan.

De verstuiwings- en rustfasen die voorkwamen tijdens de vorming van de Oude Duinen zijn terug te vinden in de bodemprofielen in dit gebied. Deze zijn opgebouwd uit afwisselingen in zandlagen en dunne humeuze of veenlaagjes, waarbij deze laatsten corresponderen met periode van stabiliteit (Klijn 1981).

Ontkalking

Een belangrijk bodemkundig proces dat in de duinen plaatsvindt en waarin een ouderdomstrend in terug te vinden is, is de uitspoeling van kalk uit de bovengrond (Van Breemen & Protz 1988; Rozema et al. 1985; Bakker et al. 1979; Klijn 1981). Ontkalking is het proces van in oplossing gaan van calciumcarbonaat:



Het gemakkelijk oplosbare CaCO_3 houdt de pH van kalkrijke bodems hoog. Hierdoor kan CO_2 als zuurbron fungeren. Dit is gezien het primair kalkgehalte uiteraard vooral het geval ten zuiden van Bergen. In de oudere bodems is pas dieper in de ondergrond kalk terug te vinden (Besse 1995), soms zelfs pas in het diepere grondwater (Dopheide & Verstraten 1990/1995), terwijl in jongere bodems het kalkhoudende moedermateriaal zich dicht onder het oppervlak bevindt. Over het algemeen zijn de zandige bodems in de hogere delen van de binnenduintrand dieper ontkalkt; in de venige bodems in de lagere delen (de vroegere strandvlakten) is de ontkalking minder ver (Klijn 1981).

Menselijke invloed

Hoewel de chronologische trends wel terug te vinden zijn, moet opgemerkt worden, dat de mens een enorme invloed heeft gehad op bodem en vegetatie. Theoretisch ontwikkelen zich in een dergelijk duinmilieu op de hogere droge delen podzolen, maar in Nederland zijn grote delen van de oudere duinen en strandwallen (al dan niet natuurlijk) verstoven, afgegraven, omgespit of verrijkt met humeus materiaal. In deze gevallen is er van natuurlijke bodemontwikkeling geen sprake en is een volledig podzolprofiel niet meer terug te vinden (Sevink 1991; Dopheide & Verstraten 1990/1995). Ook de vegetatie is in de meeste gevallen niet natuurlijk. In beginsel zijn alle bossen in het duingebied aangeplant en bovendien zijn veel van de eikenbossen in het verleden gebruikt voor het verkrijgen van hakhout. Door de afvoer van hout werd zowel de structuur van de opstand aangetast, als de nutriëntenvoorraad in het bodem-vegetatie-systeem. Toch kunnen zij tot op grote hoogte in een natuurlijke toestand verkeren (Doing 1962).

2.2.4 Verzuring

Vanwege de lage buffercapaciteit en de grote ouderdom kan de binnenduintrand (strandwallen en Oude Duinen, maar ook de oudere Jonge Duinen) gezien worden als voorbeeld voor de toestand welke in de toekomst bij voortgaande verzuring zal ontstaan in de stuif- en dekzandbodems van het Pleistoceen.

De natuurlijke ontkalking van de bovengrond (§ 2.2.3) houdt in, dat een grote pool van zuurbuffering kleiner wordt en dat de pH daalt. De silicaatbuffer speelt door lage verwerkingssnelheden van silicaten nauwelijks een rol en door het ontbreken van bodemcomponenten die bijdragen aan de vorming van het adsorptiecomplex is de kationuitwisselingscapaciteit zeer laag. Hierbij komt de zuurbuffering in het aluminiumbuffertraject of wellicht in het traject van ijzerbuffering.

De lage zuurneutraliserende capaciteit die het gevolg is van de van nature arme samenstelling van duinbodems, wordt bovendien nog versterkt door de grote doorlatendheid van het materiaal (Verstraten et al. 1989). De korte contactperiode tussen water en vaste fase die met grote doorlatendheid gepaard gaat, maakt dat een groot deel van de potentiële ZNC niet bijdraagt aan de zuurbuffering.

Verzuring is in duinbodems dus een natuurlijk tendens die sterk gekoppeld is aan het stadium van ontkalking en daarmee aan de ouderdom van de bodem. Als door atmosferische depositie de zuurinput stijgt, zal het systeem eerder door de buffering heen zijn en sneller 'doorslaan'. Overigens kan worden tegengesproken dat de verhoogde zuurinput van de laatste decennia het ontkalkingsproces, wat de buffering bij hoge pH's vormt, versneld wordt (Verstraten et al. 1989). Zonder externe zuuraanvoer zou namelijk de concentratie van CO₂, wat onder natuurlijke omstandigheden als zuurbron dient, hoger zijn. Bij een verhoogde externe zuurinput verloopt de zuuraanvoer dus hoogstens anders, maar is niet per definitie hoger.

Op grond van de samenstelling van het moedermateriaal mag worden verwacht, dat de versnelde verzuring bij pH's lager dan 6.2 in de duinen ten noorden van Bergen al eerder worden bereikt.

Bij onderzoek naar verzuring in de binnenduinstrand moet met een aantal dingen rekening worden gehouden. Ten eerst heeft de mens in de binnenduinstrand een belangrijk effect op bodem en vegetatie gehad en moet aandacht besteed worden aan het *beheersverleden*. De aanvoer van nutriënten in perioden van landbouw bijvoorbeeld (opbrenging van organische stof) compenseert de verarmende effecten van verzuring. De afgraving van de bovenste bodemlagen of het gebruik van bossen voor brandhoutvoorziening (hakhoutcultuur) heeft juist een extra verarmend effect.

In verband met verzuring moet ook het voorkomen van zogenaamd 'blond zand' worden genoemd. Er zijn aanwijzingen (Besse, 1995) dat de aanwezigheid van deze compactere zandlaag in de ondergrond beworteling belemmert en daarmee het verloop van verzuring in het bodemprofiel beïnvloedt. Ook grondwaterbeweging is een factor waar rekening mee moet worden gehouden. Kwel uit kalkrijkere zones kan bijvoorbeeld de samenstelling van de bodemoplossing in reeds verzuurde gronden beïnvloeden (Dopheide & Verstraten 1995).

2.2.5 Verzuring op lange termijn

Dat verzuring in een vergevorderd stadium kan zijn, is reeds aangetoond door Dopheide & Verstraten (1990/1995) en Besse (1995). Buiten deze gebieden (Amsterdamse Waterleidingduinen, Haarlemmerhout, Schoorl) zijn er weinig gegevens bekend. Hiervoor kan op basis van bestaande kennis over verzuring wel een indicatie gegeven worden van de ontwikkeling van verzuring in de tijd. In het onderstaande wordt voortgaande verzuring in het Nederlands duingebied zoals is berekend door De Vries et al. (1994) besproken. Daarop volgt een toelichting op enige gegevens uit verschillende delen van de duinen, welke enig inzicht kunnen geven in de verzuringstoestand zoals die daadwerkelijk kan worden aangetroffen

2.2.4.1 Modelmatig

In het kader van het Dutch Priority Programme on Acidification is een model ontworpen om de lange-termijn effecten van zure depositie op Nederlandse bosbodems te kunnen voorspellen (De Vries et al. 1991/1994). Het Regional Soil Acidification Model (RESAM) beschrijft veranderingen in bodemchemie, zowel in de vaste als in de vloeibare fase, als gevolg van natuurlijke en door de mens in gang gezette verzurende processen.

Wat er gebeurt bij voortgaande verzuring is voor duinbodems berekend door De Vries et al. (1994). Met RESAM zijn deze berekeningen voor zowel kalkloze als kalkhoudende bodems gedaan. Bij deze situaties werd uitgegaan van een jonge (lage) duinvegetatie op een jonge bodem.

Volgens de berekeningen geldt voor kalkhoudende gronden, dat in 2025 (na ca 28 jaar) de carbonaatbuffer zal zijn uitgeput. Vanaf het oppervlak is dan vrijwel alle kalk uitgespoeld en door de lage CEC daalt de pH (fig. 2) zeer snel van 6,5 naar 4,5 (de silicaatbuffer is een langzaam mechanisme en draagt door gebrek aan verweerbare silicaten niet significant bij aan zuurbuffering). Hiermee komt het systeem in het aluminiumbuffertraject. De concentratie basen neemt sterk af en de concentratie zuur sterk toe (fig 3). Vanwege de lage hoeveelheden aluminiumhydroxiden in het moedermateriaal zal het systeem ook snel (na nog eens 25 jaar) door de aluminiumbuffer heen zijn en de pH zal dalen tot even boven 3.0.

Met de lage primaire aluminiumgehalten blijft de Al³⁺/Ca²⁺ -ratio beneden de kritische grens. De NH₄⁺-concentraties stijgen wel iets, maar bereiken evenmin kritische waarden.

De processen in kalkdoze bodems, die zich bij aanvang al in in het aluminiumtraject bevinden, worden bij gebrek aan carbonaatbuffer gekenmerkt door uitspoeling van aluminiumhydroxiden, wat gepaard gaat met een sterke pH-daling van 4.0 naar onder 3.5.

2.2.4.2 Praktijkonderzoek

Voor de duinen bij Schoorl, in de Amsterdamse Waterleidingduinen en in de Haarlemmerhout zijn gegevens over de verzuringstoestand bekend. Schoorl betreft welliswaar jongere duinen met een korte vegetatie, maar is door het arme substraat sterk verzuurd. De gegevens van de Waterleidingduinen en de Haarlemmerhout zijn van oudere duinen van rijker materiaal.

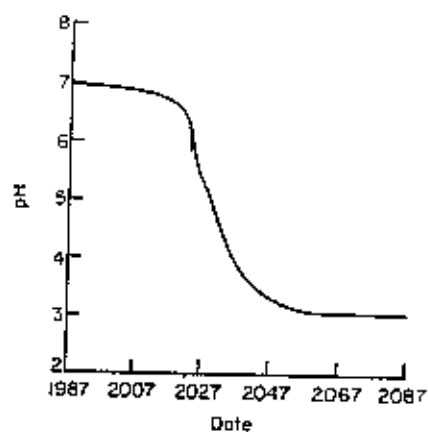
Schoorl (Dopheide & Verstraten 1995)

Dat het moedermateriaal in Schoorl een arme samenstelling heeft blijkt wel uit de gegevens over de effectieve kationuitwisselingscapaciteit (CEC_{eff}). Behalve de bovengrond liggen de waarden tussen 3 en 4 mmol/kg. De baseverzadiging komt in de ondergrond nauwelijks boven de 20%. 50% van het adsorptiecomplex is bezet door H^+ , wat betekent dat het adsorptiecomplex sterk verzuurd is. Deze waarden komen overeen met de waarden van De Vries.

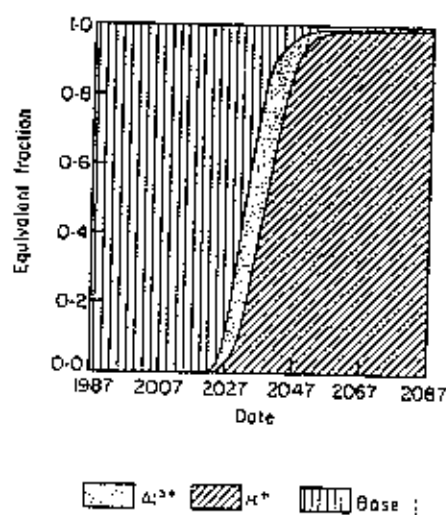
De verzuringstoestand blijkt uit de pH-curves (fig. 4) en gegevens over de ZNC. De bovengrond is zeer zuur en bevindt zich in het ijzer-aluminiumbuffertraject. De ondergrond heeft nog net de aluminiumbuffer niet bereikt, maar Al^{3+}/Ca^{2+} -ratio's variëren tussen de kritische en zeer kritische waarden. De snelle zuurbuffering (ZNC_f), dwz de buffering door kalk, het adsorptiecomplex en de amorfe metalen, is zeer laag (1500 mol/ha/cm in de organische horizonten tot 3000 mol/ha/cm in het C-materiaal). De waarden per cm grond zijn van dezelfde orde van grootte als de atmosferische waarden van potentieel zuur in dergelijke lage vegetaties, waardoor in de Schoorise duinen de chemische samenstelling van de bodemoplossing bepaald wordt door de samenstelling van de doorval en niet door de samenstelling van het adsorptiecomplex en de aanwezigheid van verweerbare mineralen. Dat betekent dat de komende decennia bij gelijkblijvende depositiewaarden van atmosferisch zuur de ZNC_f van de bovengrond uitgeput zal raken. De pH-waarden van het bodemwater in de minerale horizonten zullen tot beneden 3.5 dalen. Dit is in overeenstemming met voorspellingen van De Vries.

Amsterdamse Waterleidingduinen (Dopheide & Verstraten 1995, Besse 1995)

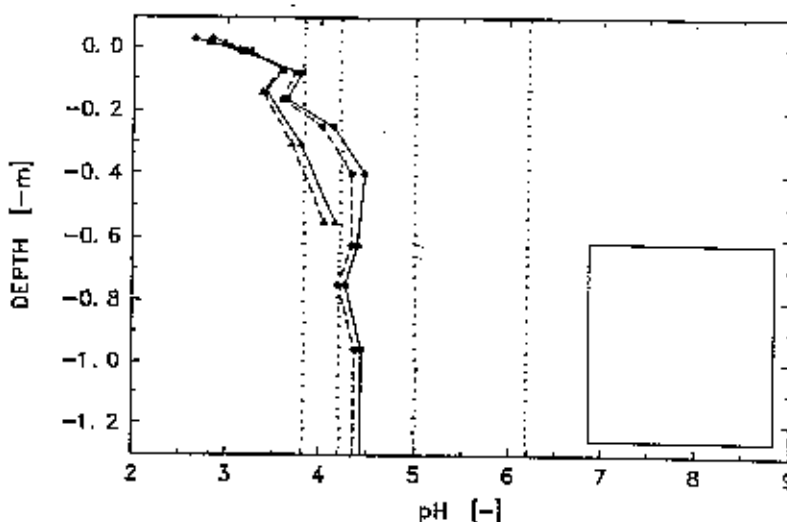
In de Amsterdamse waterleidingduinen zijn zes plaatsen onderzocht, waarvan drie in de



Figuur 2. pH-verloop in de tijd: vaste fase van A₁-horizont in kalkrijke duinbodem (De Vries et al. 1994).



Figuur 3. Verloop in de tijd van equivalente fracties H^+ , Al^{3+} en basen: vaste fase A₁-horizont in kalkrijke duinbodem (De Vries et al. 1994).



Figuur 4. pH-verloop in profielen in de duinen bij Schoorl (Naar: Dopheide & Verstraten 1995).

Oude Duinen en drie in de oudere Jonge Duinen. Hiermee kan een goede vergelijking gegeven worden voor verzuring in bodems met verschillende ouderdom. Van de zes lokaties zijn er vijf gelegen in eikenbossen en een in een opstand van zwarte den (oudere Jonge Duinen).

Uit de analyses blijkt de voedingsarme toestand van het moedermateriaal: de lage CEC_{eff} van het materiaal (± 8 mmol/kg) en de lage baseverzadiging van de ontcalcite horizonten (15-20%). Voor alle bodems geldt, dat de pH (fig. 5) in de ectorganische horizonten zeer laag is en de bodem zich hier in het Fe/Al-bufferttraject bevindt. Voor zover er geen kalk aanwezig is, heeft de pH_{act} waarden van tussen de 4.0 en 4.5 en wordt zuur gebufferd door de Al-buffer. Ontkalking en verzuring gaan in de bodems van de Oude Duinen door tot in het bovenste grondwater. In het hele profiel kan op grond van de Al^{3+}/Ca^{2+} -ratio gesteld worden dat Al een stressfactor is. In het C-materiaal en het bovenste grondwater is het zelfs boven de zeer kritische waarde.

In de kalkhoudende ondergrond van de Jonge Duinen stijgt de pH snel. Indien de overgang enigszins geleidelijk verloopt, vindt er behalve carbonaatbuffering ook buffering door het adsorptiecomplex of silicamineralen plaats.

De capaciteit voor snelle zuurbuffering (ZNC_T) die voor enkele profielen in zowel Oude als Jonge Duinen zijn

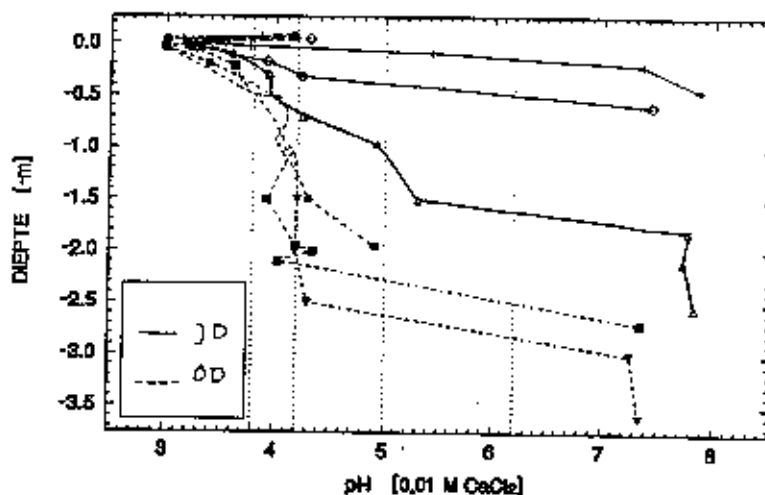
berekend, zijn afgezien van aanwezig kalk laag en verschillen onderling niet veel. De grote bijdrage van kalk aan de zuurbuffering blijkt uit figuur 6, waarin de buffering door kalk en het adsorptiecomplex is weergegeven.

Haarlemmerhout (Dopheide & Verstraten 1990, Verstraten et al. 1990)

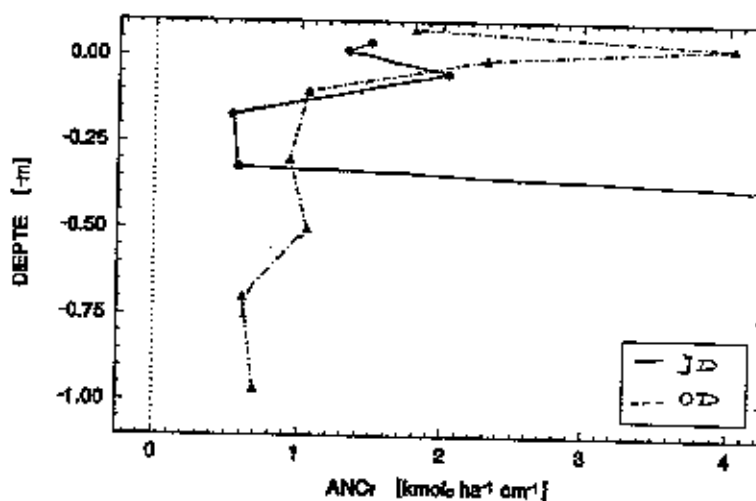
Uit de gegevens uit de Haarlemmerhout komen voor de Oude Duinen een gelijke situatie naar voren. De CEC , de pH_{act} , de baseverzadiging en de Al^{3+}/Ca^{2+} -ratio's liggen voor de Haarlemmerhout in dezelfde orde van grootte als in de Waterleidingduinen. De ratio's van ammonium en de verschillende kationen zijn nog niet te hoog. Dit laatste is in overeenstemming met de door De Vries berekende waarden. Het heeft waarschijnlijk te maken met de in de bodem optredende nitrificatie. Overigens heeft de mens in vrijwel het gehele gebied het profiel verstoord. De bodem is sterk vergraven en door opbrenging van organisch materiaal komen eerdgronden voor, waarin verzuring minder extreem is.

Conclusie

Worden de Oude Duinen en de Jonge Duinen vergeleken, dan blijken de oude bodems, gezien de ontcalcingsdiepte, dus het meest verzuurd. Hierbij valt op, dat de pH-waarden en de ZNC_T -waarden in



Figuur 5. pH-verloop in profielen van de Amsterdamse Waterleidingduinen. JD = Jonge Duinen, OD = Oude Duinen (Naar Dopheide & Verstraten 1995).



Figuur 6. Buffering door kalk en het adsorptiecomplex voor profielen in de Amsterdamse Waterleidingduinen. JD = Jonge Duinen, OD = Oude Duinen (Naar Dopheide & Verstraten 1995).

ontkalkte bodems sterk overeenkomen. Dit duidt erop dat de bodems inderdaad slechts verschillen in ontwikkelings stadium (Dopheide & Verstraten 1995). De waarden voor de zuurneutraliserende capaciteit zijn dermate laag dat uitputting van de bufferpools binnen enkele decennia te verwachten is. In dat geval wordt de chemische samenstelling van de bodemoplossing bepaald door externe factoren (atmosferische depositie in samenhang met meteorologische condities). In de primair kalkarme Jonge Duinen van Schoorl is dat dus al het geval.

3 Werkwijze

In dit hoofdstuk wordt een nadere uitwerking gegeven van de werkwijze die bij het onderzoek gehanteerd wordt. Hierbij wordt ingegaan op de onderzoeksvragen, de benadering van het probleem, de onderzoeksmethoden en -technieken en de tijdsplanning.

3.1 Vraagstelling

Uit de doelstelling van het onderzoek vloeit een centrale vraagstelling voort:

Wat is de bodemkundige situatie in de binnenduinrand in relatie tot verzuring, in afhankelijkheid van substraat, vegetatie en ouderdom van het oppervlak?

Voordat op deze vraagstelling wordt ingegaan, moet allereerst het gebied van onderzoek nader worden vastgesteld. Vervolgens wordt voor verschillende aspecten (substraat, bodem en vegetatie) het gebied geïnventariseerd. Bij de keuze van parameters binnen de onderwerpen substraat, bodem en vegetatie wordt rekening gehouden met de in hoofdstuk 2 behandelde onderlinge interacties die van invloed zijn op de verzuringstoestand. Uiteindelijk worden de verschillende geïnventariseerde onderdelen gekoppeld en wordt getracht tot een beschrijving te komen van trends binnen het gebied.

3.1.1 Gebiedsafbakening

Met de volgende vraag:

1) *Waar ligt de binnenduinrand en hoe is deze opgebouwd?*

wordt het onderzoeksterrein binnenduinrand afgebakend. Geologie en ouderdom van het oppervlak zijn de aspecten die de binnenduinrand als zodanig karakteriseren. Tevens wordt aandacht besteed aan de invloed van menselijk ingrijpen op de bodem, waaronder opbrenging van organische lagen, afgraving, egalisering en landbouw.

3.1.2 Karakterisering binnenduinrand

Om de bodemkundige situatie in afhankelijkheid van substraat, vegetatie en ouderdom van het oppervlak te kunnen beschrijven, wordt op gebied van substraat, bodem en vegetatie het gebied gekarakteriseerd. Drie deelvragen vormen de aanleiding tot een inventarisatie van de binnenduinrand voor wat betreft deze aspecten:

2) *Wat is de situatie in de binnenduinrand voor wat betreft substraat?*

3) " " " *bodem?*

4) " " " *vegetatie?*

2) Substraat

Hierbij wordt ingegaan op de geologische verscheidenheid die binnen het onderzoeksgebied wordt aangetroffen. Het gaat om verschillen in samenstelling van het moedermateriaal tussen het Waddendistrict en het Duindistrict en binnen de districten. Hierbij komt met name het kalkgehalte aan de orde, maar ook de verdere mineralogische samenstelling.

3) Bodem

De inventarisatie van de bodemkundige situatie is tweedelig:

3a) Bodemtype

Dit betreft een eerste inventarisatie van de voorkomende bodemtypen zoals deze zijn aangegeven op bodemkaarten en de ouderdom van het oppervlak waarin bodemvorming is opgetreden.

3b) Bodemkarakteristieken

Dit omvat meer specifieke bodemkundige kenmerken. Aspecten waaraan hierbij aandacht moet worden besteed zijn:

- 3b1) Ouderdom
- 3b2) Ontkalkingsdiepte
- 3b3) Humusvorm
- 3b4) Bewortelingspatroon
- 3b5) Chemische samenstelling, waaronder:

- pH

Zoals in § 2.1 is uitgelegd heeft de pH een direct schadelijk effect op de vegetatie, maar is bodemverzuring vooral een probleem van aluminiumtoxiciteit en een verstoorde nutriëntenhuishouding. De pH is dus niet een directe maat voor verzuring, maar een van de belangrijkste parameters die een indicatie zijn voor de verzuringstoestand.

- Nutriënten

Als indicatie voor nutriëntbeschikbaarheid en aluminiumtoxiciteit in relatie tot verzuring wordt veelal gebruik gemaakt van aluminium : kation-ratio's, vooral Al^{3+}/Ca^{2+} . Deze zullen in geval van verzuring relatief hoog zijn. Hetzelfde geldt voor ammonium en het beperkende effect op opname van een aantal ionen. Hiervoor zijn ammonium : kation-ratio's indicatief, met name NH_4^+/K^+ , NH_4^+/Mg^{2+} en NH_4^+/P .

- Organisch C, totaal N, totaal P

Samen de C/N-ratio en C/P-ratio die een indicatie geven van de afbraaksnelheden van organische stof en de beperkende factor hierin.

- ZNC

De verzuringstoestand is een maat voor de zuurneutraliserende capaciteit van een bodem(horizont). De betreffende bodemhorizont. Deze is afhankelijk van de gekozen referentie pH, en in mindere mate de temperatuur, de ionsterkte en specifieke activiteiten van ionen in de bodemoplossing.

4) Vegetatie

Bij de inventarisatie van de (semi-natuurlijke) vegetatie, waarbij het accent ligt op bosvegetaties, wordt gekeken naar de volgende aspecten:

- 4a) Vegetatietype
- 4b) Leeftijd van de opstand
- 4c) Beheersverleden

Tevens kan aandacht worden besteed aan de groei en vitaliteit in verband met de negatieve effecten van verzuring hierop

De onderwerpen die hier genoemd worden, vormen een richtlijn voor de inventarisatie. In hoeverre de onderdelen worden gebruikt voor de trendbeschrijving is afhankelijk van de beschikbaarheid van deze gegevens.

3.1.3 Trendbeschrijving

Voor een complete beantwoording van de centrale vraagstelling, worden de voorgaande onderdelen gekoppeld:

- 5) *Wat is de koppeling tussen de verschillende aspecten waarnaar in het voorgaande gekeken is?*
Ofwel, wat is de situatie in het gebied en zijn er trends te onderscheiden in bodemkundige kenmerken, als functie van de samenstelling van het moedermateriaal, de ouderdom van de bodem en het type, de leeftijd en het beheersverleden van de vegetatie?

3.2 Benadering

Het onderzoek verloopt in twee fasen, te weten een inventarisatie van bestaande gegevens en een vervolgonderzoek. De inhoud van de tweede fase hangt af van de uitkomsten van de eerste fase.

3.2.1 Fase 1: Inventarisatie van bestaande informatie

De inventarisatie van de bodemkundige situatie wordt in de eerste plaats gebaseerd op bestaande informatie. Hiertoe wordt alle mogelijke informatiebronnen afgegaan om gegevens over het gebied te verzamelen. Van de verzamelde gegevens zal een selectie plaatsvinden op basis van bruikbaarheid. Vervolgens worden de bruikbare gegevens zoveel mogelijk verwerkt in een GIS (Geografisch Informatie Systeem).

3.2.2 Fase 2: Vervolgonderzoek

De volgende stap in het onderzoek is afhankelijk van de aard van zowel de gewenste als de bruikbare gegevens. Pas als er inzicht is in welk materiaal er voor handen is, kan worden beslist of de analyse met bestaande gegevens kan worden uitgevoerd, of dat verdere gegevens nodig zijn voor een betrouwbare analyse. Afhankelijk van de uitkomst van deze vraag zijn er twee scenario's voor verder verloop van het onderzoek.

Scenario 1: Indien er genoeg informatie lijkt te zijn voor een redelijk betrouwbare uitspraak, zal op basis hiervan een analyse worden uitgevoerd om tot een trendbeschrijving te komen. Aanvullend zal de betrouwbaarheid van de uitgevoerde analyse in het veld worden getoetst.

Scenario 2: Indien blijkt dat de informatie niet toereikend is, wordt in het veld aanvullende informatie verzameld om tot een completer beeld te komen van de heersende situatie. Bij de analyse die daarna alsnog wordt gedaan, wordt gebruik gemaakt van zowel de bestaande informatie als van de informatie die direct uit het veld verkregen is. Met het combineren van de bestaande en nader te verzamelen gegevens zal een beter inzicht worden verkregen in de huidige bodemkundige en vegetatieve toestand van de binnenduinrand.

Hoe het veldonderzoek eruit komt te zien, is afhankelijk van de bestaande gegevens en zal dan ook pas verder vorm krijgen na een inventarisatie van de omvang en bruikbaarheid van beschikbaar materiaal.

3.3 Onderzoeksmethoden en -technieken

Aangezien het grootste gedeelte (fase 2) van het onderzoek afhangt van het verloop van het eerste stadium (fase 1) kan geen volledig beeld gegeven worden van de te gebruiken onderzoeksmethoden en -technieken. De hieronder beschreven methoden en technieken met betrekking tot gegevensverzameling en -verwerking is daarom slechts een indicatie.

3.3.1 Verzameling gegevens

Fase 1: Inventarisatie van bestaande informatie

Voor het verzamelen van bestaande informatie zal gebruik worden gemaakt van de op de UvA beschikbare informatie in de vorm van kaarten (geologie, geomorfologie, bodem) en onderzoeksrapporten (oa Dopheide & Verstraten 1990/1995; Besse 1995). Daarnaast zullen in samenwerking met Jorien van Blom instanties worden benaderd die het beheer voeren over de terreinen die binnen het onderzoeksgebied liggen (bijv. Amsterdamse Waterleidingduinen, Provinciaal Waterleidingbedrijf Noord-Holland).

Niet al de verzamelde informatie zal gebruikt worden. Er zal een selectie plaats vinden op basis van bruikbaarheid, wat afhankelijk is van verschillende factoren.

Een eerste factor die van belang is, is de datum waarop gegevens zijn verzameld. Hoe belangrijk de ouderdom van data is voor de bruikbaarheid ervan hangt samen met de snelheid waarmee deze parameter kan veranderen in de tijd. Hierdoor is de bruikbaarheid van gegevens in relatie tot ouderdom per parameter verschillend. Vegetatie bijvoorbeeld is een variabele die aan snellere verandering onderhevig is dan moedermateriaal, zodat de gegevens hierover die gebruikt zullen worden voor de analyse van recentere datum zullen moeten zijn.

De spreiding van data, oftewel de mate waarin gegevens voor het hele of een gedeelte van het gebied bekend zijn, is een ander belangrijk punt. Het zou kunnen voorkomen dat indien gegevens over een bepaalde variabele niet voor het gehele gebied bekend zijn, de wel voor handen zijnde data volledig buiten beschouwing gelaten zullen moeten worden.

Soortgelijke problemen met betrekking tot bruikbaarheid zullen betrekking hebben op factoren als schaal, observatiedichtheid, relevantie. Meer gecompliceerde problemen zijn de nauwkeurigheid van de data. Dit betreft zowel onnauwkeurigheden in meting (bijv. de nauwkeurigheid van de ruimtelijke positie), als onnauwkeurigheden als gevolg van eerdere bewerking (bijvoorbeeld van kaartbeelden). De vraag is in hoeverre die te achterhalen zijn en bovendien of er tijd is om dit na te gaan.

Een meer praktisch probleem bij gebruik van bestaande data is, indien gegevens in digitale vorm verkregen worden, het geleverde format.

Fase 2: Vervolgonderzoek

Afgewacht moet worden welke informatie reeds in de vorm van rapporten en kaarten beschikbaar is en welk scenario wordt gekozen. Gedacht kan worden in het leggen van transecten door het onderzoeksgebied.

Voor het uitwerken van het vervolgonderzoek moet bij beide scenario's rekening gehouden worden met de verhoudingen tussen de aantallen monsters en analyses. Binnen de beschikbare tijd zal gekozen moeten worden tussen veel monsters waarvan algemene variabelen worden bepaald (pH, C/N, P, baseverzadiging), of weinig monsters zodat uitgebreidere analyses kunnen worden uitgevoerd (verzuringstoestand, samenstelling moedermateriaal). In geval van scenario 1 is de keuze afhankelijk van de uitkomsten van de analyses van bestaande gegevens, bij scenario 2 wordt de keuze bepaald door de hoeveelheid en het type informatie dat ontbreekt voor het uitvoeren van een betrouwbare analyse.

3.3.2 Verwerking gegevens

De gegevensverwerking is zeer grote mate afhankelijk van de hoeveelheid en de aard van de bestaande bruikbare informatie, het scenario van vervolg onderzoek dat wordt gekozen en de gegevens die uit dit vervolgonderzoek voortkomen.

Het verwerken van gegevens voor de trendbeschrijving, dat wil zeggen data uit fase 1 en fase 2 scenario 2, zal bestaan uit het aanleggen van een GIS. Hierbij worden alle vormen van informatie (kaartmateriaal, puntgegevens uit het onderzoek etc.) zoveel mogelijk bijeengebracht. De hoeveelheid, compleetheid, spreiding etc. zijn bepalend voor de verdere bewerking van gegevens (bijv. extrapolatie van gegevens van deelgebieden naar grotere arealen, generalisatie, middeling etc.) en de analyse technieken die vervolgens op de data worden toegepast (overlay, herklassificering). Bij de trendbeschrijving zal gestreeft worden naar het vervaardigen van een *ruimtelijk* beeld voor de verschillende situaties in de binnenduinstrand, waarbij de verschillende onderwerpen (substraattypen, ontkalkingsdiepte, vegetatietypen, ouderdom opstand, bodemkarakteristieken etc.) in aparte bestanden en kaartbladen worden ondergebracht. Op deze manier kunnen de facetten van de beschrijving op alle mogelijke manieren aan elkaar kunnen worden gekoppeld, zodat als het ware een matrix waarin de onderlinge relaties worden weergegeven.

In Fase 2 Scenario 1 zullen puntgegevens uit het veld aan de ruimtelijke beschrijving worden getoetst. Hierbij wordt ingegaan op de statistische waarde van het ruimtelijke beeld, de veldgegevens en de koppeling hiertussen.

Bijkomstig zal een database worden aangelegd van behorende instanties in de binnenduinstrand.

3.4 Werkplan

De twee onderzoeksfases kunnen worden opgedeeld in verscheidene stappen. Het verloop van de tweede fase van het onderzoek is voor beide scenario's uitgewerkt.

| | | Tijd (weken) | Periode |
|------------|--|-----------------|----------------|
| Fase 1: | Inventarisatie van bestaande gegevens | (5.5) | 18 nov-24 dec |
| | Stap 1: Afbakening onderzoeksgebied | 0.5 | |
| | Stap 2: Zoeken van beheerders, maken van afspraken | 0.5 | |
| | Stap 3: Verzameling gegevens beheerders | 2 | |
| | Stap 4: Coördinatie alle data, voorlopige analyse en scenariokeuze | 2.5 | |
| | - Check geologische kaarten (1:50.000) - Check bodemkaarten (1:50.000) - Check kaarten beheerders - Inventarisatie overige gegevens | | |
| Fase 2: | Vervolgonderzoek | (15.5) | |
| Scenario 1 | Stap 2: Verdere dataverwerking en analyse (trendbeschrijving op basis van bestaande gegevens) | 2.5 | 30 dec-31 jan |
| | Stap 3: Uitwerking vervolgonderzoek | 1 | 3 feb-14 feb |
| | - Transectselectie - Keuze variabelen en analysemethoden - Opzet bemonsterings- en monster-analyseschema's en financieel budget - Uitwerken dataverwerking (statistische aspecten, aard van de data-analyses) | | |
| | Stap 4: Gegevensverzameling | 3 | 17 feb-28 mrt |
| | - Monstername (veldwerk) - Monsteranalyse (labwerk) | | |
| | Stap 5: Dataverwerking (toesting trendbeschrijving stap 2 aan veldgegevens stap 4) | 2 | 31 mrt-18 apr |
| | Stap 6: Rapportage | 7 | 21 apr- 6 juni |
| Scenario 2 | Stap 2: Uitwerking vervolgonderzoek | 1 | 30 dec-10 jan |
| | - Transectselectie en keuze variabelen en analysemethoden - Opzet bemonsterings- en monster-analyseschema's en financieel budget - Uitwerking dataverwerking (statistische aspecten, aard van de data-analyses) | | |
| | Stap 3: Gegevensverzameling | 4 | 13 jan-7 mrt |
| | - Monstername (veldwerk) - Monsteranalyse (labwerk) | | |
| | Stap 4: Dataverwerking | 3.5 | 10 mrt-18 apr |
| | - Integratie bestaande en veldgegevens - Trendanalyse | | |
| | Stap 5: Rapportage | 7 | 21 apr- 6 juni |

4 Literatuur

- Bakker, T.W.M., J.A. Klijn & F.J. van Zadelhoff (1979). Duinen en duinvalleien - Een landschapsecologische studie van het Nederlandse duingebied. Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie, Wageningen, p 13-90.
- Bakker, T.W.M., J.A. Klijn & F.J. van Zadelhoff (1981). Nederlandse kustduinen; Landschapsecologie. Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie, Wageningen.
- Besse, M. (1995). Bodemonderzoek in dennenbossen en eikenbossen in de Amsterdamse Waterleidingduinen; inventariserend onderzoek naar de relatie tussen humusprofiel, bodem en vegetatie Rapport Oeco-Hydrologisch Onderzoek, GWA/FGBL-UvA, 66 pp.
- Coppus, R. (1996). The effects of a reduced groundwater withdrawal on the vitality of oak forest in the Amsterdam Waterworks dunes. In prep.
- De Boer, W., P.J.A. Klein Gunnewiek, S.R. Troelstra & H.J. Laanbroek. (1989). Two types of chemolithotrophic nitrification in acid heathland humus. *Plant and Soil* 119(2) p 229-235.
- De Vries, W. (1994). Soil response to acid deposition at different regional scales. Field and laboratory data, critical loads and model predictions. Thesis. Wageningen.
- De Vries, W., J. Kros, C van der Salm & J.C. Voogd (1991). Effects on forest soils. In: Heij, G.J. en T. Schneider (eds), 1991. Acidification research in the Netherlands. Final report of the Dutch Priority Programme on Acidification. Studies in Environmental Science, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, p 169-178.
- De Vries, W., J.A. Klijn & J. Kros (1994). Simulation of the long-term impact of atmospheric deposition on dune ecosystems in the Netherlands. *Journal of Applied Ecology* 31, p 59-73.
- De Vries, W., J.J.M. van Grinsven, N. Van Breemen, E.E.J.M. Leeters & P.C. Jansen (1995). Impacts of acid deposition on concentrations and fluxes of solutes in acid sandy forest soils in the Netherlands. *Geoderma* 67, p 17-43.
- Doing, H. (1962). De buitenplaatsen en bossen langs de binnenduinrand van Noord- en Zuid-Holland. *Natuur en landschap* no. 4, p 261-279.
- Dopheide, J.C.R. & J.M. Verstraten (1990a). De Haarlemmerhout: I Algemene fysiografie en vegetatietoestand. Rapportnummer 42A, Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 17 pp.
- Dopheide, J.C.R. & J.M. Verstraten (1990b). De Haarlemmerhout: II. Bodempatroon, bodemfysische en bodemchemische eigenschappen. Rapportnummer 42B, Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 38 pp.
- Dopheide, J.C.R. & J.M. Verstraten (1990c). De Haarlemmerhout: III. Atmosferische depositie; niveau's en potentieel verzurende stoffen. Rapportnummer 42C, Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 9 pp.
- Dopheide, J.C.R. & J.M. Verstraten (1990). De Haarlemmerhout: V. Stressfactoren en herstelmaatregelen in een oud stadsbos. Rapportnummer 43, Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 16 pp.
- Dopheide, J.C.R. & J.M. Verstraten (1995). The impact of atmospheric deposition on the soil and soil water composition of the coastal dry dunes. Report nr. 54. Landscape and environmental Research Group, University of Amsterdam, 34 pp.
- Dopheide, J.C.R. & J.M. Verstraten (1995). Verzuringstoestand van bodem en freatisch grondwater in de eikenbossen van de Amsterdamse Waterleidingduinen. Rapport Oeco-Hydrologisch Onderzoek, GWA/FGBL-UvA, 27 pp.
- Eisma, D. (1968). Composition, origin and distribution of Dutch coastal sands between Hoek van Holland and the island of Vlieland. Thesis. Leiden.
- Emmer, I.M. and A. Tietema (1990). Temperature-dependent nitrogen transformations in acid oak-beech forest litter in the Netherlands. *Plant and Soil* 122, p 193-196.
- Emmer, I.M. en J. Sevink (1994). Temporal and vertical changes in the humus form profile during a primary succession of *Pinus sylvestris*. *Plant and Soil* 167(2), p281-296.
- Heij, G.J. & T. Schneider (eds) (1991). Acidification research in the Netherlands. Final report of the Dutch Priority Programme on Acidification. Studies in Environmental Science, Elsevier.

- Heij, G.J., W. De Vries, A.C. Posthumus & G.M.J. Mohren (1991). Effects of air pollution and acid deposition on forests and forest soils. In: Heij, G.J. en T. Schneider (eds), 1991. Acidification research in the Netherlands. Final report of the Dutch Priority Programme on Acidification. Studies in Environmental Science, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, p 97-130.
- Hilgen, P.R. (red) (1994). De vitaliteit van het Nederlandse bos in 1994; Verslag van de landelijke inventarisatie 1994. Rapport IKC natuurbeheer nr. 10, Wageningen, 41pp.
- Jelgersma, S., J. De Jong, W.H. Zagwijn & J.F. van Regteren Altena (1970). The coastal dunes of the western Netherlands; geology, vegetational history and archeology. Overdruk van: Mededelingen Rijks Geologische dienst, Nieuwe Serie No. 21, p 93-167.
- Klijn, J.A. (1981). Nederlandse kustduinen; Geomorfologie en bodems. Centrum voor Landbouwpublicaties en Landbouwdocumentatie, Wageningen.
- Maas, G.J., C.A. van den Berg & A. Oosterbaan (1992). Vervolgonderzoek naar oorzaken van de verminderde vitaliteit van zomereik in het duingebied van Nederland. Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek Wageningen. IBN-rapport 046.
- Miles, J. (1985). The pedogenetic effects of different species and vegetation types and the implications of succession. *Journal of Soil Science* 36, p 571-584.
- Mohren, G.M.J. (1991). Integrated effects (forests). In: Heij, G.J. en T. Schneider (eds), 1991. Acidification research in the Netherlands. Final report of the Dutch Priority Programme on Acidification. Thematic reports. Studies in Environmental Science, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, p 387-464.
- Muider, J. & A. Stein (1994). The solubility of aluminium in acidic forest soils: Long-term changes due to acid deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58, p 85-94.
- Oosterbaan, A., G.J. Maas & C.A. van den Berg (1992). Oriënterend onderzoek naar de oorzaken van de verminderde vitaliteit van eiken in de duinen in het kustgebied. Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Wageningen. Dorschkamrapport nr. 694.
- Pons, L.J. & M.F. Van Oosten (1974). De bodem van Noord-Holland: toelichting bij blad 5 van de bodemkaart van Nederland, schaal 1:200.000. Stichting voor bodemkartering, Wageningen.
- Raulund-Rasmussen, K. & H. Vejre (1995). Effect of tree species and soil properties on nutrient immobilization in the forest floor. *Plant and Soil* 168-169, p 345-352.
- Rozema, J., P. Laan, R. Broekman, W.H.O. Ernst & C.A.J. Appelo (1985). On the lime transition and decalcification in the coastal dunes of the province of North Holland and the island of Schiermonnikoog. *Acta Bot. Neerl.* 34(4), p 393-411.
- Sevink, J. (1991). Soil development in coastal dunes and its relation to climate. *Landscape ecology* 6, p 49-56.
- Star, J & J. Estes (1990). *Geographical Information Systems: an introduction*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Tietema, A., E. Lenting, B. Warmerdam & L. Riemer (1992). Abiotic factors regulating nitrogen transformations in the ectorganic layer of acid forest soils: moisture and pH. In: A. Tietema. Nitrogen cycling and soil acidification in forest ecosystems in the Netherlands. Proefschrift, 1992.
- Tietema, A. & J.M. Verstraten (1988). The nitrogen budget of an oak-beech forest ecosystem in the Netherlands in relation to atmospheric deposition. Dutch Priority Programme on acidification. Report no. 04-01.
- Van Breemen, N., J. Mulder & C.T. Driscoll (1983). Acidification and alkalization of soils. *Plant and soil* vol 75(3). P 283-308
- Van Breemen, N., & R. Protz (1988). Rates of calcium carbonate removal from soils. *Canadian Journal of Soil Science* 68, p 449-454
- Van Breemen, N., W.F.J. Visser & Th. Pape (eds) (1988). Biochemistry of an oak-woodland ecosystem in the Netherlands affected by acid atmospheric deposition. Agricultural Research Report 930, Pudoc, Wageningen.
- Van den Berg, C.A. & A. Oosterbaan (1992). Waarnemingen van de vitaliteit van zomereik en beuk in de parkbossen van de gemeente Den Haag. Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Wageningen. Dorschkamrapport nr. 693.
- Van der Salm, C. & J.M. Verstraten (1993). Acid neutralization mechanisms in three acid sandy soils. *Geoderma* 63, p 227-243

- Van Wallenburg, C. (1966). De bodem van Zuid-Holland: toelichting bij blad 6 van de bodemkaart van Nederland, schaal 1:200.000. Stichting voor bodemkartering, Wageningen.
- Verstraten, J.M., A. Tietema & J.C.R. Dopheide (1989). Bodemverzuring: principes en voorbeelden. K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift XXIII (1989) Nr.4, p 251-261.
- Verstraten, J.M., J.C.R. Dopheide, J.J.M. Duysings, A. Tietema & W. Bouten (1990). The proton cycle of a deciduous forest ecosystem in the Netherlands and its implications for soil acidification. Plant and Soil 127, p 61-69.
- Verstraten J.M., J.C.R. Dopheide & A.J. van Wijk (1989). Verzuring- en voedingstoestand van de Haarlemmerhout. Rapportnummer 38, Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 39 pp.
- Wardenaar, C.P. & J. Sevink (1992). A comparative study of soil formation in primary stands of Scots pine (planted) and poplar (natural) on calcareous dune sands in the Netherlands. Plant and Soil 140, p 109-120.