

## Is stikstof-verzadiging in Nederlandse bossen omkeerbaar?

**Veel Nederlandse bossen zijn stikstofverzadigd. Dit leidt tot vitaliteitsproblemen en verontreiniging van het grondwater met nitraten. Daarom startten vier Nederlandse universiteiten in 1989 een uniek experiment. In een grove dennen-opstand werd onder een dak schone, stikstofvrije neerslag verspreid. Het experiment moest uitwijzen of stikstof-verzadiging en de daarbij gepaard gaande verminderde vitaliteit, omkeerbaar zijn bij een drastische verlaging van de stikstofaanvoer. In dit artikel worden de resultaten na de eerste zeven jaar samengevat.**

Veel bosoecosystemen op het noordelijke halfrond zijn van nature *stikstof-gelimiteerd*. De productie in dergelijke systemen wordt bepaald door de hoeveelheid beschikbaar stikstof. De aanvoer van stikstof was oorspronkelijk gering en er lekte nauwelijks stikstof uit het systeem: de *stikstof-cyclus* was nagenoeg gesloten en bossen gingen zeer efficiënt met hun stikstof om. Minderman en Leeftang (1968) toonden aan dat in de periode 1947-1961 nauwelijks stikstof naar het grondwater uitspoelde.

Door een hogere atmosferische depositie van stikstof is de *stikstof-limitatie* van Nederlandse bossen opgeheven en de productie verhoogd. Zodra een andere voedingsstof limiterend voor de productie wordt, slaat de

overtollige stikstof op in de verschillende compartimenten van het ecosysteem, zoals bomen, ondergroei, strooisellaag en minerale bodem. Deze opslagcapaciteit is echter beperkt en wordt in veel Nederlandse bossen overschreden. Naar schatting is de huidige stikstofdepositie 50-60 keer hoger dan in 1900. Het gevolg is dan ook dat stikstof in de vorm van nitraat uitspoelt via het bodemwater. Een dergelijk ecosysteem wordt *stikstof-verzadigd* genoemd en de *stikstof-cyclus* is veranderd van een gesloten in een open cyclus.

Bij een voortzetting van de verhoogde stikstofaanvoer in een stikstof-verzadigd ecosysteem zullen negatieve verschijnselen gaan optreden. Een groot deel van de aangevoerde stikstof wordt door bacteriën omgezet in nitraat en zuur. Nitraat is heel mobiel en de overmaat zal uitspoelen via het bodemwater. Samen met het nitraat spoelen essentiële voedingsstoffen weg, zoals kalium en magnesium, wat tot een verstoring van de minerale balans in de bodem leidt, met gebreksverschijnselen in de vegetatie als uiteindelijk gevolg. Door het gevormde zuur kunnen in de bodem aluminium(hydr)oxiden in oplossing gaan die het functioneren van de boomwortels negatief beïnvloeden. Deze verschijnselen zullen een vermindering van de boomvitaliteit tot gevolg hebben (zie ook Erismann & Bobbink, 1997). Een bijkomend milieueffect van *stikstofverzadiging* is dat een verhoogde nitraatuitspoeling vervuiling van het grond- en oppervlaktewater veroorzaakt, wat op langere termijn een risico voor

de kwaliteit van het drinkwater kan betekenen.

Een belangrijke vraag ter ondersteuning van beleidsmaatregelen om de atmosferische depositie te verlagen is, of dit proces van stikstof-verzadiging omkeerbaar is, en dus of de negatieve verschijnselen kunnen worden verminderd door een verlaging van de aanvoer van stikstof. Om dit te onderzoeken is in 1989 een project gestart in een grove dennenbos, nabij Ysselsteyn in de Peel. Het project werd uitgevoerd door de Universiteiten van Nijmegen en Amsterdam, de Vrije Universiteit Amsterdam en de Landbouw Universiteit Wageningen.

Het onderzoek maakte deel uit van het Europese project NIT-REX, NITrogen saturation EXperiments. (De resultaten van NIT-REX zijn samengevat in twee speciale uitgaven van Forest Ecology and Management (Dise & Wright, 1992). In dit project werd in naaldbossen in een achttal Europese landen onderzoek verricht naar stikstof-verzadiging. In landen met een lage natuurlijke aanvoer van stikstof werd onderzocht of een verhoogde aanvoer van stikstof kan leiden tot stikstof-verzadiging, terwijl in landen met een hoge huidige aanvoer vergelijkbare experimenten als in Ysselsteyn werden uitgevoerd.

### Methodiek

#### Gebiedsbeschrijving

De onderzoekslocatie is een ca. 50 jaar oude grove dennen opstand in "De Rouwkuilen" nabij Ysselsteyn. In de onmiddellijke



*Figuur 1: De onderkapping te Ysselsteyn*

controle proefvelden geeft een indicatie van de effecten van het dak.

### **Monitoring**

Binnen ieder proefveld wordt de depositie gemeten, de chemische samenstelling van het bodemvocht op vijf verschillende dieptes (0 t/m 90cm), en de hoeveelheid water die door het bodemprofiel beweegt. Hieruit kan de nutriëntenstroom in de bodem en naar het grondwater worden bepaald (Figuur 2).

omgeving bevindt zich een grote concentratie aan intensieve veehouderijen. De depositie van stikstof is daardoor zeer hoog: ca. 50 kg stikstof/ha<sup>1</sup>/jaar<sup>1</sup>.

De opstand kan geclassificeerd worden als vitaliteitsklasse 3, wat een naaldverlies van 26-60% aangeeft (Reuver, 1996). Veel bomen hebben vervormingen aan de stam, wat op een gestoorde groei wijst. De ondergroei bestaat uit een goed ontwikkelde laag van stikstofminnende plantensoorten: braam, brede stekelvaren, pijpestrootje, bochtige smele en enkele mossorten.

valt, wordt vervangen door kunstmatige regen in de vorm van gedemineraliseerd water waaraan de nutriënten in de zelfde concentratie als ter plaatse in de doorval aanwezig is, worden toegevoegd, behalve stikstof (en zwavel). De neerslag, die op het dak boven het dak-controle proefveld valt, wordt opgevangen in een voorraadvat en op het dak-controle proefveld gespreid. Vergelijking van de twee proefvelden onder het dak geeft een indicatie van de gevolgen van verminderde stikstofdepositie, en vergelijking van de beide

De voedingstoestand van de naalden wordt jaarlijks gemeten en geeft een indicatie over de "gezondheid" van de bomen. Verder wordt ieder voorjaar de aanwas van de stammen op borsthoogte bepaald. De wortelbiomassa en de mycorrhiza-infectiegraad worden regelmatig bepaald, evenals de naaldval. Ieder najaar wordt in sub-proefvelden de bovengrondse biomassa van de vegetatie bepaald. Verder wordt in sub-proefvelden gekeken naar de afbraak van organisch materiaal en naar stik-

### **Proefopstelling**

In het bos werd een transparant dak geplaatst (Figuur 1). De bomen steken -waterdicht afgesloten- met hun stammen door het dak. Onder het dak werden twee proefvelden (dak-schoon en dak-controle) met ca. 10 bomen per proefveld ingericht. Buiten het dak werd een tweede controle proefveld aangelegd.

De neerslag, die op het dak boven het dak-schoon proefveld

*Figuur 2: Meetopstelling in het veld voor bodemvocht en gasuitwisseling.*



Figuur 3: Gemiddelde jaarlijkse doorval depositie 1990-1997 van stikstof en zwavel.

stofomzettingen in de bosbodem, waarbij de rol van de bodemfauna eveneens is onderzocht.

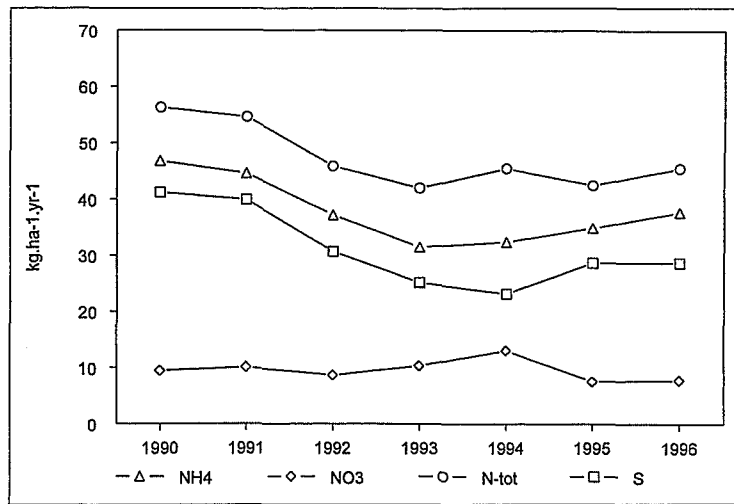
## Resultaten en discussie

### Dakeffecten

Het dak zorgt ervoor dat er minder licht de bodem bereikt (-15% als er veel naalden op het dak liggen) en dat er minder neerslag onder het dak valt (-10%). Bij zware buien stromen de afvoergoten over en soms treedt er waterverlies op door een technische storing. Verschillen in lucht- en bodemtemperatuur en relatieve vochtigheid zijn gering.

### Stikstoffluxen

De stikstof- en zwavelaanvoer in de opstand is zeer hoog. In de controle plot bedraagt de gemiddelde stikstof depositie in de doorval over 1990-1997 ca. 50 kg stikstof ha<sup>-1</sup>/jaar<sup>-1</sup> en ca. 40 kg zwavel ha<sup>-1</sup>/jaar<sup>-1</sup>. De depositie van deze stoffen is duidelijk positief gekoppeld aan de hoeveelheid neerslag, en wanneer naar

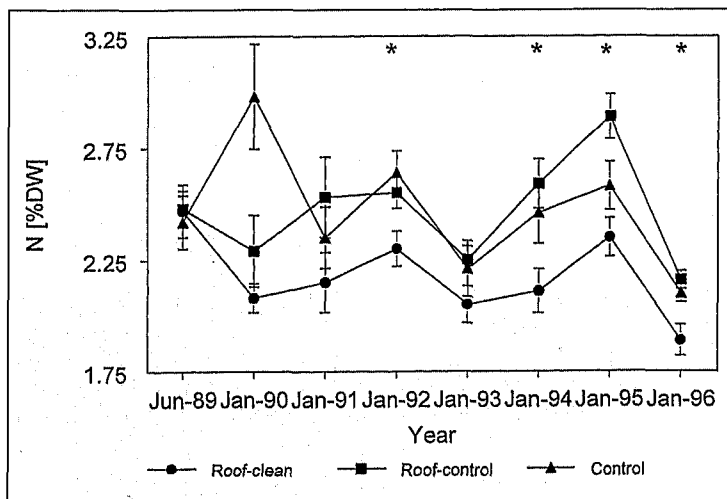


een standaard jaar van 500mm doorval neerslag wordt gecorrigeerd, dan is er een geleidelijke afname van ammonium- en zwavelaanvoer, terwijl de nitraat depositie gelijk blijft (Figuur 3). Deze afname is vermoedelijk het gevolg van het gevoerde mestbeleid.

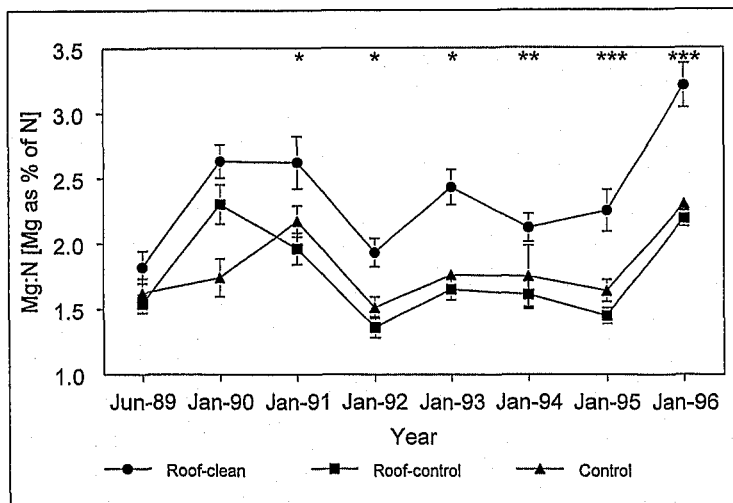
In het dak-schoon proefveld is de depositie afgenomen tot ca. 5 kg stikstof/ha<sup>-1</sup>/jaar<sup>-1</sup> en ca. 3 kg zwavel/ha<sup>-1</sup>/jaar<sup>-1</sup>. Door het dakeffect daalde de depositie in het dak-vuil proefveld tot 45 kg stikstof/ha<sup>-1</sup>/jaar<sup>-1</sup> en 27 kg zwavel/ha<sup>-1</sup>/jaar<sup>-1</sup>.

Metingen in het bodemprofiel van het controle proefveld laten duidelijk zien dat dit bosoekosysteem stikstof-verzadigd is: onder de bewortelingszone op 90cm diepte spoelt ca. 70 kg stikstof/ha<sup>-1</sup>/jaar<sup>-1</sup> uit met een gemiddelde nitraatconcentratie van 1800 μM (111 mg/l<sup>-1</sup>).

Een reductie van de stikstof input in het dak-schoon proefveld heeft binnen een jaar geleid tot een daling van de stikstofuitspoeling. In het drainage water op 90cm diepte daalde de nitraat concentratie van gemiddeld 864 μM in het dak-schoone proefveld naar 327 μM in het dak-vuile proefveld, wat beneden de beneden de nitraatnorm voor grondwater is (400 μM; 25 mg/l<sup>-1</sup>). Dit neemt echter niet weg dat er nog steeds een enorme voorraad stikstof (ca. 2000 kg ha<sup>-1</sup>) in de bodem gebonden zit. Wat met deze hoeveelheid stikstof in de toekomst zal gebeuren is vooralsnog onbekend.



Figuur 4: Stikstofgehalte in 1/2-jaar oude naalden [%DW]. \*: significant verschil tussen het dak-schoone en dak-vuile proefveld.



Figuur 5: Mg:N verhouding in 1/2-jaar oude naalden. (\*\*, \*\*\*): significant verschil tussen het dak-schone en dak-vuile proefveld. Hoe meer sterretjes, hoe signifikanter het verschil.

### Boomgroei en -vitaliteit

De bomen in de opstand verkeren in een slechte toestand. Als gevolg van een jarenlange hoge stikstoftoevoer zijn de bomen slecht gegroeid. Het naaldverlies is 26-60% en de naalden bevatten een grote hoeveelheid stikstof (Figuur 4) en lage hoeveelheden kalium en magnesium.

De nutriëntenbalans in de naalden van kalium en magnesium ten opzichte van stikstof is sterk verslechterd (Figuur 5). De gemiddelde N:K en N:Mg verhoudingen zijn als zeer laag te kwalificeren (Van den Burg & Schaap, 1995).

Als gevolg van de behandeling is het stikstofgehalte significant gedaald, alhoewel de absolute concentratie nog steeds hoog is. De nutriëntenbalans is in de naalden van het dak-schone proefveld sterk verbeterd. De K:N is op een normaal niveau gekomen; de Mg:N verhouding is ook aanzienlijk verbeterd (Figuur 5), maar is nog steeds verre van optimaal. De verbeterde voedingsstoffen

Figuur 6: Diametertoename van de bomen sinds 1991 (DBH). \*: significant verschil tussen het dak-schone en dak-vuile proefveld.

huishouding heeft ook geleid tot een verbeterde boomgroei. Sinds 1995 is de aanwas van de bomen in het dak-schone proefveld significant groter dan van de bomen in de beide vuile proefvelden (Figuur 6)

### Ondergroei

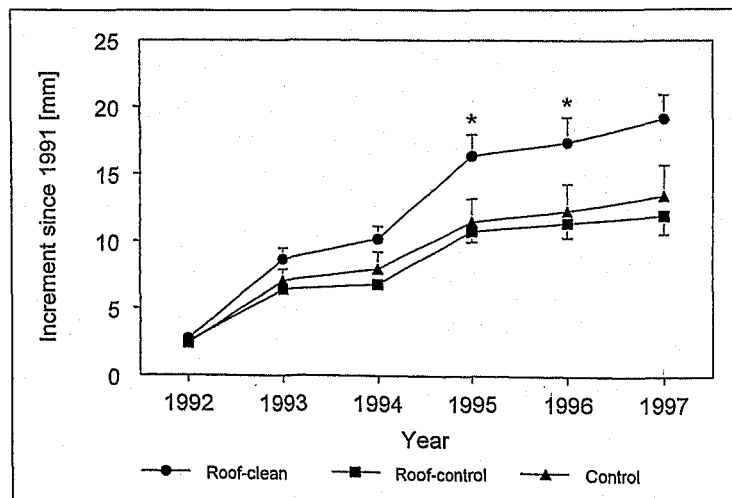
Vermindering van de stikstofaanvoer heeft in het dak-schone proefveld geleid tot een achteruitgang van stikstofminnende soorten in de ondergroei (stekelvaren en braam). Tot op heden hebben zich echter geen nieuwe soorten gevestigd. Wel worden

sinds 1993 in het dak-schone proefveld weer mycorrhiza paddenstoelen terug gevonden.

### Bodem

Door de omzetting van het aangevoerde ammonium in nitraat door bodembacteriën (nitrificatie) verzuurt de bodemoplossing en lossen aluminium(hydr)oxides op. Vrij aluminium maakt de wortels lek, waardoor enerzijds voedingsstoffen weglekken en anderzijds de opname sterk wordt geremd. Aan calcium wordt een beschermende rol toebedacht met betrekking tot aluminium toxiciteit en vaak neemt men de Al/Ca verhouding als een maat voor de verzuring.

De aluminium/calcium verhoudingen liggen onder de waarde van 5, die als bedreigend voor wortels wordt beschouwd (Tabel 1), maar geven wel aan dat de omstandigheden in het dak-schone proefveld beter zijn. pH metingen in het bodemvocht tonen hetzelfde beeld: de pH in het



dak-schoon proefveld is ca. 0,2 pH eenheden hoger dan in de beide controle proefvelden. Vermindering van de stikstof belasting resulteert verder in een verhoogde wortelgroei en mycorrhiza infectiegraad van de fijne wortels. Dit betekent dat naast een verbeterde voedingsstoffen-toestand in de bodem de opname capaciteit van voedingsstoffen van de bomen is verbeterd.

#### Microbiële omzettingen

Vermindering van stikstofaanvoer leidde in eerste instantie tot een, statistisch significant, verminderde afbraak van de strooisellaag (Koopmans *et al.*, 1995). De afbraaksnelheid bleek slechts tijdelijk lager in het proefveld met lage depositie, terwijl dit verschil later weer werd gelijkgetrokken (Koopmans *et al.*, 1996). Verder bleek dat na een jaar bij lage stikstofaanvoer in de bodem een groter percentage van de stikstof in de doorval werd aangetroffen (65 tov. 37%), terwijl een aanzienlijk kleiner percentage van de doorval was uitgespoeld naar het grondwater (10 tov. 17%). Dit komt omdat de micro-organismen beter dan bomen in staat zijn om bij een lage stikstofdepositie, en dus een relatief tekort aan stikstof, de beschikbare stikstof op te nemen.

#### Stikstofverzadiging

Als het uitspoelen van nitraat indicatief is voor stikstofverzadiging, dan moet geconcludeerd worden dat stikstof-verzadiging omkeerbaar is als gevolg van een reductie in stikstofdepositie. Al enkele maanden na de start van het experiment is de nitraatuitspoeling sterk verlaagd. Na enkele jaren blijken de kenmerkende en vaak voor de boomvitaliteit nadelige verschijnselen veranderd in de richting van de situatie van stikstof-limitatie. Als gevolg hiervan is de vitaliteit van

**Tabel 1. Enkele chemische gegevens van de bodemoplossing op 10cm diepte in relatie tot de biomassa en mycorrhizainfectiegraad van de fijne wortels.**

	dak-schoon	dak-vuul	controle
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> in bodemoplossing op 10 cm (μM) 1990-1997	523	995	1551
Al/Ca verhouding in bodemoplossing op 10 cm (mol/mol) 1990-1997	1,08	1,46	1,47
Biomassa fijne wortels in 1995 (mg droge stof.cm <sup>-3</sup> bodem)	0,89	0,60	0,7
Mycorrhiza infectiegraad van de fijne wortels in 1995 (aantal infecties.mg <sup>-1</sup> droge stof)	2,8	1,4	0,5

de biota sterk verbeterd. Ook microbiële processen zoals netto stikstofmineralisatie blijken zich aan te passen aan de verminderde stikstofbeschikbaarheid.

Een belangrijke vraag blijft voornog onbeantwoord in dit onderzoek, namelijk wat er gebeurt op de langere termijn. De sterk verminderde nitraatuitspoeling bij lage depositie houdt in dat de hoeveelheid stikstof die opgeslagen zit in het ecosysteem niet verandert. Er is dus nog steeds sprake van een grote hoeveelheid opgeslagen stikstof in het ecosysteem. Afhankelijk van de stabiliteit van de vorm waarin het stikstof is opgeslagen, vormt het een potentieel gevaar om alsnog uit te spoelen. Een dergelijke situatie zou zich bijvoorbeeld kunnen voordoen bij een plotselinge verstoring van het ecosysteem. Hierbij valt te denken aan bijvoorbeeld een insektenplaag, een storm waarbij een groot aantal bomen omwaaien of aan kaalkap van het bos. Van al deze verstoringen is bekend dat ze gepaard gaan met verhoogde nitraatuitspoeling. In een *stikstof-verzadigd* ecosysteem met een grote hoeveelheid opgeslagen stikstof zal de hoeveelheid nitraat die hierbij uitspoelt waarschijnlijk veel groter zijn dan in een *stikstof-gelimiteerd* ecosysteem. Het gevolg zal een nog verdere uit-

putting in de bodem zijn wat betreft voedingsstoffen, verhoogde aluminiumconcentraties en een aanslag op de kwaliteit van grond- en oppervlakte water.

#### Andere NITREX locaties

Binnen het NITREX programma zijn op twee locaties, nl. in Speuld (Nederland) en Solling (Duitsland), vergelijkbare experimenten uitgevoerd. In beide bossen werd een vergelijkbaar snelle reactie gevonden in de chemische samenstelling van het bodemvocht. Na enkele maanden bleken de nitraatconcentraties aanzienlijk verlaagd en de concentraties van kalium, calcium en magnesium verhoogd. In het Speulderbos heeft het veel langer geduurd dan in Ysselsteyn voordat de voedingstoestand van de naalden werd beïnvloed. Ook werden veel kleinere veranderingen in de afbraakprocessen gemeten (Koopmans *et al.*, 1995). Uit deze resultaten werd geconcludeerd dat deze locatie in veel mindere mate te lijden heeft gehad van de verschijnselen die gepaard gaan met *stikstof-verzadiging*. Dit werd bevestigd door onder andere de betere voedingstoestand in de naalden bij het begin van het experiment (Boxman *et al.*, 1997). De geschiedenis van de opstand t.a.v. de depositie speelt hierbij een belangrijke rol.

## Conclusies

Sterk verminderde stikstofdepositie in een stikstof-verzadigd bosecosysteem leidt binnen een jaar tot een verminderde nitraat-uitspoeling naar het grond- en oppervlaktewater. De hiermee gepaard gaande verbetering van de voedingtoestand in de bodem, resulteert na enkele jaren in een verbeterde boomvitaliteit in de vorm van verhoogde aanwas, verbeterde nutriëntenbalans in de naalden en meer fijne wortels met een hogere mycorrhiza-infectiegraad. Daarnaast wordt eveneens een lagere biomassa van nitrofiële ondergroei en een grotere soortenrijkdom in mycorrhiza paddestoelen aange troffen, en blijken microbiële omzettingen zoals de afbraak van organisch materiaal zich aan te passen aan de verminderde stikstofbeschikbaarheid.

Een belangrijke vraag blijft wat er met de grote hoeveelheid opgeslagen stikstof zal gebeuren op de langere termijn. Afhankelijk van de stabiliteit van de vorm waarin het stikstof is opgeslagen, vormt het een potentieel gevaar om alsnog

als nitraat uit te spoelen, na bijvoorbeeld een verstoring van het ecosysteem. Daarmee zou de stikstof alsnog kunnen leiden tot een verminderde boomvitaliteit en verontreiniging van grond- en oppervlakte water.

## Literatuur

- Aber J.D., Nadelhoffer K.J., Steudler P.A. & Melillo J.M., 1989. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems. *Bioscience* 39, 378-386.
- Boxman A.W., Van Dam D., Van Dijk H.F.G., Hogervorst R.F., & Koopmans C.J., 1995. Ecosystem responses to reduced nitrogen and sulphur inputs into two coniferous forest stands in the Netherlands. *Forest Ecology and Management* 71, 7-29.
- Boxman, A.W., Blanck, K., Brandrud, T.-E., Emmett, B.A., Gundersen, P., Hogervorst, R.F., Kjønnaas, O.J., Persson, H. and Timmermann, V., 1996. Vegetation and soil biota response to experimentally-changed nitrogen inputs in coniferous ecosystems in the NITREX project. *For Ecol Manage.* In press.
- Dise N.B. & Wright R.F., 1992. The NITREX project (Nitrogen Saturation Experiments). *Ecosystem Research Report 2*, Commission of the European Communities, Brussels, 101 p.
- Erisman, J.W. & Bobbink, R., 1997. De ammoniakproblematiek - wetenschappelijke achtergronden. *Landschap*, 14/2, 87-103.
- Minderman, G. & Leeftang, K.W.F., 1968. The amounts of drainage water and solutes from lysimeters planted with either oak, pine, or natural dune vegetation, or without any vegetation cover. *Plant. Soil.* 28, 61-80.
- Koopmans C.J., Lubrecht W.C. & Tietema A., 1995. Nitrogen transformations in two nitrogen saturated forest ecosystems subjected to an experimental decrease in nitrogen deposition. *Plant and Soil* 175, 205-218.
- Koopmans, C.J., Tietema, A. and Boxman, A.W. 1996. The fate of <sup>15</sup>N enriched throughfall in two coniferous forest stands at different nitrogen deposition levels. *Biogeochemistry*, 34, 19-44.
- Reuver, P.J.H.M., 1996. De vitaliteit van de bossen in Nederland in 1996. Verslag meetnet bosvitaliteit nr.2. Rapport IKC Natuurbeheer nr.23. IKC en Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. 56 pp.
- Van den Burg, J. & Schaap, W., 1995. Richtlijnen voor mineralen-toediening en bekalking als effectgerichte maatregelen in bossen. Rapport IKC Natuurbeheer nr.16. IKC en Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. 64 pp.