

# De balansstudie, een methode in bosecologisch onderzoek

*The balance study, a method in forest ecological research*

W. Bouten, J. J. H. M. Duysings, A. Tietema, J. M. Verstraten

Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam

## 1 Inleiding

Het bodemkundig onderzoek waarbij de relatie tussen bodem en gewasopbrengst centraal staat, is altijd in belangrijke mate beïnvloed door het economisch belang van de landbouw. Dit onderzoek heeft als belangrijkste doel het verkrijgen van meer zicht in de mogelijkheden de bodem zó te manipuleren, dat planten optimaal kunnen worden voorzien in hun behoeften, energie en CO<sub>2</sub> uitgezonderd. Het heeft geleid tot grootschalige veranderingen van de bodemeigenschappen in landbouwgebieden, in chemische zin door bemesting en pH-verhoging en in fysische zin door ontwatering en grondbewerking.

Het bodemkundig procesonderzoek in natuurterreinen en bossen lag tot voor kort minder in de belangstelling. De belangrijkste bodemkundige kennis met betrekking tot deze natuurgebieden moet daarom geput worden uit pedogenetisch onderzoek. Hierbij hebben korte termijn veranderingen in de bodem, in termen van jaren, en de relatie bodem-plant procesmatig nauwelijks aandacht gekregen. Dit heeft geleid tot een hiaat in de bodemkundige (en ecologische) kennis op een moment dat de bodemverzuring in natuurgebieden door toedoen van de atmosferische depositie versneld optreedt en zelfs een kritische waarde lijkt te overschrijden; dit terwijl er ook aan natuurterreinen vanuit recreatief en landschappelijk oogpunt gaandeweg meer waarde wordt gehecht.

Helaas is een groot gedeelte van de in de landbouw ontwikkelde bodemkundige kennis niet zonder meer te gebruiken in natuurlijke systemen, omdat deze systemen te zeer anders functioneren. De belangrijkste verschillen worden veroorzaakt door een volkomen andere input en output van elementen tengevolge van het bemesten en oogsten, door de mechanische bodembelasting en grondbewerking en door de veel lagere organische stofgehalten en het ontbreken van een strooisellaag bij cultuurterreinen.

Specifiek inzicht in het functioneren van bosecosystemen kan verkregen worden door het opstellen van een biogeochemische balans voor een "plot" (Ulrich et al., 1979; van Breemen et al., 1986) of een geheel stroomgebied (Likens et al., 1977; Reid et al., 1981;

## Summary

*This article deals with the cycling of elements (and water) in forest ecosystems in order to understand the dynamics of these systems, including nutrient needs, rates of nutrient turnover, loss of nutrient by leaching and addition by weathering, fixation and atmospheric deposition.*

*After a short discussion of the various compartments of a mixed oak/beech forest ecosystem, the fluxes between these compartments are treated and methods are presented to establish these fluxes.*

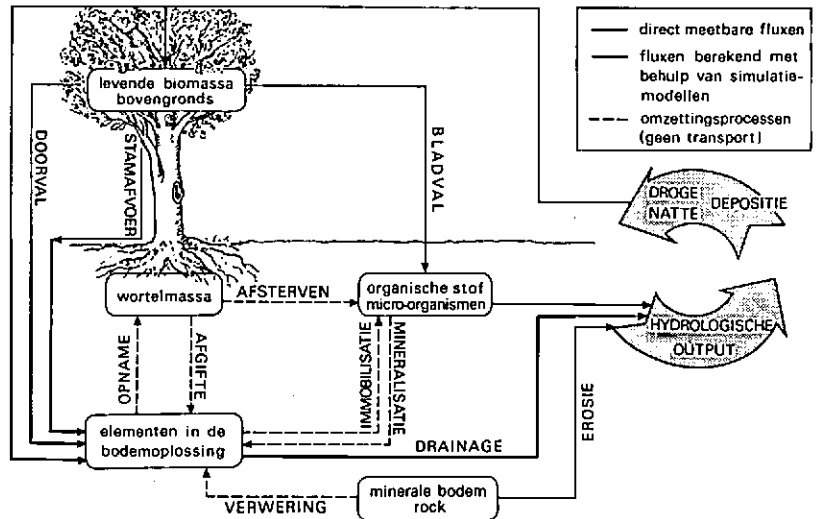
*Finally, some results are given on the contribution of atmospheric deposition to the acidification of the topsoil within this forest ecosystem.*

Duysings et al., 1986, c en d). Door middel van een balansstudie is het vaak mogelijk het belang van processen te kwantificeren die op andere wijze moeilijk te bepalen zijn, zoals de filterende werking van de bosvegetatie, nutriëntenopname en vertering (Duvignaud and Denaeyer-de Smet, 1971; Creasy et al., 1986). Daarnaast zijn dergelijke studies waardevolle hulpmiddelen gebleken bij het voorspellen en evalueren van de effecten van externe factoren, zoals houtkap, wind- en brandschade (Bormann and Likens, 1979) en zure atmosferische depositie (Braekke, 1976; Ulrich and Matzner, 1983; Johnson et al., 1982).

Door het Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium van de Universiteit van Amsterdam wordt reeds gedurende zeven jaar een biogeochemisch balansonderzoek uitgevoerd in een bos-ecosysteem. Het principe van het balansonderzoek berust op het onderscheiden van een aantal compartimenten binnen het ecosysteem en het identificeren en kwantificeren van de uitwisselingen tussen deze compartimenten. Omdat de vegetatie en de bodem elkaar wederzijds beïnvloeden is het belangrijk de grenzen van het ecosysteem zó te kiezen, dat deze beïnvloeding er in tot uitdrukking komt. Dit is weergegeven in afbeelding 1. In dit schema is het gehele systeem opgedeeld in een aantal compartimenten, waarbij de fluxen, die de uitwisseling

Een gegeneraliseerd schema van compartimenten en fluxen in een boscysteem (voor verklaring zie tekst).

*A generalised scheme of compartments and fluxes in a forest ecosystem (for explanation see text).*



tussen de compartimenten vormen, zijn weergegeven met pijlen. De gasfluxen zijn hier buiten beschouwing gelaten, alhoewel deze wel degelijk van belang kunnen zijn (b.v. denitrificatieflex). Om het systeem als geheel te kunnen beschouwen is het noodzakelijk vooral de binnenkomende en uitgaande hoeveelheden nauwkeurig te meten. Om deze reden is als onderzoekslocatie gekozen voor een stroomgebiedje ten oosten van Winterswijk. Dit is een van de weinige locaties in Nederland waar de uitgaande hoeveelheden in de vloeibare fase op ecosysteemschaal gemeten kunnen worden.

Het doel van het onderzoek is uiteindelijk uit het dynamisch patroon van fluxen en opgeslagen hoeveelheden inzicht te verkrijgen in de processen die voor deze dynamiek verantwoordelijk zijn. De hoeveelheden opgeslagen in de verschillende compartimenten zijn onderhevig aan fluctuaties. Allereerst periodieke fluctuaties tengevolge van seizoensvariaties, maar ook langzame veranderingen tengevolge van de vegetatiesuccessie of beheersmaatregelen, meteorologische verschillen van jaar tot jaar, ziekten, en tenslotte veranderingen in de atmosferische depositie. Al deze verschillende oorzaken maken het noodzakelijk het balansonderzoek een groot aantal jaren voort te zetten.

De veranderingen in de compartimenten zijn vaak moeilijk direct te meten, omdat, naast het destructieve karakter van de meetmethoden en de grote ruimtelijke variabiliteit, de relatieve veranderingen in de opgeslagen hoeveelheden zeer gering zijn. In het onderzoek wordt dan ook vooral de nadruk gelegd op het meten en bestuderen van de uitwisselingen tussen de afzonderlijke compartimenten (afb. 1). Gedeeltelijk gaat het hierbij om bovengrondse fluxen die direct gemeten kunnen worden, zoals neerslag, doorval en bladval. Daarnaast is er ondergronds transport, dat niet direct gemeten kan worden, maar dat wordt berekend met

behulp van simulatiemodellen. Tenslotte zijn er omzettingen waarbij geen sprake is van transport, zoals in het geval van verwerking of mineralisatie. Deze uitwisselingen tussen de compartimenten zijn allemaal sterk afhankelijk van het seizoen en van de actuele meteorologische condities. De relatieve veranderingen van deze uitwisselingsnelheden zijn in het algemeen groot vergeleken met de veranderingen in de opgeslagen hoeveelheden.

## 2 Het onderzoeksgebied

Het onderzochte stroomgebied bestaat uit een ca. 300 jaar oud bos (Tenkinkbos) met voornamelijk eiken en beuken, variërend in leeftijd van 85 tot 105 jaar (eiken) en 45-50 jaar (beuken), en bovendien hier en daar wat fijnsparren en grove dennen. De bodem in het gebied is opgebouwd uit een gedeeltelijk ontkalkt keileempakket, variërend van 1,25 tot 4 meter dikte, afgezet op een volledig ondoorlatende Lias-klei. De bovenkant van de keileem is sterk verweerd, waarbij een ongeveer 40 cm dikke zandlaag als residu is achtergebleven (Verstraten et al., 1986b). Naast een abrupte verticale textuurverandering is er ook sprake van een sterke pH-differentiatie, waarbij zeer lage pH's voorkomen in de zandige toplaag en de bovenste 20 cm van de keileem, en hoge pH's voorkomen in de kalkhoudende ondergrond (zie tabel 1). Het waterleverend vermogen van de keileem is slechts zeer gering, waardoor maar weinig water gedurende de zomer aan de keileem wordt onttrokken, zodat ook daar het chemisch transport gering is. Voor de ontwatering van het gebied zijn greppels gegraven tot op de keileem. In verband met de hoge doorlatendheid van de zandlaag en de geringe doorlatendheid van het keileempakket (tabel 1) ontstaat een specifiek hydrologisch regime, waarbij het wateroverschot in de winter door de zandlaag naar de

Tabel 1 Enkele fysische en chemische bodemeigenschappen van een "gemiddeld" profiel. (Some physical and chemical soil characteristics of an "average" profile).

Materiaal	diepte (cm)	bodem horizont	textuur	porositeit (%)	verzadigde water doorlatendheid (m.dag <sup>-1</sup> )	pH (0.01M CaCl <sub>2</sub> )	organische stofgehalte (%)
Organisch	7-0	L F	n.v.t.*	n.v.t.*	n.v.t.*	4,6 3,2-3,3	100
Zandig verwerings-residu keileem + dekzand	0-4 4-20	Ah1 Ah2	} klei-arm zand	} 49-59	1,0-3,0	2,8-2,9	9,8-11,6
					0,4-2,0	3,1-3,2	3,4-4,5
Zandig verwerings-residu keileem	30-35 35-35/50	E1 E2g	} lichte zavel	} 40-43	0,5-2,0	3,5 3,7	0,5-1,5
Keileem (ontkalkt)	35/50-70 70-150/175	B1tg B2tg			37-40 30-38	0,05-0,2 0,01-0,1	3,8-4,3 5,0-7,0
Keileem (kalkhoudend)	150/175- 150/275	B3gca		30-38	0,01-0,05	7,0-7,4	0,3-0,6
Lias klei (kalkhoudend)	>150/275	II Cgca	zwarte klei	n.b.**	0	7,2-7,4	1,9-2,4

\* n.v.t. = niet van toepassing; \*\* n.b. = niet bepaald.

greppels stroomt en zo het stroomgebied verlaat. Hierdoor is het mogelijk de water- en elementafvoer te meten.

Tengevolge van wijzigingen in het begreppelings-systeem is de grootte van het onderzoeksgebied een aantal malen veranderd. Het oppervlak lag echter steeds tussen de 7 en 15 hectaren.

### 3 Methoden van onderzoek

Wat betreft de methode van onderzoek moet een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen het kwantificeren van de opgeslagen hoeveelheden in de compartimenten en het kwantificeren van de fluxen ertussen.

Voor de bepaling van de (bovengrondse) levende biomassa wordt, na een uitgebreide bosinventarisatie, de "gemiddelde eik/beuk" gezocht aan de hand van de stamdiameter op borsthoogte (1,30 m). Van deze gemiddelde bomen wordt een aantal gekapt en op verschillende hoogten worden er stamschijven uit gezaagd. Alle takken worden verwijderd en gesorteerd op diameter. De stamschijven en de takken worden gewogen en vervolgens, na malen, chemisch geanalyseerd. Tevens wordt dit gedaan met de wortels.

De ondergrondse opslag wordt bepaald per bodemhorizont. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen microbiel materiaal en (dood) organisch mate-

riaal, afkomstig van de vegetatie. Wel wordt onderscheid gemaakt tussen de organische en de anorganische vorm van de verschillende elementen, omdat beide vormen in verschillende processen een rol spelen. Bovendien kunnen elementen in verschillende anorganische verbindingen voorkomen. Zo is het b.v. van belang om onderscheid te maken tussen de verschillende zwavelvormen, daar deze zich in de bodem zeer verschillend kunnen gedragen.

Van de fluxen allereerst de deposities die het ecosysteem binnenkomen. Er moet onderscheid gemaakt worden tussen de open veld-depositie en de interceptie-depositie.

Open veld-depositie omvat de natte depositie en de sedimentatie van grovere deeltjes (droge depositie) en is onafhankelijk van de fysische en chemische eigenschappen van het ontvangend oppervlak. De open veld-depositie wordt gemeten met open trechters, die op enige afstand van het bos zijn geplaatst. De natte depositie wordt gemeten met eenzelfde trechter, die echter automatisch wordt afgedekt wanneer het niet regent.

De interceptie-depositie is de som van filteringprocessen, zoals gasadsorptie, neveladsorptie en aerosoladsorptie; zij is vooral voor ammonium en sulfaat van groot belang. De filteringprocessen zijn sterk afhankelijk van de eigenschappen van het ontvangend oppervlak. De interceptie-depositie kan niet direct ge-

meten worden. Door het meten van de open veld-depositie, de natte depositie, de doorval en de stamafvoer is het echter mogelijk de filteringseffecten door de vegetatie vast te stellen. Door het meten van de deposities buiten het bos en de doorval in het bos wordt gebruik gemaakt van polyethyleen trechters met een vangoppervlak van 400 cm<sup>2</sup>. De trechters en de zwarte polyethyleen opvangflessen worden elke twee weken vervangen, waarna het opgevangen water direct geanalyseerd wordt. Om statistisch betrouwbare meetresultaten te verkrijgen moet, vooral in het bos, een groot aantal trechters gebruikt worden. Het juiste aantal hangt af van de gewenste betrouwbaarheid; het is voor elke opstand en elk element verschillend. In een eiken-beukenbos zijn b.v. 3 trechters nodig voor NO<sub>3</sub> en 8 trechters voor K, om de doorval op jaarbasis met een betrouwbaarheid van 90% uit metingen te kunnen schatten (Duysings et al., 1986b). De stamafvoer wordt tenslotte gemeten met polyethyleen goten, die rond de stam zijn aangebracht. Kwantitatief gezien blijkt de stamafvoer echter van slechts geringe betekenis.

De afvoer uit het stroomgebied wordt, evenals het elektrisch geleidingsvermogen (maat voor in oplossing zijnde stoffen), continu geregistreerd. Door bovendien het water veelvuldig chemisch te analyseren, zijn empirische relaties vastgesteld tussen het debiet onder de verschillende hydrologische condities en de elementconcentraties, zodat ook de elementenafvoer berekend kan worden (Duysings et al., 1983).

Fluxen van water en elementen kunnen in de bodem niet direct gemeten worden. Wel is het mogelijk om met behulp van aan te brengen onderdruk water door poreus materiaal heen aan de bodem te onttrekken, zodat periodiek concentraties in het bodemwater vastgesteld kunnen worden. Aangezien water als transportmedium fungeert, kunnen elementenfluxen berekend worden uit deze concentraties en de waterfluxen. Het watertransport in de onverzadigde en in de verzadigde zone wordt berekend met deterministische simulatiemodellen. Metingen van de meteorologische condities naast het bos en die van het KNMI-station te Winterswijk worden gebruikt als randvoorwaarden voor het model. Daarnaast zijn veel metingen nodig van de bewortelingsdichtheid, bulkdichtheden, waterretentiekarakteristieken en (on)verzadigde doorlatendheid, om de fysische bodemeigenschappen in het gehele gebied te kunnen karakteriseren. Een zeer intensief meetprogramma wordt gebruikt voor calibratie en validatie van de modellen. Dit programma omvat o.a. continue meting van afvoer uit het stroomgebied, tweewekelijkse meting van een groot aantal grondwaterstanden over het gehele gebied, tweewekelijkse metingen van vochtprofielen m.b.v. een neutronsonde en dagelijkse metingen van vochtspanningsprofielen met

een aantal volautomatische, computergestuurde tensiometersystemen.

Biologische en chemische omzettingssnelheden in de bodem kunnen ook niet direct gemeten worden. Om deze processen te kwantificeren wordt gebruik gemaakt van veld- en laboratoriumexperimenten. Dit wordt toegelicht aan de hand van de strooiselafbraak en de verwerking.

In het afbraakexperiment wordt een bekende hoeveelheid eiken- en beukenblad in zakjes van polyethyleengas boven op de strooisellaag gelegd. Elke drie maanden gedurende vier jaar wordt een aantal zakjes weggehaald, gedroogd, gewogen en chemisch geanalyseerd. Dit experiment geeft inzicht in de dynamiek van de verschillende elementen in het organische materiaal. Enkele elementen worden eerst vastgelegd door micro-organismen (immobilisatie), alvorens ze door mineralisatie in anorganische vorm beschikbaar komen voor de vegetatie.

In het geval van verwerking van de minerale bodem is een dergelijke aanpak niet mogelijk, omdat verwerkingssnelheden te laag zijn om meetbare verschillen in monsters te veroorzaken. In de balansstudie zijn deze snelheden echter wel van belang. Zeer veel laboratoriumonderzoek is in het verleden gedaan naar de verwerking van minerale bodems en de ontwikkeling van verwerkingsmodellen (Berner, 1981; Helgeson et al., 1969). Wanneer de minerale samenstelling van de beïnvloedende grootheden bekend zijn, kan de verwerkingssnelheid berekend worden. Voor de berekening van bijvoorbeeld het in oplossing gaan van calcium en kleimineralen worden daarom regelmatig bodemtemperaturen en partiële CO<sub>2</sub>- en O<sub>2</sub>-spanningen gemeten (Bouten et al., 1984). Gecombineerd met de eerder genoemde waterfluxen en elementconcentraties kan dan modelmatig berekend worden wat de snelheid is waarmee o.a. Ca en Mg vrijkomen. De totaalbalans van het gehele ecosysteem wordt gebruikt om de berekening te verifiëren.

#### 4 Enkele resultaten en conclusies

Het is geenszins de bedoeling van dit artikel om alle resultaten van het onderzoek naar de processen die het systeem beheersen, te bespreken. Er worden hier slechts enkele resultaten genoemd uit het deel van het onderzoek, dat elders reeds uitvoerig gepubliceerd is. Dit om aan te geven wat voor conclusies getrokken kunnen worden en welke mate van detail bereikt kan worden in het balansonderzoek.

Uit cluster- en discriminantanalyse van open veld-deposities en windrichtingmetingen blijkt dat 77% van de depositie van terrestrische en 23% van maritieme oorsprong is (Duysings et al., 1986a). "Seaspray" veroorzaakt een depositie van voornamelijk Na, Mg en Cl,

terwijl  $\text{SO}_4$  vooral ook afkomstig blijkt uit het Ruhrgebied. De sterke koppeling tussen  $\text{SO}_4$  en  $\text{NH}_4$ -concentraties wijst op de oxidatie van  $\text{SO}_2$  door  $\text{NH}_3$ , vrijgekomen door de vervluchtiging van ammonium uit bemeste landbouwgronden. Een lokale kalkgroeve zorgt voor extra depositie van Mg en Ca.

Uit de vergelijking van de doorval en de stamafvoer met de open veld-deposities blijkt, dat onder bos voor alle elementen, met uitzondering van de vrije aciditeit ( $\text{H}^+$ ), de deposities hoger zijn dan in het open veld (Verstraten et al., 1984). Door gasabsorptie en door de filterende werking van het bos is er een hoge depositie van ammoniumsulfaat. De verhouding van de deposities onder bos ten opzichte van die in het open veld voor  $\text{NH}_4$  en  $\text{SO}_4$  is ruim 2 en 3. Tengevolge van de uitspoeling van bladeren zijn deze verhoudingen voor K en Mn nog veel extremer, n.l. 11 respectievelijk 25. Uit de overschotconcentraties (Granat, 1972) – d.w.z. concentraties gecorrigeerd op een maritieme bijdrage en/of de natuurlijke achtergrondwaarden – in het doorval en stamafvoerwater is berekend dat  $\text{SO}_2$  de belangrijkste bron is (76%) voor de antropogene verzuring van dit water, terwijl  $\text{NO}_x$  bijdraagt voor 11% en HCl voor slechts 5%. Neutralisatie van deze zuren vindt grotendeels plaats door ammoniak (50%), calcium (18%), kalium (17%) en magnesium (7%). Het aldus bovengronds gevormde ammonium zal echter in het bodemcompartiment in een sterk verzurend effect resulteren (Duysings et al., 1986d).

Wanneer de afvoer van het stroomgebied vergeleken wordt met de doorval en de stamafvoer, dan blijkt dat de depositie van  $\text{NH}_4$  zeer vele malen hoger is dan de afvoer (Duysings et al., 1986, c en d; Verstraten et al., 1986a). Hieruit moet worden geconcludeerd dat ammonium in de bodem direct wordt opgenomen door micro-organismen en de vegetatie en/of door micro-organismen wordt omgezet in nitraat (Tietema et al., 1986). Deze processen kunnen de belangrijkste veroorzakers zijn, gegeven de huidige atmosferische depositieniveaus, van de additionele bodemverzuring in de bovengrond van het bosecosysteem. Geheel anders is dit voor Ca en Mg. Door verwerking van de minerale bodem geven deze juist een aanzienlijke afvoer uit het systeem te zien, die ruim drie maal zo groot is als de depositie. In de bodem treden geen noemenswaardige veranderingen op in de hoeveelheden Na, Cl,  $\text{SO}_4$  en  $\text{NO}_3$ . Hierbij moet echter wel opgemerkt worden, dat voor de afzonderlijke bodemhorizonten een geheel ander beeld geldt, omdat in de bovenstaande benadering de bodem steeds in zijn geheel is beschouwd. Aan meer gedetailleerde resultaten, uitgesplitst naar verschillende bodemdiepten, wordt momenteel nog gewerkt. Het zal dan ook duidelijk moeten worden welke processen in het bodemcompartiment, met name in de intensief bewortelde horizonten, de balans voorname-

lijk beïnvloeden, waardoor een goed inzicht in het bodem-/wortelmilieu wordt verkregen.

Balansonderzoek geeft een totaalbeeld van de dynamiek van een ecosysteem. Uit de vergelijking van fluxen kan met betrekkelijk eenvoudige metingen kwantitatief inzicht verkregen worden in de processen, die het functioneren van het ecosysteem beheersen, zonder dat het nodig is in groot detail de mechanismen en processen zelf te bestuderen. Het is daarom een methode die goed in een veldsituatie kan worden toegepast en die geschikt is om veranderingen in het ecosysteem op middellange termijn te volgen. Daarnaast geeft een kwantitatief beeld van de elementcycli een goed inzicht in de productiviteit van een bos. Met name de bovengrondse biomassa-productie van een bos is duidelijk gerelateerd aan de stikstof- en kaliumcycli en, in wat afnemende mate, ook aan die van fosfor, magnesium en calcium. Biogeochemisch balansonderzoek kan dan ook een belangrijke bijdrage leveren tot een optimaal beheer van het bos.

#### Dankbetulging

Zonder de gastvrijheid van de familie Tenkink te Ratum (Gld) was dit langjarige onderzoek onmogelijk geweest. Wij zijn haar hiervoor zeer erkentelijk.

#### Literatuur

- Berner, R. A. 1981. Kinetics of weathering and diagenesis. *Rev. Mineral.* 8: 111-134.
- Breemen, N. van, P. H. B. de Visser and J. J. M. van Grinsven. 1986. Nutrient cycling and proton budgets of four soil-vegetation systems in an oak-birch woodland in the Netherlands. *J. Geol. Soc. London*, in press.
- Bormann, F. H. and G. E. Likens. 1979. Pattern and process in a forested ecosystem. Springer, New York. 253 p.
- Bouten, W., F. M. de Vré, J. M. Verstraten and J. J. H. M. Duysings. 1984. Carbon dioxide in the soil atmosphere: Simulation model parameter estimation from field measurements. In: *Proceedings of the Uppsala Symposium*, IAHS-AISH Publ. 150: 25-31.
- Braekke, F. H. 1976. Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway, SNSF-project Oslo.
- Creasey, J., A. C. Edwards, J. M. Reid, D. A. MacLeod and M. S. Cresser. 1986. The use of catchment studies for assessing chemical weathering rates in two contrasting upland areas in Northeast Scotland. In: S. M. Colmen and D. P. Dethier (eds), *Rates of chemical weathering of rocks and minerals*. P. 467-502.
- Duvignaud, P., and S. Denayer-de Smet. 1971. Cycle des éléments biogènes dans les écosystèmes forestiers d'Europe. In: Duvignaud, P. (ed.), *Productivity of forest ecosystems*. Unesco, Paris. P. 527-542.
- Duysings, J. J. H. M., J. M. Verstraten and L. A. Bruynzeel, 1983. The identification of runoff sources of a forested lowland catchment: A chemical and statistical approach. *J. Hydrol.* 64: 357-375.
- Duysings, J. J. H. M., J. M. Verstraten, L. A. Bruynzeel and W. Bouten. 1986a. Relationships between precipitation chemistry and some meteorological parameters in the Nether-

- lands: A statistical evaluation. *Water, Air and Soil Pollution* 28: 213-223.
- Duysings, J. J. H. M., J. M. Verstraten and W. Bouten, 1986b. Spatial variability in nutrient deposition under an oak-beech canopy. *Zeitschr. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, in press.
- Duysings, J. J. H. M., J. M. Verstraten, W. Bouten and A. Tietema, 1986c. Hydrochemical budget for a forested catchment in the Netherlands. 1. Ion transfer in precipitation, throughfall, stemflow and streamwater. Submitted to *Journal of Hydrology*.
- Duysings, J. J. H. M., J. M. Verstraten, W. Bouten and A. Tietema, 1986d. Hydrochemical budget for a forested catchment in the Netherlands. 2. The proton budget and its implications for soil acidification. Submitted to *Journal of Hydrology*.
- Grant, L. 1972. On the relation between pH and the chemical composition in atmospheric precipitation. *Tellus* 24: 550-560.
- Helgeson, H. C., R. M. Garrels and F. T. Mackenzie, 1969. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processing involving minerals and aqueous solutions. II Applications. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33: 455-481.
- Johnson, D. W., J. Turner and J. M. Kelly, 1982. The effect of acid rain on forest nutrient status. *Water Resources Res.* 18: 449-461.
- Likens, G. E., F. H. Bormann, R. S. Pierce, J. S. Eaton and N. M. Johnson. 1977. *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer, New York. 146 p.
- Reid, J. M., MacLeod, D. A. and Cresser, M. S. 1981. The assessment of chemical weathering rates within an upland catchment in Northeast Scotland. *Earth Surf. Proc. and Landforms* 6: 447-457.
- Tietema, A., J. J. H. M. Duysings, J. M. Verstraten, J. W. Westerveld, 1986. A method on the estimation of actual nitrification rates in an acid forest soil. In prep.
- Ulrich, B., R. Mayer and P. H. Khanna, 1979. Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen in Solling. Sauerlanders, Frankfurt. 291 p.
- Ulrich, B., und E. Matzner, 1983. Abiotische Folgewirkungen der weiträumigen Ausbreitung von Luftverunreinigungen. Institut für Bodemk. und Waldernährung der Univ. Göttingen. 119 p.
- Verstraten, J. M., J. J. H. M. Duysings, L. A. Bruynzeel, W. Bouten and A. J. van Wijk. 1983. Effect of vegetation (eiken/beuken/fijnspar) op de depositie van zuurvormende bestanddelen op de bodem. In: Adema, E. M. en J. van Ham (eds.), *Zure Regen, oorzaken, effecten en beleid*. Pudoc Wageningen. P. 113-120.
- Verstraten, J. M., J. J. H. M. Duysings, W. Bouten, A. Tietema, 1986a. Biogeochemical balance studies of a forest ecosystem. In: *Forest Dynamics Research in West- and Central Europe. Proceedings IUFRO Workshop of subject group S1.01-00 Ecosystems*, Wageningen, Netherlands, 17-20 september 1985. P. 124-131. Internat. Pudoc, Wageningen.
- Verstraten, J. M., L. J. A. Gerringa, W. Bouten, J. J. H. M. Duysings, J. Sevink, 1986b. Some aspects of weathering and soil formation in boulder clay. In prep.