

Het bemesten van de lucht; over stikstof in relatie tot de voedsel-, energie en milieuproblematiek

prof.dr. J.W. Erisman - Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen



Het bemesten van de lucht; over stikstof in relatie tot de voedsel-, energie en milieuproblematiek

prof.dr. J.W. Erisman

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van bijzonder hoogleraar Integrale Stikstofproblematiek vanwege de Stichting Het Vrije Universiteitsfonds bij de faculteit der Aard- en Levenswetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam op 15 januari 2010.



Het bemesten van de lucht

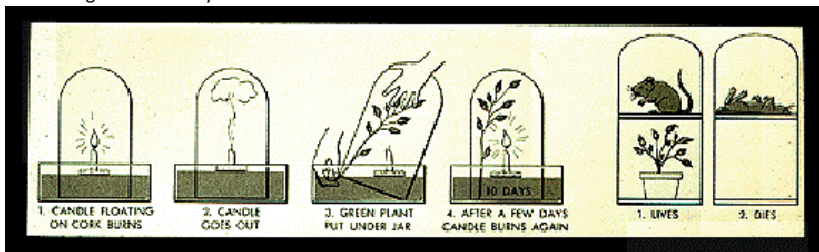
Over stikstof en de voedsel-, energie- en milieuproblematiek

Mijnheer de Rector, collega's, familie en vrienden,

Eind 2009 is de Klimaatconferentie COP15 in Kopenhagen afgesloten zonder noemenswaardige afspraken die noodzakelijk zijn om klimaatverandering op termijn tegen te gaan. Klimaatverandering is het onderwerp dat op dit moment de milieugenda domineert. Er zijn echter ook andere milieuproblemen die vergelijkbare aandacht zouden verdienen en een geïntegreerde aanpak vergen, zoals de stikstofproblematiek. In een recente publicatie in *Nature* is door een groot aantal onderzoekers een top 10 van problemen gegeven die op dit moment al buiten het draagvlak van de planeet komen of daar snel aan voorbij gaan (Rockström et al., 2009). Klimaatverandering en biodiversiteit staan op de plaatsen een en twee, gevolgd door de menselijke veranderingen van de stikstofcyclus. Dit geeft aan dat stikstof een groot wereldwijd milieuprobleem vormt, zeker omdat stikstof ook bijdraagt aan de top 2: de afname van de biodiversiteit en aan een versnelling van de klimaatverandering!

Inleiding

Stikstof is waarschijnlijk in 1772 ontdekt door Daniel Rutherford. Dit is niet geheel duidelijk omdat er tegelijkertijd door Scheele, Cavendish en Priestley onderzoek werd gedaan naar 'verbrande of van ontvlambaarheid ontdane lucht', zoals lucht zonder zuurstof destijds werd genoemd. Stikstof maakt 78% uit van het volume van de lucht en is inert. Vanwege deze inertie noemde Lavoisier het *azote* wat 'levenloos' betekent. De term 'dode lucht' kwam van de experimenten die gedaan werden met muizen door Rutherford (en anderen). Muizen werden onder afgesloten glazen stolpen gezet en stierven als de zuurstof op was (Figuur 1). De door de muizen uitgeademde CO_2 werd verwijderd met verbrande kalium. De achtergebleven lucht, die geen leven of verbranding toelaat, werd 'dode lucht' genoemd en bestond voornamelijk uit N_2 . De naam 'stik-stof' is hiervan dus afkomstig. Met dezelfde soort proeven werd door Priestley aangetoond dat planten die onder de stolpen werden gebracht, het leven van de muizen konden verlengen. Deze ontdekking was de eerste stap op weg naar de ontdekking van de fotosynthese en de rol van zuurstof daarin.



Figuur 1. Experimenten met muizen voor het bepalen van de samenstelling van de lucht (door Joseph Priestley).

Al het leven op aarde heeft stikstof in een reactieve vorm nodig voor aminozuren en proteïnen en krijgt dit via het voedsel naar binnen. Er is veel stikstof op aarde, maar niet alles is in de juiste, te gebruiken vorm. Stikstof in de lucht bestaat voor 78% uit stikstofgas, of het is gebonden in rotsen in de aarde. Reactief stikstof, in het milieu N_r , is gedefinieerd als de stikstof die in verbindingen vastzit, dus alle stikstof op aarde behalve het gasvormige N_2 . Het is al honderden jaren bekend dat stikstofverbindingen in regenwater een belangrijke voedingsbron voor gewassen vormt (Brimblecombe, 1989). De Romeinen wisten al dat planten niet alleen water opnemen, maar ook de nutriënten uit het water. Beide factoren werden van belang geacht voor plantengroei. De mens is altijd op zoek naar manieren extra nutriënten toe te voegen om de bodem vitaal te houden en de plantengroei te bevorderen. In 280-233 B.C. schreef Han Feizi al dat menselijke uitwerpselen gebruikt moesten worden om de bodemgesteldheid te herstellen: "Landbouw is een grap zonder bemesting" (Yang, 2006).

Over de betekenis van mineralen voor plantenvoeding kwam men niet veel verder dan vermoedens, ofschoon de mens al eeuwen eerder de waarde van mineralen zoals kalk, gips en mergel als meststof had ingezien. Von Liebig veronderstelde dat planten slechts een beperkt aantal nutriënten nodig hebben voor de groei (Von Liebig, 1840). Deze voedingsstoffen zijn beschikbaar in de bodem en dienen, wanneer ze opgebruikt raken na intensieve landbouw, weer aan de bodem te worden toegevoegd om voldoende volgende gewasopbrengsten te kunnen garanderen. Hij is hiermee de grondlegger van de mineralen theorie en daarmee ook van de kunstmestindustrie (Erisman, 2000).

Wetenschappers houden zich al heel lang met het bemestingsvraagstuk bezig. In het midden van de 18de eeuw voerde de Duitse chemicus Johann Rudolph Glauber in Amsterdam proeven uit met salpeter als kunstmest (Snelders, 1984). Glauber constateerde dat salpeter een essentiële stof is voor vegetatie. Salpeter werd toen alleen gebruikt voor het maken van buskruit en dus niet grootschalig geproduceerd. De Engelsman Davy ontdekte dat salpeter de stikstof levert die nodig is voor de vorming van eiwitten. Begin 1800 gebruikten boeren in Engeland voor het eerst salpeter. Door de bevindingen van Boussingault en von Liebig tussen 1835 en 1840 nam de inzet van kunstmest sterk toe. Eerst werd nog natuurlijke kunstmest gebruikt, zoals Peru-guano en Chili-salpeter – vogelmest die is afgezet op de rotsen aan de Stille Oceaan kust van (onder meer) Venezuela. De eerste guano werd in 1843 geïmporteerd door de firma Lenardson en Cie te Rotterdam. De export van guano uit Chili groeide gestaag gedurende de 19de eeuw.

In een bekende lezing van Sir William Crookes aan de British Association for the Advancement of Science in 1898, stelde hij de noodzaak voor hogere opbrengsten aan de orde om de wereldbevolking te kunnen voeden (Crookes, 1898): *"England and all civilised nations stand in deadly peril of not having enough to eat. As mouths multiply, food resources dwindle. Land is a limited quantity, and the land that will grow wheat is absolutely dependent on difficult and capricious natural phenomena... I hope to point a way out of the colossal dilemma. It is the chemist who must come to the rescue of the threatened communities. It is through the laboratory that starvation may ultimately be turned into plenty... The fixation of atmospheric nitrogen is one of the great discoveries, awaiting the genius of chemists."*

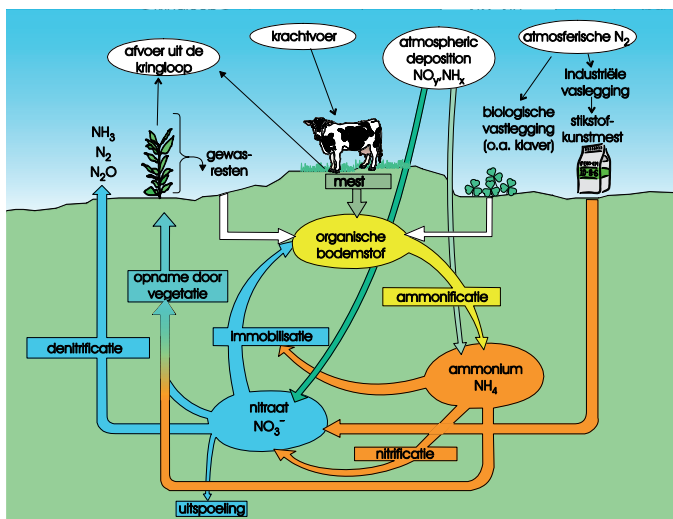
Uiteindelijk hebben Fritz Haber en Carl Bosch de basis gelegd voor industriële ammoniakproductie die de basis vormt voor kunstmest, en zijn we niet meer afhankelijk van natuurlijke bronnen. Door toevoeging van deze reactieve vorm van stikstof wordt de plantgroei sterk bevorderd; de helft van ons voedsel wordt op dit moment geproduceerd vanwege de beschikbaarheid van kunstmest (Erisman et al., 2008). De efficiëntie van kunstmest in de praktijk is echter laag, waardoor er veel stikstof naar het milieu lekt. Dit gebeurt ook bij de verbranding van fossiele brandstoffen waarbij stikstofoxiden worden gevormd en via de lucht getransporteerd worden over grote gebieden. Verder is de verscheping van grote hoeveelheden reactief stikstof en andere nutriënten van de ene kant van de wereld, waar over het algemeen een tekort aan reactief stikstof heerst, naar gebieden met een overmaat aan stikstof, ook een factor van betekenis, zoals bij ons in Nederland. Hierdoor zijn de lekken naar het milieu in bepaalde gebieden geconcentreerd. De hoeveelheid reactief stikstof in de biosfeer vormt een van de belangrijkste milieuproblemen van dit moment. De stikstofemissies naar het milieu hebben grote gevolgen voor de lucht-, water en bodemkwaliteit en leidt tot milieuschade en bedreiging van de menselijke gezondheid. Er is ook een groot effect op het klimaat door de interactie met de koolstofcyclus en de stralingsbalans (o.a. Vitousek et al., 1997; Cowling et al., 2002; Galloway and Cowling, 2002; Galloway et al., 2003; 2008; Magnani et al., 2008; de Vries et al., 2008; Reay et al., 2008). Eenmaal in het milieu terechtgekomen heeft N_r een cascade aan effecten tot gevolg (Galloway et al., 2003; Erisman, 2004).

Ik zal mij in deze lezing richten op de achtergronden van de stikstofproblematiek, de gevolgen van stikstof voor het milieu en vooral de invloed ervan op het klimaat, de noodzaak om te komen tot een integrale benadering voor het verminderen van de effecten, de maatregelen die er zijn en tot slot het toekomstige benodigde onderzoek voor de leerstoel *Integrale Stikstofproblematiek*.

De stikstofcyclus en de invloed van de mens

De stikstofcyclus bestaat uit de omzetting van verschillende vormen van stikstof in de biosfeer. Alle organismen hebben stikstof nodig om aminozuren en daarmee proteïnen, nucleïnezuuren en, in het geval van bacteriën, celwandmateriaal te maken (Marschner, 1997). Aminozuren fungeren als neurotransmitters en regelaars van verschillende fysiologische processen, terwijl proteïnen als katalysator dienen voor verschillende chemische reacties, de basis vormen van onze genen, het immuun systeem verzorgen, het belangrijkste aandeel van onze spieren vormen en de belangrijkste bouwstenen zijn voor onze cellen. Gebrek aan hoge kwaliteit proteïnen in het dieet kunnen leiden tot bloeddruk problemen, seksuele disfunctionaliteit, vermoeidheid, obesitas, diabetes, regelmatige infecties, verteringsproblemen en botmassa verlies. Een ernstig tekort aan proteïnen in voeding kan tot voedingsstoffentekort leiden wat zich kan uiten in spiermassa afname, groeiverstoring en afgenomen immuniteit (Vitousek et al., 1997; Smil, 2001a, b; Townsend et al., 2003). Toegang tot voldoende stikstof in bruikbare vorm is daarom een voorwaarde voor het leven op aarde. Na koolstof, waterstof en zuurstof is stikstof het meest voorkomende element in micro-organismen. Stikstof kan in verschillende chemische samenstellingen voorkomen, zowel in geoxideerde als in gereduceerde vorm. In de atmosfeer komt het voornamelijk voor als di-stikstofgas (N₂). N₂ kan in de natuur op verschillende manieren worden omgezet in een reactieve vorm, zoals door onweer, waarbij door ontladingen NO_x wordt gevormd. Verder kunnen bacteriën, biologisch gezien, atmosferische stikstof vastleggen en omzetten in vormen geschikt voor metabolismen. Micro-organismen zijn de belangrijkste schakels van de stikstofcyclus in de biosfeer.

Het vastleggen van stikstofgas in ammonium door bacteriën is de eerste stap in de stikstofcyclus (Figuur 2). Door deze vastlegging komt stikstof in een vorm waarin het beschikbaar is voor planten die het voor de groei nodig hebben. Dieren hebben toegang tot deze stikstof door het eten van planten. Via hun uitwerpselen brengen zij de stikstof terug naar de grond. Ook wanneer de planten afsterven, wordt stikstof aan de grond teruggevoerd. In de grond wordt deze organische vorm van stikstof eerst omgezet in ammoniak, dan in nitriet en uiteindelijk in nitraat (nitrificatie). De bacteriën die deze omzetting verzorgen, zijn de nitrificerende aerobe bacteriën, behorende tot soorten met het voorvoegsel *Nitroso-* (NH_4^+ naar NO_2^- : *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Nitrosococcus*, *Nitrosolobus*) en *Nitro-* (NO_2^- naar NO_3^- : *Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrococcus*) (Smil, 2001b). Zo is de stikstof in de bodem weer beschikbaar voor de planten die het opnemen via de wortels. Andere bacteriën zorgen voor denitrificatie; zij zetten het nitraat om in N_2O en NO_2 . Deze gassen worden opgenomen in de atmosfeer waarmee de stikstofcyclus rond is (Smil, 2001b). Denitrificatie is een reductie-reactie die wordt uitgevoerd door anaerobe bacteriën, zoals *Pseudomonas* spp., *Achromobacter* spp., *Paracoccus* spp., *Moraxella* spp., *Bacillus* spp., *Alcaligenes* spp., en *Gluconobacter* spp., - allemaal in de bodem voorkomende bacteriën (Smil, 2001b). Denitrificatie is de belangrijkste bron van verlies van stikstof uit de bodem. Andere, minder belangrijke verliesposten zijn verdamping, uitspoeling, niet-enzymatische reacties van salpeterigzuur met ammoniumzouten of aminozuren, en chemische decompositie van nitriet onder zure omstandigheden.



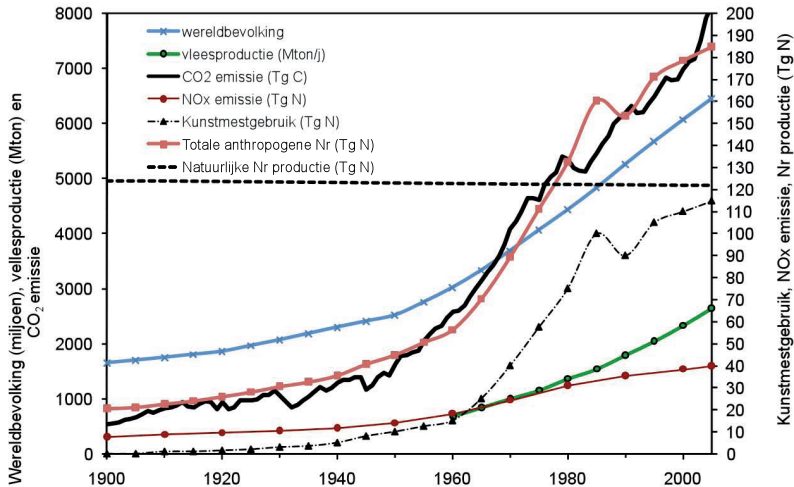
Figuur 2. De stikstofcyclus

De natuurlijke stikstofcyclus vormt een evenwicht tussen atmosfeer, het leven op aarde en de bodem, waarbij het transport of de beschikbaarheid van stikstof afhangt van regionale omstandigheden als locatie, klimaat, ecosysteem, grondsoort en vegetatie. Verstoring van de stikstofcyclus vindt plaats door het wegnemen of toevoegen van extra stikstofverbindingen op

verschillende plaatsen in de keten. Bijvoorbeeld door het verplaatsen van stikstof van de ene regio naar de andere, zoals vroeger met de chilistikstof werd gedaan en nu met krachtvoer, of door het fabriekmatig omzetten van de ene in de andere vorm zoals de productie van NH_3 uit N_2 . Het gevolg van de verandering in de cyclus is dat er verarming optreedt, of verrijking. Door toedoen van de mens wordt ook extra stikstof aan de cyclus toegevoegd; door de hoge temperaturen bij de verbranding van fossiele brandstoffen, reageren N_2 en O_2 tot stikstofverbindingen. De belangrijkste bronnen zijn het verkeer, de industrie, de huishoudens en de raffinaderijen (EEA, 2005). De stikstofoxiden die hierbij ontstaan worden toegevoegd aan de stikstofcyclus. Dit heeft niet alleen lokaal gevolgen. Door het atmosferisch transport treedt verrijking van de vegetatie en bodem met stikstof ook elders op (Goulding et al., 1998; Erisman en Fowler, 2003). Daar waar extra stikstof beschikbaar komt voor het verbouwen van gewassen, levert dat geen probleem op zolang er niet meer stikstof toegevoegd wordt dan er door het gewas wordt opgenomen. De natuurlijke bronnen van stikstof zijn de biologische stikstoffixatie (BNF) door bacteriën, uitbarstende vulkanen waarbij veel ammoniak in de lucht gebracht wordt en bliksem en bosbranden waarbij stikstofoxiden, NO_x , gevormd worden (Smil, 2001a; Reid et al., 2005). De natuurlijke wereldproductie van N_r ligt nu ongeveer op 125 Tg N (zie Figuur 3), waarvan 5 Tg gevormd wordt door bliksem en 120 Tg door BNF (Galloway et al., 2003; 2008; Schlesinger, 2009). De bijdrage van vulkanen is niet bekend.

Industriële N_r productie wordt geschat op 125 Tg/jr, gelijk aan de natuurlijke productie, waarvan 82% wordt gebruikt voor kunstmest en de rest voor de chemische industrie en explosieven (Galloway et al., 2008). Kunstmestgebruik in de landbouw is nu twee maal de BNF. De landbouw heeft er ook toe bijgedragen dat de BNF is toegenomen met 40 Tg/jr (Galloway et al., 2008). De verbranding van fossiele brandstoffen voegt 25 Tg/jr geoxideerde stikstof toe (Galloway et al., 2008; Schlesinger, 2009). In 2005 bedroeg de totale antropogene N_r productie 170 Tg (Schlesinger, 2009) tot 187 Tg/jr (Galloway et al., 2008). Opgeteld bij de natuurlijke N_r is de totale jaarlijkse wereldwijde productie 300 Tg.

Figuur 3 geeft de trend aan van de groei in stikstofproductie op wereldschaal. De grootste menselijke N_r productie komt van de industriële NH_3 productie, vier keer groter dan de NO_x emissies. Na de tachtiger jaren is de totale jaarlijkse menselijke N_r productie groter geworden dan de natuurlijke productie. Verder is er sinds die tijd een evenredige toename in N_r productie per jaar, vergelijkbaar met die in de wereldbevolking. Hetzelfde geldt overigens voor de jaarlijkse toename in CO_2 emissie; er is een grote correlatie tussen de koolstofproductie en stikstofverrijking met de wereldbevolking. Het maakt voorspellingen voor de toekomst relatief eenvoudig: als we geen maatregelen nemen zullen de koolstof en stikstof productie evenredig stijgen met de stijging van de wereldbevolking!



Figuur 3. Trend in wereldbevolking, CO₂ en Nr productie.

Effecten van stikstof

Aangezien de natuurlijke productie van Nr relatief laag is, is de natuur ingesteld op een zeer grote stikstofefficiëntie en is er een grote biodiversiteit ontstaan. Wanneer sprake is van een overmatige toevoeging, komt deze in het milieu terecht, bijvoorbeeld door uit- of afspoeling naar het (grond)water of emissie naar de lucht. In gebieden waar een systeem en vegetatiesamenstelling is ontstaan dat zich heeft aangepast aan het stikstofarme milieu, ontstaan snel problemen als extra stikstof wordt toegevoegd. De stikstofverrijking zorgt voor het verdwijnen of verdringen van de stikstofarme soorten door snel groeiende soorten die veel stikstof kunnen verwerken (Bobbink, 2004; Dise and Stevens, 2005; Phoenix et al., 2006; Bobbink et al., 2010). Hierdoor neemt de biodiversiteit af en worden de ecosystem services verminderd. De antropogene bronnen van Nr zijn

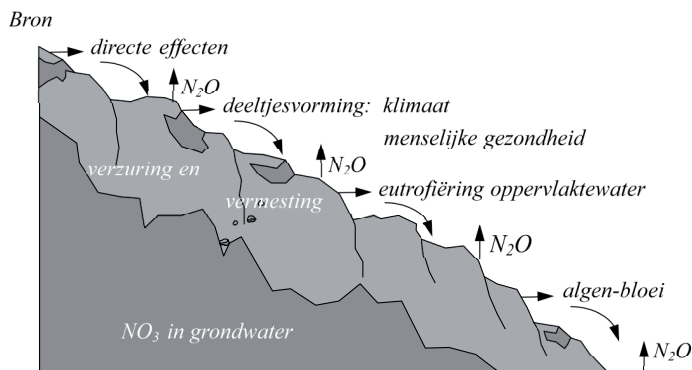
- de productie en het gebruik van kunstmest,
- de productie en het gebruik van mest,
- de industrie waar ammoniak wordt gebruikt,
- verbranding van fossiele brandstoffen voor energieproductie en gebruik in de industrie, en
- de drie-weg katalysator voor het verkeer waar ammoniak en soms lachgas als bijproduct gevormd wordt bij de omzetting van NO_x.

Deze bronnen zorgen voor nitraat uit- en afspoeling naar rivieren en het grondwater, en voor NH₃, NO_x en N₂O emissies naar de lucht. Grote concentratie van nutriënten door transport vanuit andere gebieden vormt ook een bron voor Nr in bepaalde gebieden.

Nr is goed oplosbaar en zeer mobiel in het milieu en het kan door chemische interactie snel veranderen van vorm (geoxideerd of gereduceerd). Uiteindelijk kan Nr weer omgezet worden in N₂ door bacteriën (denitrificatie) in de bodem. Globaal wordt ongeveer 40% van de Nr die in het milieu

komt gedenitrificeerd (Galloway et al., 2008). Een groot deel van de effecten kan het gevolg zijn van blootstelling aan Nr in bepaalde vorm en er kan sprake zijn van een cascade aan effecten. De antropogene verstoring van de stikstofkringloop op verschillende schalen kan tot velerlei effecten leiden, zoals (Langan, 1999; Cowling et al., 2002):

- aantasting van de menselijke gezondheid door de vorming van ozon, door andere fotochemische luchtverontreiniging en fijn stof, en door de contaminatie van het drinkwater met nitraat;
- verzuring van bodem en water;
- aantasting van monumenten en materialen;
- vermesting van bodem en water;
- achteruitgang van de biodiversiteit van ecosystemen;
- vermindering van ecosysteem services;
- schade aan vegetatie door blootstelling aan reactief-stikstofverbindingen en ozon;
- groeitoename en daarmee gepaard gaande additionele CO₂ opname en bij hogere niveau's groeireductie en daarmee gepaard gaande verminderde efficiëntie van CO₂-opname;
- toxische algenbloei en aantasting van zwemwaterkwaliteit;
- stankproblemen;
- klimaatverandering door N₂O (opwarming) en NH₄NO₃ (koeling);
- aantasting van de ozonlaag via NO_x-emissies van vliegtuigen op grote hoogte;
- belemmering van het zicht door deeltjesvorming.



Figuur 4. Het cascade-effect van stikstofatomen

In tegenstelling tot andere verontreinigende stoffen, kan door een stikstofatoom in reactieve vorm een opeenvolgende reeks van effecten optreden. Het zogenoemde 'cascade-effect' van stikstof is geïllustreerd in Figuur 4 (Galloway et al., 2003). Zo kan de stikstof in eerste instantie leiden tot directe schade aan vegetatie dichtbij bronnen, of bijdragen aan de vorming van deeltjes en smog waardoor de menselijke gezondheid wordt aangetast. Na verspreiding in de atmosfeer en depositie in natuurgebieden kan stikstof vervolgens verzuring of vermesting in de hand werken, en in de vorm van nitraat uitspoelen naar het grondwater en daarmee opnieuw een risico vormen voor de menselijke gezondheid, ditmaal via het drinkwater. Via het grondwater wordt ook het oppervlaktewater bereikt wat leidt tot eutrofiëring. Eenmaal getransporteerd naar zee kan de stikstof daar algenbloei veroorzaken. Vanuit zee, en ook in verschillende tussenstappen, kan lachgas

worden gevormd dat bijdraagt aan een versterkt broeikaseffect en klimaatverandering. Uiteindelijk wordt de stikstof weer tot N_2 omgezet, maar niet nadat het een deel van het stratosferisch ozon heeft afgebroken. Het is onduidelijk hoe belangrijk dit cascade effect is. Hiernaar is meer onderzoek nodig.

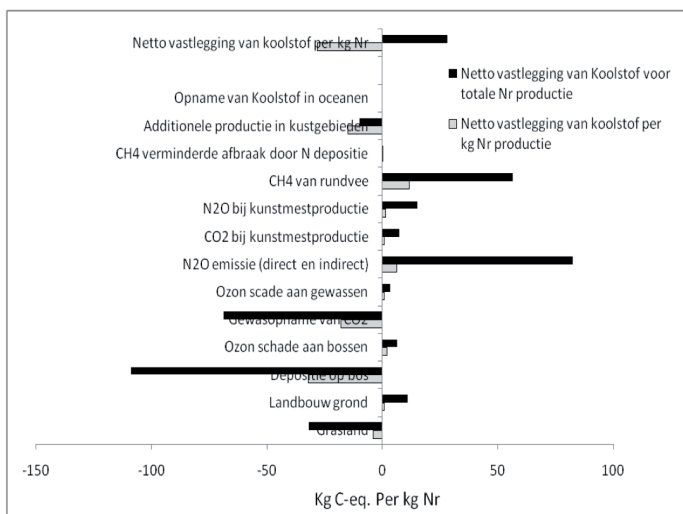
De invloed van Stikstof op de klimaatverandering

Nr heeft een groot effect op het klimaat door de interactie met de koolstofcyclus en de stralingsbalans. Het gaat hierbij om *directe en indirecte effecten*. Onder de *directe effecten* vallen de emissie van N_2O , een 300 keer sterker broeikasgas dan CO_2 , de vorming van het broeikasgas ozon, en de vorming van stikstofhoudende aerosolen, zoals ammoniumnitraat en ammoniumsulfaat. Deze hebben een koelende werking omdat ze zonlicht weerkaatsen en/of de condensatiekernen zijn voor de vorming van wolken, die de straling weerkaatsen (bv. Hungate et al., 2003). Onder *indirecte effecten* vallen de beïnvloeding van de koolstofvastlegging in landbouwgebieden, bossen en natuurgebieden, open wateren, kustgebieden en de oceanen. Kenmerkend voor deze beïnvloeding is de stikstofverrijking als gevolg van bemesting, de uit- en afspoeling en/of de atmosferische depositie. Het betreft hier de negatieve beïnvloeding van plantengroei (en dus CO_2 opname) door de blootstelling aan ozon, de afbraak van methaan door ozon (en daaruit gevormde OH-radicalen) en de verhoogde methaanuitstoot door rundvee als gevolg van geïmporteerde nutriënten (bv. Raey et al., 2008; De Vries et al., 2009).

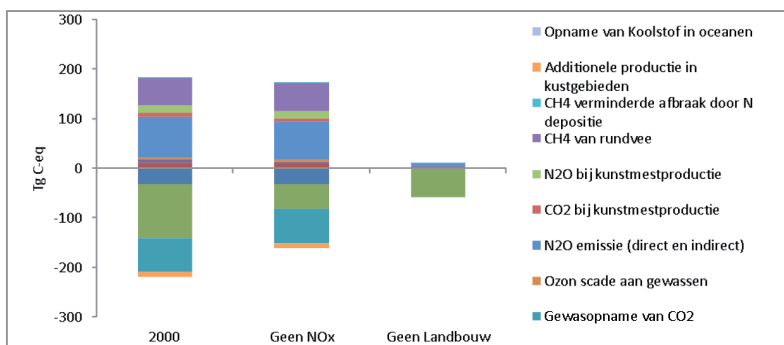
De belangrijkste indirecte invloed is de gestimuleerde groei via het luchttransport van stikstof en de depositie op bossen. Hierdoor wordt waarschijnlijk meer koolstof vastgelegd, precies zoals de bemesting in de landbouw (bv. De Vries et al., 2008; Magnani et al., 2007). Daar waar stikstof niet het groeilimiterende element is, zal extra depositie geen gevolgen voor de koolstofvastlegging hebben. Waar het wel gevolgen voor heeft, is de biodiversiteit. Nog voor er sprake is van groeistimulatie heeft Nr al een afname van de biodiversiteit tot gevolg. Bij hogere depositie wordt de afname steeds groter, wordt de vitaliteit van de bomen aangetast en het grondwater met nitraat belast. In deze fase zal ook de groeistimulans omslaan in groeiafname, N_2O emissies uit de bodem toenemen en de netto opname van CO_2 omslaan in emissies. Het is relevant dit te kunnen kwantificeren omdat het gevolgen kan hebben voor een klimaatovereenkomst waar de vastlegging van koolstof in bossen wordt gewaardeerd met koolstofcredits. Als hier extra koolstof wordt vastgelegd doordat er sprake is van stikstofdepositie, zou deze extra koolstof niet tot credits mogen leiden. Het gaat hier over ongecontroleerde bemesting in plaats van gecontroleerde en gestuurde (kunstmest) bemesting.

Ik heb geprobeerd voor Europa het effect van stikstof op het klimaat voor het eerst te kwantificeren. Hiertoe heb ik stikstof en koolstofbalansen gebruikt die recentelijk zijn gepubliceerd (Schulze et al., 2009; Velthof et al., 2009). De relaties zijn weergegeven in Figuur 5. Hier staat wat per kg stikstof het effect is op de CO_2 equivalenten voor de verschillende (in)directe relaties tussen stikstof en koolstof. Het netto effect is positief, ofwel per kg Nr wordt er koolstof vastgelegd. In dezelfde figuur is aangegeven wat er gebeurt als je de kg Nr gebruikt die nu geproduceerd wordt in Europa, dan is het netto effect negatief. De opname van CO_2 -eq. is kleiner dan de afgifte door de grotere absolute bijdrage van Nr aan de CO_2 emissies. Belangrijk in de balans zijn de CO_2 opname door bossen en de N_2O emissie uit de landbouw. Wanneer je nu landbouw en energie scheidt, door de kg Nr uit landbouw niet mee te rekenen en andersom, dan komen daar de twee balansen uit die staan in Figuur 6. Figuur 6 geeft de netto CO_2 -eq. per bron weer voor de huidige situatie (jaar 2000) en voor 2

scenario's: geen landbouw en geen NOx van fossiele brandstoffen. De resultaten geven aan dat de emissie van NOx een positief effect heeft via de depositie op bossen, ondanks dat dezelfde NOx depositie die een grotere opname tot gevolg heeft ook ozon vormt dat schade aan de bossen toebrengt, waardoor er een groeiafname plaats vindt. De landbouw ziet er veel complexer uit en laat een netto emissie van broeikasgassen zien. Er moet bij gezegd worden dat het positieve effect van de stikstofbemesting op bossen, zoals eerder vermeld, teniet gedaan wordt door het verlies aan biodiversiteit en de grondwater belasting. Dit soort studies geeft ons houvast over waar we ons onderzoek en mogelijke maatregelen op moeten richten.



Figuur 5. De directe en indirecte effecten van Nr op de koolstofbalans als Kg C per kg Nr en als totale hoeveelheid koolstof (TG) per totale hoeveelheid Nr in Europa.



Figuur 6. De directe en indirecte effecten van totaal Nr op de koolstofbalans in Europa (Tg) voor 2000, bij het uitsluiten van landbouw en bij het uitsluiten van NOx.

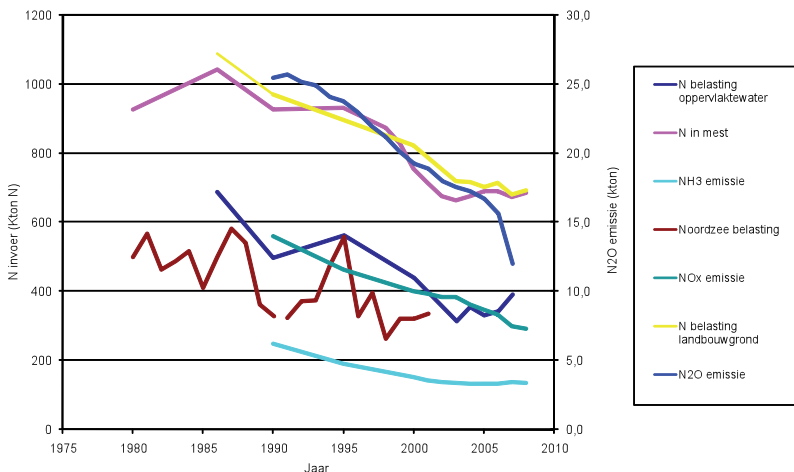
Waarom een integrale benadering?

Bovenstaande heeft duidelijk gemaakt dat de stikstofproblematiek door veel verschillende bronnen uit verschillende sectoren bepaald wordt, die door de interactie in het milieu en het cascade effect uiteindelijk tot een scala aan effecten leidt, waarbij de oorsprong van de reactieve stikstof er niet meer toe doet. Hierdoor zal een integrale benadering meerwaarde hebben. Daar waar Nr gereguleerd wordt, is dit op individuele verliezen naar het milieu gestoeld: er is 1) een Nitraat Richtlijn die uit- en afspoeling naar het (grond)water reguleert, 2) een Luchtkwaliteit Richtlijn, die NO_x en de vorming van deeltjes reguleert, 3) de Emissieplafond Richtlijn die een maximum stelt aan verzurende en ozon vormende emissies, 4) het Kyoto protocol dat de emissies van broeikasgassen limiteert, etc.

Een integrale benadering zou gericht moeten zijn op het verminderen van de effecten van reactief stikstof terwijl de voedsel- en energievoorziening toereikend blijft. Het beleid en de maatregelen zouden gericht moeten zijn op:

- het beperken van de productie van niet biologisch Nr, wat de hele cascade aan milieu effecten vermindert;
- het verhogen van de efficiëntie van het gebruik van stikstof, dat de verliezen naar het milieu beperkt;
- het verminderen van de invoer van nutriënten en van de concentratie ervan door relatief kleine gebieden (zoals Nederland). Dit draagt bij aan een betere verdeling van reactief stikstof dat een vergroting van de efficiëntie tot gevolg kan hebben; en
- de bevordering van omzetting in N₂ daar waar verliezen naar het milieu niet kunnen worden voorkomen. Dit is o.a. te bewerkstelligen door katalytische omzetting of door het bevorderen van de-nitrificatie.

Het stikstofbeleid in Nederland heeft de afgelopen jaren zijn vruchten afgeworpen (Erisman et al., 2005). Figuur 7 toont dat alle emissies van stikstof naar het milieu een dalende trend hebben laten zien. Dit is het gevolg van emissiereducerende maatregelen, zoals de inzet van katalytische omzeters voor NO_x emissies in personenvervoer (drie-wegkatalysator) en in de industrie (Selective Catalytic Converter, SCR) en van mestinjecteurs, emissie-arme stallen, etc. Een belangrijke bijdrage aan de vermindering van emissies is geleverd door de introductie van het mineralen boekhoudingsysteem MINAS in de landbouw. Dit heeft er voor gezorgd dat het gebruik van kunstmest de afgelopen jaren is afgenomen en daarmee de emissies van stikstof naar het milieu. Ik vind dit een goed voorbeeld van een integrale maatregel die helaas onder druk van de Europese Commissie niet blijvend is toegepast. De stikstofniveaus zijn nog ver boven de kritische waarden en er lijkt de afgelopen jaren een stilstand in de dalende trend te zijn opgetreden.



Figuur 7. Trend in stikstofemissies naar het milieu in Nederland. Bron: www.compendiumvoordeleefomgeving.nl

Een belangrijke parameter/indicator voor een integrale aanpak is de stikstofefficiëntie (Neff), gedefinieerd als de Stikstof in het product gedeeld door dat wat nodig was voor het product, in procenten. Tabel 1 geeft een overzicht van de Neff in de verschillende sectoren in Nederland.

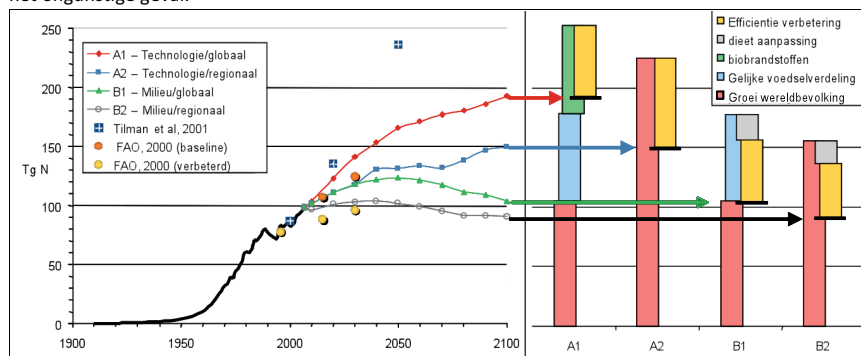
Tabel 1. Stikstofefficiëntie in verschillende sectoren in Nederland in 2000 (Erisman et al., 2005)

Sector	N input (kton/jr)	N output (kton/jr)	N _{eff} (%)	N loss (kton/jr)
Landbouw	859	288	34	571
Industrie	1038	949	91	89
Kunstmest industrie	2580	2526	98	54
Verkeer en transport	88	0	0	88
Huishoudens	425	300	71	125
Afvalverwerking	86	34	40	52

De grootste Nr productie vindt plaats in de kunstmestindustrie. Aangezien Neff hier vrij hoog is, is er relatief weinig verlies naar het milieu. Het grootste verlies zit in de landbouw met een lage Neff, en de huishoudens. De Neff in de landbouw is wel gerelateerd aan het kunstmestgebruik. Het is de kunstmest die accumuleert en in het landbouwsysteem cascadeert. Bij de verbranding van fossiele brandstoffen is Neff nul, omdat Nr verlies hier een ongewenst bijproduct is. De depositie die het gevolg is van de emissies van stikstof van fossiele bronnen geldt als behoorlijke input in het landbouwsysteem. Het beleid en de maatregelen zullen daarom in onderlinge samenhang moeten worden beschouwd in een integrale benadering.

Wat kunnen wij doen?

De landbouw en de productie van ons voedsel heeft topprioriteit. De omvang van de veestapel bleef in Nederland tot aan de Tweede Wereldoorlog beperkt omdat de boeren de dieren voornamelijk voor eigen consumptie fokten. Pas na de oorlog stegen de dierenaantallen sterk. De overheid stimuleerde de voedselproductie; Nederland zou nooit meer een hongerwinter kennen! Hetzelfde zien we nu in China waar de voedselproductie topprioriteit heeft, zodanig dat kunstmest sterk gesubsidieerd wordt. Hetzelfde zal in Afrika gaan gebeuren. Figuur 8 geeft een inschatting van het kunstmestgebruik voor de komende 100 jaar gebruikmakend van vier IPCC scenario's (Erisman et al., 2008). Het figuur laat zien dat in het gunstigste geval het wereld kunstmestgebruik gelijk blijft aan dat in 2000, maar dat in alle drie de andere scenario's het gebruik groeit, zelfs tot een factor twee in het ongunstige geval.



Figuur 8. Scenario's voor het kunstmestgebruik de komende 100 jaar gebaseerd op IPCC scenario's (IPCC, 2007). Er is een inschatting gemaakt van de invloed van de 5 belangrijkste factoren (verbetering van de efficiëntie, aanpassing dieet, groei van biobrandstoffen, gelijke voedselverdeling over de wereld en de groei van de wereldbevolking) op het kunstmestgebruik (Erisman et al., 2008).

Het spanningsveld tussen de grote behoefte aan voedsel, vlees en energie aan de ene kant, en het milieu en de stikstofproblematiek aan de andere kant, is en blijft daarmee erg groot. Het is moeilijk gebleken om de honger naar energie te stillen dan wel de fossiele bronnen te vervangen door duurzame bronnen die geen NOx emitteren. Hetzelfde geldt voor onze honger naar voedsel, de groei van de wereldbevolking en de veranderende diëten (meer vlees), zoals uit Figuur 8 blijkt. In beide gevallen is door besparing reeds veel te winnen; besparing van energie door technologische en gedragsmaatregelen. Besparing van kunstmest heeft in Nederland de afgelopen jaren de stikstofverliezen naar het milieu doen afnemen, zonder noemenswaardige verliezen van productie (zie Figuur 7). De vraag is hoe dit in de toekomst met de groeiende wereldbevolking en behoefte aan voedsel en veranderende diëten zal gaan, even zoals de groeiende behoefte aan biobrandstoffen (Fig. 8).

Er zijn verschillende maatregelen die een positief effect hebben op het milieu, zonder dat het ten koste gaat van de voedsel- of energievoorziening. Tot de niet-technologische opties in de landbouw behoren:

- Kunstmestgebruik: aanwending op het juiste tijdstip, juiste plaats met de beste technologie en optimale bemestingsniveau – onder andere door het beter scholen van boeren in het efficiënt gebruik en toepassen van (kunst)mest (zie fig. 7);
- Managen op het juiste optimum: stikstofgift, gewasopbrengst of economisch optimum.
- Nieuwe gewas selectie en teelt;
- Water en land management;
- Aanpassing voer voor intensieve veehouderij;
- Efficiënter gebruik van producten (voedsel, energie, biomassa) en verminderen van afval.

Technisch gezien is er ook veel mogelijk:

- katalytische omzetting van NOx bij de verbranding van fossiele brandstoffen;
- vervanging van fossiele brandstoffen door energiebesparing;
- zon- en windenergie;
- N₂O reductie bij de kunstmestproductie;
- Gebruik van gecoate kunstmestkorrels (getemporiseerde afgifte van stikstof in de bodem);
- Tweede generatie kunstmest op basis van organisch gebonden stikstof (biochar);
- Genetische manipulatie van gewassen en markt-ondersteunde genetische selectie voor de identificatie van genen die de stikstofefficiëntie verhogen (Good et al., 2004).
- Landbewerking- en bebouwingstechnieken voor optimale Nr en C benutting/vastlegging;
- precisie bemesting ondersteund door satellietwaarnemingen en GPS technologie;
- gesloten kringlopen in de veehouderij door emissievrije stallen en mestverwerking;
- tertiaire afvalwaterbehandeling, vooral in ontwikkelingsgebieden.

In een recent artikel van Galloway e. a. (2008) is berekend dat deze maatregelen een kwart tot een derde van de huidige Nr productie kunnen verminderen. In IPCC (2007) is berekend dat deze maatregelen in termen van CO₂ kosten erg lucratief kunnen zijn omdat de meeste geld op brengen (management), terwijl de technologische maatregelen veelal beneden de 15 €/ton liggen.

Er is een grote rol weggelegd voor de consument, vooral in relatie tot energiegebruik en vleesconsumptie. Met de groei van de economie (BNP), neemt ook de vleesconsumptie toe. De Neff voor vlees is zeer laag vergeleken bij die van vegetarisch voedsel. Ook is er een groot verschil tussen verschillende soorten vlees: rundvlees is twee maal zo inefficiënt als varkensvlees, wat weer twee keer zo inefficiënt is als kippenvlees. Het meest efficiënte vlees is dat van insecten. Beperken van de vleesconsumptie heeft grote positieve invloed op de stikstofkringloop en ook op andere milieugevolgen (Milieubalans, 2009).

Waar zal de leerstoel zich de komende jaren op richten?

De stikstofcyclus is een van de meest door mensen aangetaste biogeochemische cycli. Er zijn gebieden met te weinig en gebieden met teveel stikstof. Er is een groot aantal vragen te formuleren op het gebied van de stikstofcyclus, maar het is vooral op het snijvlak met andere cycli, zoals water en koolstof waar interessante onderzoeksuitdagingen liggen. ECN heeft een (inter)nationale positie op het gebied van stikstofonderzoek en assessments. De activiteiten bestaan uit de ontwikkeling van meetinstrumenten voor luchtsamenstelling, en kwantificering van de atmosfeer-biosfeer uitwisseling. Ze bestaan uit ontwikkeling van modellen voor de verspreiding van stikstof in de biosfeer, uit assessments van blootstelling, effecten, drivers (kunstmestgebruik, biofuels,

energiegebruik, stikstoffefficiëntie, etc.). Daarnaast kijkt ECN naar mogelijk beleid voor vermindering van de problematiek.

De afdeling Hydrologie en Geomilieuwetenschappen van het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU heeft als doel het bestuderen, analyseren en voorspellen van de effecten van menselijke invloeden (zoals veranderend landgebruik) en klimaat op hydrologische, hydrochemische, hydrometeorologische en biogeochemische en ecologische processen. Het doel is te begrijpen hoe deze processen worden geïntegreerd op stroomgebied en aquifer schaal. De afdeling doet theoretisch, praktisch, fundamenteel en toegepast onderzoek. Veldwerk en veldexperimenten zijn een essentieel onderdeel van onze onderzoek en onderwijsstrategie. De stikstofcyclus is een belangrijke aanvulling op de onderwerpen binnen de afdeling, mede vanwege het grote effect op de koolstofcyclus.

Het toekomstige onderzoek zal zich richten op de volgende onderwerpen:

- Het kwantificeren van de interactie tussen de koolstof- en stikstofcyclus. Dit kan door meting van de fluxen boven bos, het vaststellen van de factoren die de fluxen en interacties bepalen (modellering) en door vertaling van de resultaten in modellen die op Europese schaal de interacties kwantificeren. De modellen worden getoetst met onafhankelijke metingen. Tijdens het side event op de eerste dag van COP15 in Kopenhagen heb ik gepleit voor het schrijven van een Special report on Nitrogen and Climate, door de Taskforce of Reactive Nitrogen en IPCC;
- Het kwantificeren van de bronnen en putten van stikstof in de stikstofcascade. Dit betreft de stikstofvastlegging in ecosystemen en de (de)nitrificatie waarbij de reactieve stikstof omgezet wordt in atmosferisch stikstof en geen bijdrage levert aan de cascadering van effecten van stikstof in reactieve vorm. Het betreft zowel metingen als modellering op verschillende schalen en voor verschillende systemen;
- Het maken van een ammoniak emissie- en depositiekaart op verschillende schalen. Hier zit momenteel de grootste onzekerheid in de stikstofcyclus en kwantificering van de depositie van stikstof. Beide zijn nodig voor het bepalen van de effecten op biodiversiteit, eutrofiering en de koolstofinteracties;
- Het leveren van een bijdrage aan (inter)nationaal onderzoek naar de stikstofcyclus in relatie tot biomassaproductie en voedselvoorziening. Het gebruik van kunstmest in de landbouw en het ineffektieve gebruik ervan leidt tot een cascade van effecten in het milieu in verschillende systemen. De groei van de wereldbevolking, het verschuiven van voedselpatronen en het gebruik van biomassa voor de energievoorziening zal een sterke wereldwijde groei van het kunstmestgebruik veroorzaken. Er is sterke behoefte aan kwantificering van de voor- en nadelen, de cascade effecten en de bronnen en putten van reactief stikstof in het milieu.
- Het uitdragen van de resultaten van dit onderzoek via nationale en internationale programma's (bv. COST, ESF en mogelijk UNEP). Het is van belang dat het publiek, de overheid en de stakeholders zich bewust worden van de groeiende problemen als gevolg van de groeiende stikstofbelasting in het milieu. Hiervoor is het noodzakelijk om communicatiemiddelen te ontwikkelen, zoals het stikstofspel NitroGenius

(www.nitrogenius.com), het visualisatietool (www.initrogen.org/visualisation.html) en recentelijk de footprint calculator voor stikstof (www.N-print.org).

Een deel van deze onderwerpen vergen een multidisciplinaire aanpak en zullen in samenwerking met andere afdelingen binnen de VU worden uitgevoerd. Juist de mogelijkheden van deze multidisciplinaire aanpak maakt de VU zeer geschikt om de complexe stikstofproblematiek te onderzoeken. De nadruk zal liggen op de atmosfeer-biosfeer uitwisseling en de invloed van stikstof op broeikasgasontwikkeling en visa versa.

Het onderwijs zal zich richten op eerstejaars, Global Change, master onderwijs (Global Biogeochemical Cycles). Ook zal het een sterke bijdrage kunnen leveren aan het onderwijs van Aarde en Economie vanuit een integraal stikstof perspectief, waarin ook aandacht kan worden besteed aan maatschappelijke processen.

Het doel van de leerstoel Integrale Stikstofproblematiek is deze aspecten nader te onderzoeken om te komen tot nieuw beleid en maatregelen op het gebied van stikstof management. Hierdoor kunnen de milieu- en klimaateffecten worden beperkt terwijl in de behoefte naar voldoende voedsel en energie kan blijven worden voorzien. Ik zal mij binnen de leerstoel Integrale Stikstofproblematiek richten op onderwijs, op bovenstaande wetenschappelijke vragen en de vertaling ervan in integraal beleid en integrale maatregelen die tot verbetering kunnen leiden.

Dankwoord

Dames en heren, aan het einde van mijn rede gekomen, wil ik de directie van het Energieonderzoek Centrum Nederland en het College van Bestuur van de Vrije Universiteit bedanken voor het instellen van de leerstoel en mijn benoeming als hoogleraar daarop. In het bijzonder dank ik Han Dolman en Bauke Oudega hiervoor. Kees van der Klein ben ik veel dank verschuldigd aangezien hij mij de afgelopen jaren heeft ondersteund in mijn ontwikkeling en mij alle vrijheid daartoe heeft gegeven. Mijn collega's van ECN en dan vooral die van de unit Biomassa, Kolen en Milieuonderzoek ben ik zeer erkentelijk voor de prettige samenwerking en de geweldige ondersteuning. Albert Bleeker wil ik speciaal noemen omdat wij de afgelopen jaren samen veel gerealiseerd hebben (inter)nationaal. Wetenschap doe je niet alleen en daarom wil ik de volgende collega's bedanken voor hun (in)directe bijdrage aan de ontwikkeling van de kennis rond de stikstofproblematiek (in alfabetische volgorde): Roel van Aalst, Willem Asman, Aldrik Bakema, Ronald Bobbink, Fred Bosveld, Ton Bresser, Ed Buijsman, Hub Diederer, Han van Dobben, Geert Draaijers, Jan Duyzer, Ludger van der Eerden, Klaas van Egmond, Bernard van Elzakker, Kees Folkertsma, Hans van Grinsven, Bronno de Haan, Gerard ter Hart, Bert-Jan Heij, Arjan Hensen, Peter Heuberger, Klaas van der Hoek, Nico Hoogervorst, Monique Hootsmans, Wilfried Ivens, Hans van Jaarsveld, Peter Janssen, Alex Kamst, Jep Karres, Volkert Keizer, Kees van der Klein, Hans Kros, Frank de Leeuw, Erik van Leeuwen, Leny Lekkerkerk, Dick van Lith, Sje van der Lubbe, Hans Maas, Harriet Marseille, Marcel Mennen, Gert-Jan Monteny, Oene Oenema, Dirk Onderdelinden, Elsbeth Pinksterboer, Edith van Putten, Gert-Jan Reinds, Jan Roelofs, Ferd Römer, Kaj Sanders, Sjaak Slanina, Johan Sliggers, Rob Smeenge, Stan Smeulders, Chris Venderbos, Aart Vermetten, Alex Vermeulen, Germt de Vries, Wim de Vries, Anita Waijers-Ijpelaar, Hilbrand Weststrate, Paul Wyers, en iedereen die ik verder vergeten ben!

Ik wil Baud Schoenmaeckers bedanken voor zijn kritisch commentaar op dit manuscript en zijn tips om de leesbaarheid te verbeteren.

Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor alles wat ze mij hebben meegegeven. Mijn twee geweldige dochters Jetske en Marja ben ik heel dankbaar voor de liefde en steun die ze mij gegeven hebben! Ik ben vreselijk trots op jullie en hoop dat jullie dat ook op mij kunnen zijn!

Ik heb gezegd

Referenties

- Bobbink, R., 2004. Plant species richness and the exceedance of empirical nitrogen critical loads: an inventory. Report Landscape Ecology. Utrecht University/RIVM, Utrecht, pp. 1-19.
- Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erisman, J.-W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L., & de Vries, W. (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on plant terrestrial diversity: a synthesis. *Ecological Applications* (in press).
- Brimblecombe, P. (1989). *The big smoke*. Londen, Engeland.
- Cowling E.B., Galloway J.N., Furiness C.S., Erisman J.W. (2002). *Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection: Report from the Second International Nitrogen Conference*. Washington (DC): Ecological Society of America.
- Crookes, Sir William (1898) Presidential Address to the British Association for the Advancement of Science 1898. Published in *Chemical News*, 1898, 78, 125
- De Vries W., Solberg S., Dobbertin M., Sterba H., Laubhahn D., Reinds G.J., Nabuurs G.-J., Gundersen P. (2008) Ecologically implausible carbon response. *Nature*, 451, E1-E3.
- De Vries, W., Solberg S., Dobbertin M., Sterba H., Laubhahn D., van Oijen, M. Evans, C., Gundersen, P., Kros, J., Wamelink, G.W.W., Reinds, G.J. Sutton, M.A. (2009) The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and heathlands, *Forest Ecology and Management*, Volume 258, Issue 8, The relative importance of nitrogen deposition and climate change on the sequestration of carbon by forests in Europe, 1814-1823, ISSN 0378-1127, DOI: 10.1016/j.foreco.2009.02.034.
- Dise, N.B., Stevens, C.J., 2005. Nitrogen deposition and reduction of terrestrial biodiversity: evidence from temperate grasslands. *Science in China Series C, Life Sciences/Chinese Academy of Sciences* 48, 720-728.
- European Environment Agency (EEA), 2005. *The European environment – State and outlook 2005*. Copenhagen. 576 pp.
- Erisman, J.W., 2000. *De vliegende geest: ammoniak uit de landbouw en de gevolgen voor de natuur*. BetaText, Bergen, Nederland, ISBN 90-75541-06-6, 271 pp.
- Erisman J.W., et al. (1998). Nitrogen, the Confer-N-s, First International Nitrogen Conference 1998: Summary statement. *Environmental Pollution* 102: 3–12.
- Erisman J.W. and Fowler D. (2003), Oxidized and Reduced Nitrogen in the Atmosphere, in *KNOWLEDGE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT An Insight into the ENCYCLOPEDIA OF LIFE SUPPORT SYSTEMS Volumes I,II,III*, UNESCO Publishing-Eolss Publishers, Oxford, UK.
- Erisman, J.W. The Nanjing declaration on management of reactive nitrogen (2004) *BioScience*, 54 (4), pp. 286-287.
- Erisman, J.W., Domburg, N., de Vries, W., Kros, H., de Haan, B., Sanders, K. The Dutch N-cascade in the European perspective. (2005) *Science in China. Series C, Life sciences / Chinese Academy of Sciences.*, 48 Spec No, pp. 827-842.
- Erisman, J.W. Galloway, J.A. Sutton, M.S. Klimont, Z. & Winiwater, W. (2008) How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1: 636 - 639.
- Galloway, J.N., Cowling, E.B., 2002. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio* 31, 64-71

- Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B., Cosby, B.J. (2003) The nitrogen cascade *BioScience*, 53 (4): 341-356.
- Galloway, J.N., Townsend, A.R. Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z.e Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A. (2008) Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320: 889-892
- Good, A.G., Shrawat, A.K. and Muench, D.G. (2004) Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *TRENDS in Plant Sci.*, 9, 597-605
- Goulding, K.W.T., Bailey, N.J., Bradbury, N.J., Hargreaves, Y.P., Howe, M., Murphy, D.V., Poulton, P.R., Wilson, T.W., 1998. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. *New Phytologist* 139 (1), 49-58.
- Hungate, B., Dukes, J.S., Shaw, M.R., Yiqi Luo and Field, C.B. (2003) Nitrogen and climate change. *Science*, 302, 1512-1513.
- Langan J, editor. (1999) *The impact of nitrogen deposition on natural and seminatural ecosystems*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 1– 251.
- Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis PG, Kolari P, Kowalski AS, Lankreier H, Law BE, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff JB, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J (2007) The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 447: 848-850
- Mansfield TA, Goulding KWT, Sheppard LJ, editors. (1998) *Major biological issues resulting from anthropogenic disturbance of the nitrogen cycle*. *New Phytol*, vol. 139. Cambridge, UK: Cambridge University Press. p. 1– 234.
- Marschner, H. (1997) *Mineral nutrition of higher plants*. Second edition. Academic Press Limited, London. ISBN 0-12-473542-8, pp 889.
- Matson, P., Lohse, K.A., Hall, S.J., 2002. The globalization of nitrogen: consequences for terrestrial ecosystems. *Ambio* 31, 113-119
- Phoenix, G.K., et al., 2006. Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: the need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts. *Global Change Biology* 12, 470e476.
- Reay, D. S, Dentener, F., Smith, P., Grace, J., Feely, R. Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nature Geosci.* 1, 430–437 (2008).
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J.A. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475 (24 September 2009) | doi:10.1038/461472a
- Reid WV, Mooney HA, Cropper A, Capistrano D, Carpenter SR, Chopra K e.a. (2005) *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
- Schlesinger, W.H. (2009) On the fate of anthropogenic nitrogen. *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences)* 104:203-208
- Schulze, E.D., Luysaert, S. Ciais, P., Freibauer, A., Janssens, I.A. et al. *Nature Geoscience* 2, 842–850 (2009); published online: 22 November 2009; ...

- Smil, V. (2001a) *Cycles of Life; Civilization and the Biosphere*. Scientific American Library, New York, ISBN 0-7167-6039-8, pp 221.
- Smil, V. (2001b) *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch and the Transformation of World Food Production*. The MIT Press, Cambridge, MA, xvii + 338 pp.
- Snelders, H.A.M. (1984). *Landbouw en scheikunde in Nederland in de voor-Wageningse periode (1800-1876)*.
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, and de Haan C. (2006) *Livestock's long shadow: environmental issues and options* (Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp.
- Stevens, C.J., Dise, N.B., Mountford, J.O., Gowing, D.J., (2004) Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science* 303 (5665), 1876-1879.
- Townsend, A. R., R. W. Howarth, M. S. Booth, C. C. Cleveland, S. K. Collinge, A. P. Dobson, P. R. Epstein, E. A. Holland, D. R. Keeny, and M. A. Malin. 2003. Human health effects of a changing global nitrogen cycle, *Frontiers in Ecol.*, 1(5), 240-246.
- UNEP (2007) *Reactive Nitrogen in the Environment - Too Much or Too Little of a Good Thing*. UNEP, Nairobi, Kenya.
- Van Aardenne, J.A., Dentener, F.J., Olivier, J.G.J., Klein Goldewijk, C.G.M. and J. Lelieveld (2001) A 1 x 1 degree resolution dataset of historical anthropogenic trace gas emissions for the period 1890-1990. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 909-928
- Velthof et al., 2009 G.L. Velthof, D.A. Oudendag, H.P. Witzke, W.A.H. Asman, Z. Klimont and O. Oenema, *Integrated assessment of nitrogen losses from agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE*, *J. Environ. Qual.* 38 (2009), pp. 402-417.
- Vitousek, P.M. and J.M. Melillo, 1979. Nitrate losses from disturbed forests: Patterns and mechanisms. *Forest Sci.* 25: 605-619.
- Vitousek, J.P.W., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H., Tilman, D.G., 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* 7 (3), 737e750.
- Von Liebig, J (1840). *Die organische Chemie in ihre Auswendung auf Agricultur und Physiologie*. Brunswick, Duitsland.
- Yang, H.S., 2006. Resource management, soil fertility and sustainable crop production: Experiences of China, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 116, Issues 1-2, *Nutrient Management in Tropical Agroecosystems*, August 2006, Pages 27-33, ISSN 0167-8809, DOI: 10.1016/j.agee.2006.03.017.

Het bemesten van de lucht

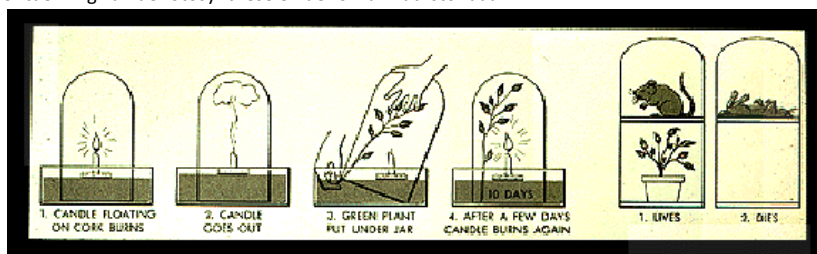
Over stikstof en de voedsel-, energie- en milieuproblematiek

Mijnheer de Rector, collega's, familie en vrienden,

Eind 2009 is de Klimaatconferentie COP15 in Kopenhagen afgesloten zonder noemenswaardige afspraken die noodzakelijk zijn om klimaatverandering op termijn tegen te gaan. Klimaatverandering is het onderwerp dat op dit moment de milieugenda domineert. Er zijn echter ook andere milieuproblemen die vergelijkbare aandacht zouden verdienen en een geïntegreerde aanpak vergen, zoals de stikstofproblematiek. In een recente publicatie in *Nature* is door een groot aantal onderzoekers een top 10 van problemen gegeven die op dit moment al buiten het draagvlak van de planeet komen of daar snel aan voorbij gaan (Rockström et al., 2009). Klimaatverandering en biodiversiteit staan op de plaatsen een en twee, gevolgd door de menselijke veranderingen van de stikstofcyclus. Dit geeft aan dat stikstof een groot wereldwijd milieuprobleem vormt, zeker omdat stikstof ook bijdraagt aan de top 2: de afname van de biodiversiteit en aan een versnelling van de klimaatverandering!

Inleiding

Stikstof is waarschijnlijk in 1772 ontdekt door Daniel Rutherford. Dit is niet geheel duidelijk omdat er tegelijkertijd door Scheele, Cavendish en Priestley onderzoek werd gedaan naar 'verbrande of van ontvlambaarheid ontdane lucht', zoals lucht zonder zuurstof destijds werd genoemd. Stikstof maakt 78% uit van het volume van de lucht en is inert. Vanwege deze inertie noemde Lavoisier het *azote* wat 'levenloos' betekent. De term 'dode lucht' kwam van de experimenten die gedaan werden met muizen door Rutherford (en anderen). Muizen werden onder afgesloten glazen stolpen gezet en stierven als de zuurstof op was (Figuur 1). De door de muizen uitgedemde CO_2 werd verwijderd met verbrande kalium. De achtergebleven lucht, die geen leven of verbranding toelaat, werd 'dode lucht' genoemd en bestond voornamelijk uit N_2 . De naam 'stik-stof' is hiervan dus afkomstig. Met dezelfde soort proeven werd door Priestley aangetoond dat planten die onder de stolpen werden gebracht, het leven van de muizen konden verlengen. Deze ontdekking was de eerste stap op weg naar de ontdekking van de fotosynthese en de rol van zuurstof daarin.



Figuur 1. Experimenten met muizen voor het bepalen van de samenstelling van de lucht (door Joseph Priestley).

Al het leven op aarde heeft stikstof in een reactieve vorm nodig voor aminozuren en proteïnen en krijgt dit via het voedsel naar binnen. Er is veel stikstof op aarde, maar niet alles is in de juiste, te gebruiken vorm. Stikstof in de lucht bestaat voor 78% uit stikstofgas, of het is gebonden in rotsen in de aarde. Reactief stikstof, in het milieu N_r , is gedefinieerd als de stikstof die in verbindingen vastzit, dus alle stikstof op aarde behalve het gasvormige N_2 . Het is al honderden jaren bekend dat stikstofverbindingen in regenwater een belangrijke voedingsbron voor gewassen vormt (Brimblecombe, 1989). De Romeinen wisten al dat planten niet alleen water opnemen, maar ook de nutriënten uit het water. Beide factoren werden van belang geacht voor plantengroei. De mens is altijd op zoek naar manieren extra nutriënten toe te voegen om de bodem vitaal te houden en de plantengroei te bevorderen. In 280-233 B.C. schreef Han Feizi al dat menselijke uitwerpselen gebruikt moesten worden om de bodemgesteldheid te herstellen: "Landbouw is een grap zonder bemesting" (Yang, 2006).

Over de betekenis van mineralen voor plantenvoeding kwam men niet veel verder dan vermoedens, ofschoon de mens al eeuwen eerder de waarde van mineralen zoals kalk, gips en mergel als meststof had ingezien. Von Liebig veronderstelde dat planten slechts een beperkt aantal nutriënten nodig hebben voor de groei (Von Liebig, 1840). Deze voedingsstoffen zijn beschikbaar in de bodem en dienen, wanneer ze opgebruikt raken na intensieve landbouw, weer aan de bodem te worden toegevoegd om voldoende volgende gewasopbrengsten te kunnen garanderen. Hij is hiermee de grondlegger van de mineralen theorie en daarmee ook van de kunstmestindustrie (Erisman, 2000).

Wetenschappers houden zich al heel lang met het bemestingsvraagstuk bezig. In het midden van de 18de eeuw voerde de Duitse chemicus Johann Rudolph Glauber in Amsterdam proeven uit met salpeter als kunstmest (Snelders, 1984). Glauber constateerde dat salpeter een essentiële stof is voor vegetatie. Salpeter werd toen alleen gebruikt voor het maken van buskruit en dus niet grootschalig geproduceerd. De Engelsman Davy ontdekte dat salpeter de stikstof levert die nodig is voor de vorming van eiwitten. Begin 1800 gebruikten boeren in Engeland voor het eerst salpeter. Door de bevindingen van Boussingault en von Liebig tussen 1835 en 1840 nam de inzet van kunstmest sterk toe. Eerst werd nog natuurlijke kunstmest gebruikt, zoals Peru-guano en Chili-salpeter – vogelmest die is afgezet op de rotsen aan de Stille Oceaan kust van (onder meer) Venezuela. De eerste guano werd in 1843 geïmporteerd door de firma Lenardson en Cie te Rotterdam. De export van guano uit Chili groeide gestaag gedurende de 19de eeuw.

In een bekende lezing van Sir William Crookes aan de British Association for the Advancement of Science in 1898, stelde hij de noodzaak voor hogere opbrengsten aan de orde om de wereldbevolking te kunnen voeden (Crookes, 1898): *"England and all civilised nations stand in deadly peril of not having enough to eat. As mouths multiply, food resources dwindle. Land is a limited quantity, and the land that will grow wheat is absolutely dependent on difficult and capricious natural phenomena... I hope to point a way out of the colossal dilemma. It is the chemist who must come to the rescue of the threatened communities. It is through the laboratory that starvation may ultimately be turned into plenty... The fixation of atmospheric nitrogen is one of the great discoveries, awaiting the genius of chemists."*

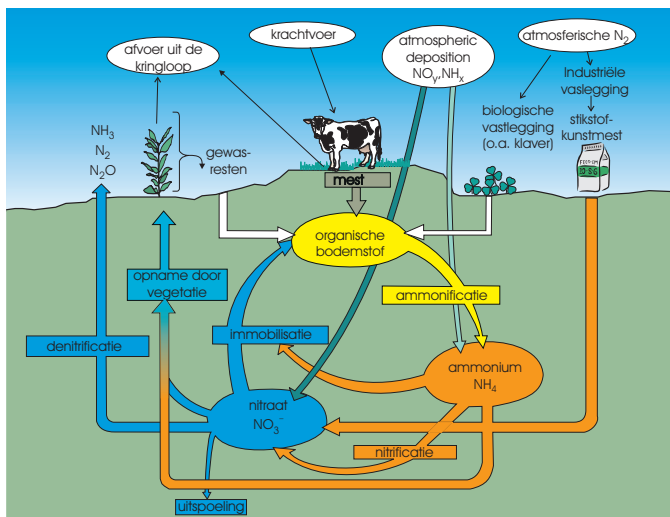
Uiteindelijk hebben Fritz Haber en Carl Bosch de basis gelegd voor industriële ammoniakproductie die de basis vormt voor kunstmest, en zijn we niet meer afhankelijk van natuurlijke bronnen. Door toevoeging van deze reactieve vorm van stikstof wordt de plantgroei sterk bevorderd; de helft van ons voedsel wordt op dit moment geproduceerd vanwege de beschikbaarheid van kunstmest (Erisman et al., 2008). De efficiëntie van kunstmest in de praktijk is echter laag, waardoor er veel stikstof naar het milieu lekt. Dit gebeurt ook bij de verbranding van fossiele brandstoffen waarbij stikstofoxiden worden gevormd en via de lucht getransporteerd worden over grote gebieden. Verder is de verscheping van grote hoeveelheden reactief stikstof en andere nutriënten van de ene kant van de wereld, waar over het algemeen een tekort aan reactief stikstof heerst, naar gebieden met een overmaat aan stikstof, ook een factor van betekenis, zoals bij ons in Nederland. Hierdoor zijn de lekken naar het milieu in bepaalde gebieden geconcentreerd. De hoeveelheid reactief stikstof in de biosfeer vormt een van de belangrijkste milieuproblemen van dit moment. De stikstofemissies naar het milieu hebben grote gevolgen voor de lucht-, water en bodemkwaliteit en leidt tot milieuschade en bedreiging van de menselijke gezondheid. Er is ook een groot effect op het klimaat door de interactie met de koolstofcyclus en de stralingsbalans (o.a. Vitousek et al., 1997; Cowling et al., 2002; Galloway and Cowling, 2002; Galloway et al., 2003; 2008; Magnani et al., 2008; de Vries et al., 2008; Reay et al., 2008). Eenmaal in het milieu terechtgekomen heeft N_r een cascade aan effecten tot gevolg (Galloway et al., 2003; Erisman, 2004).

Ik zal mij in deze lezing richten op de achtergronden van de stikstofproblematiek, de gevolgen van stikstof voor het milieu en vooral de invloed ervan op het klimaat, de noodzaak om te komen tot een integrale benadering voor het verminderen van de effecten, de maatregelen die er zijn en tot slot het toekomstige benodigde onderzoek voor de leerstoel *Integrale Stikstofproblematiek*.

De stikstofcyclus en de invloed van de mens

De stikstofcyclus bestaat uit de omzetting van verschillende vormen van stikstof in de biosfeer. Alle organismen hebben stikstof nodig om aminozuren en daarmee proteïne, nucleïnezuuren en, in het geval van bacteriën, celwandmateriaal te maken (Marschner, 1997). Aminozuren fungeren als neurotransmitters en regelaars van verschillende fysiologische processen, terwijl proteïnen als katalysator dienen voor verschillende chemische reacties, de basis vormen van onze genen, het immuun systeem verzorgen, het belangrijkste aandeel van onze spieren vormen en de belangrijkste bouwstenen zijn voor onze cellen. Gebrek aan hoge kwaliteit proteïnen in het dieet kunnen leiden tot bloeddruk problemen, seksuele disfunctionaliteit, vermoeidheid, obesitas, diabetes, regelmatige infecties, verteringsproblemen en botmassa verlies. Een ernstig tekort aan proteïnen in voeding kan tot voedingsstoffentekort leiden wat zich kan uiten in spiermassa afname, groeiverstoring en afgenomen immuniteit (Vitousek et al., 1997; Smil, 2001a, b; Townsend et al., 2003). Toegang tot voldoende stikstof in bruikbare vorm is daarom een voorwaarde voor het leven op aarde. Na koolstof, waterstof en zuurstof is stikstof het meest voorkomende element in micro-organismen. Stikstof kan in verschillende chemische samenstellingen voorkomen, zowel in geoxideerde als in gereduceerde vorm. In de atmosfeer komt het voornamelijk voor als di-stikstofgas (N₂). N₂ kan in de natuur op verschillende manieren worden omgezet in een reactieve vorm, zoals door onweer, waarbij door ontladingen NO, wordt gevormd. Verder kunnen bacteriën, biologisch gezien, atmosferische stikstof vastleggen en omzetten in vormen geschikt voor metabolismen. Micro-organismen zijn de belangrijkste schakels van de stikstofcyclus in de biosfeer.

Het vastleggen van stikstofgas in ammonium door bacteriën is de eerste stap in de stikstofcyclus (Figuur 2). Door deze vastlegging komt stikstof in een vorm waarin het beschikbaar is voor planten die het voor de groei nodig hebben. Dieren hebben toegang tot deze stikstof door het eten van planten. Via hun uitwerpselen brengen zij de stikstof terug naar de grond. Ook wanneer de planten afsterven, wordt stikstof aan de grond teruggevoerd. In de grond wordt deze organische vorm van stikstof eerst omgezet in ammoniak, dan in nitriet en uiteindelijk in nitraat (nitrificatie). De bacteriën die deze omzetting verzorgen, zijn de nitrificerende aerobe bacteriën, behorende tot soorten met het voorvoegsel *Nitroso-* (NH_4^+ naar NO_2^- : *Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosococcus*, *Nitrosolobus*) en *Nitro-* (NO_2^- naar NO_3^- : *Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrococcus*) (Smil, 2001b). Zo is de stikstof in de bodem weer beschikbaar voor de planten die het opnemen via de wortels. Andere bacteriën zorgen voor denitrificatie; zij zetten het nitraat om in N_2O en NO_2 . Deze gassen worden opgenomen in de atmosfeer waarmee de stikstofcyclus rond is (Smil, 2001b). Denitrificatie is een reductie-reactie die wordt uitgevoerd door anaerobe bacteriën, zoals *Pseudomonas* spp., *Achromobacter* spp., *Paracoccus* spp., *Moraxella* spp., *Bacillus* spp., *Alcaligenes* spp., en *Gluconobacter* spp., - allemaal in de bodem voorkomende bacteriën (Smil, 2001b). Denitrificatie is de belangrijkste bron van verlies van stikstof uit de bodem. Andere, minder belangrijke verliesposten zijn verdamping, uitspoeling, niet-enzymatische reacties van salpeterigzuur met ammoniumzouten of aminozuren, en chemische decompositie van nitriet onder zure omstandigheden.



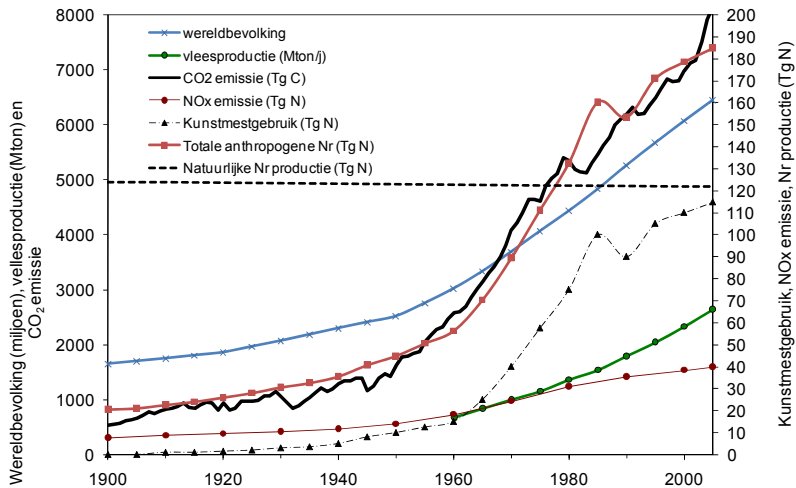
Figuur 2. De stikstofcyclus

De natuurlijke stikstofcyclus vormt een evenwicht tussen atmosfeer, het leven op aarde en de bodem, waarbij het transport of de beschikbaarheid van stikstof afhankelijk is van regionale omstandigheden als locatie, klimaat, ecosysteem, grondsoort en vegetatie. Verstoring van de stikstofcyclus vindt plaats door het wegnemen of toevoegen van extra stikstofverbindingen op

verschillende plaatsen in de keten. Bijvoorbeeld door het verplaatsen van stikstof van de ene regio naar de andere, zoals vroeger met de chilstikstof werd gedaan en nu met krachtvoer, of door het fabrieksmatig omzetten van de ene in de andere vorm zoals de productie van NH_3 uit N_2 . Het gevolg van de verandering in de cyclus is dat er verarming optreedt, of verrijking. Door toedoen van de mens wordt ook extra stikstof aan de cyclus toegevoegd; door de hoge temperaturen bij de verbranding van fossiele brandstoffen, reageren N_2 en O_2 tot stikstofverbindingen. De belangrijkste bronnen zijn het verkeer, de industrie, de huishoudens en de raffinaderijen (EEA, 2005). De stikstofoxiden die hierbij ontstaan worden toegevoegd aan de stikstofcyclus. Dit heeft niet alleen lokaal gevolgen. Door het atmosferisch transport treedt verrijking van de vegetatie en bodem met stikstof ook elders op (Goulding et al., 1998; Erisman en Fowler, 2003). Daar waar extra stikstof beschikbaar komt voor het verbouwen van gewassen, levert dat geen probleem op zolang er niet meer stikstof toegevoegd wordt dan er door het gewas wordt opgenomen. De natuurlijke bronnen van stikstof zijn de biologische stikstoffixatie (BNF) door bacteriën, uitbarstende vulkanen waarbij veel ammoniak in de lucht gebracht wordt en bliksem en bosbranden waarbij stikstofoxiden, NO_x , gevormd worden (Smil, 2001a; Reid et al., 2005). De natuurlijke wereldproductie van N_r ligt nu ongeveer op 125 Tg N (zie Figuur 3), waarvan 5 Tg gevormd wordt door bliksem en 120 Tg door BNF (Galloway et al., 2003; 2008; Schlesinger, 2009). De bijdrage van vulkanen is niet bekend.

Industriële N_r productie wordt geschat op 125 Tg/jr, gelijk aan de natuurlijke productie, waarvan 82% wordt gebruikt voor kunstmest en de rest voor de chemische industrie en explosieven (Galloway et al., 2008). Kunstmestgebruik in de landbouw is nu twee maal de BNF. De landbouw heeft er ook toe bijgedragen dat de BNF is toegenomen met 40 Tg/jr (Galloway et al., 2008). De verbranding van fossiele brandstoffen voegt 25 Tg/jr geoxideerde stikstof toe (Galloway et al., 2008; Schlesinger, 2009). In 2005 bedroeg de totale antropogene N_r productie 170 Tg (Schlesinger, 2009) tot 187 Tg/jr (Galloway et al., 2008). Opgeteld bij de natuurlijke N_r is de totale jaarlijkse wereldwijde productie 300 Tg.

Figuur 3 geeft de trend aan van de groei in stikstofproductie op wereldschaal. De grootste menselijke N_r productie komt van de industriële NH_3 productie, vier keer groter dan de NO_x emissies. Na de tachtiger jaren is de totale jaarlijkse menselijke N_r productie groter geworden dan de natuurlijke productie. Verder is er sinds die tijd een evenredige toename in N_r productie per jaar, vergelijkbaar met die in de wereldbevolking. Hetzelfde geldt overigens voor de jaarlijkse toename in CO_2 emissie; er is een grote correlatie tussen de koolstofproductie en stikstofverrijking met de wereldbevolking. Het maakt voorspellingen voor de toekomst relatief eenvoudig: als we geen maatregelen nemen zullen de koolstof en stikstof productie evenredig stijgen met de stijging van de wereldbevolking!



Figuur 3. Trend in wereldbevolking, CO₂ en Nr productie.

Effecten van stikstof

Aangezien de natuurlijke productie van Nr relatief laag is, is de natuur ingesteld op een zeer grote stikstofefficiëntie en is er een grote biodiversiteit ontstaan. Wanneer sprake is van een overmatige toevoeging, komt deze in het milieu terecht, bijvoorbeeld door uit- of afspoeling naar het (grond)water of emissie naar de lucht. In gebieden waar een systeem en vegetatiesamenstelling is ontstaan dat zich heeft aangepast aan het stikstofarme milieu, ontstaan snel problemen als extra stikstof wordt toegevoegd. De stikstofverrijking zorgt voor het verdwijnen of verdringen van de stikstofarme soorten door snel groeiende soorten die veel stikstof kunnen verwerken (Bobbink, 2004; Dise and Stevens, 2005; Phoenix et al., 2006; Bobbink et al., 2010). Hierdoor neemt de biodiversiteit af en worden de ecosystemen services verminderd. De antropogene bronnen van Nr zijn

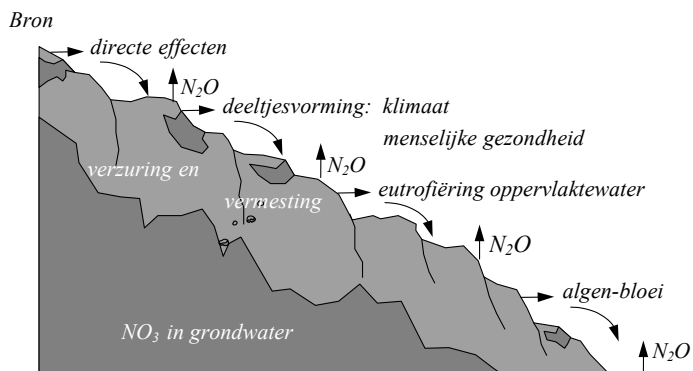
- de productie en het gebruik van kunstmest,
- de productie en het gebruik van mest,
- de industrie waar ammoniak wordt gebruikt,
- verbranding van fossiele brandstoffen voor energieproductie en gebruik in de industrie, en
- de drie-weg katalysator voor het verkeer waar ammoniak en soms lachgas als bijproduct gevormd wordt bij de omzetting van NOx.

Deze bronnen zorgen voor nitraat uit- en afspoeling naar rivieren en het grondwater, en voor NH₃, NOx en N₂O emissies naar de lucht. Grote concentratie van nutriënten door transport vanuit andere gebieden vormt ook een bron voor Nr in bepaalde gebieden.

Nr is goed oplosbaar en zeer mobiel in het milieu en het kan door chemische interactie snel veranderen van vorm (geoxideerd of gereduceerd). Uiteindelijk kan Nr weer omgezet worden in N₂ door bacteriën (denitrificatie) in de bodem. Globaal wordt ongeveer 40% van de Nr die in het milieu

komt gedenitrificeerd (Galloway et al., 2008). Een groot deel van de effecten kan het gevolg zijn van blootstelling aan Nr in bepaalde vorm en er kan sprake zijn van een cascade aan effecten. De antropogene verstoring van de stikstofkringloop op verschillende schalen kan tot velerlei effecten leiden, zoals (Langan, 1999; Cowling et al., 2002):

- aantasting van de menselijke gezondheid door de vorming van ozon, door andere fotochemische luchtverontreiniging en fijn stof, en door de contaminatie van het drinkwater met nitraat;
- verzuring van bodem en water;
- aantasting van monumenten en materialen;
- vermesting van bodem en water;
- achteruitgang van de biodiversiteit van ecosystemen;
- vermindering van ecosysteem services;
- schade aan vegetatie door blootstelling aan reactief-stikstofverbindingen en ozon;
- groeitoename en daarmee gepaard gaande additionele CO₂ opname en bij hogere niveau's groeireductie en daarmee gepaard gaande verminderde efficiëntie van CO₂-opname;
- toxische algenbloei en aantasting van zwemwaterkwaliteit;
- stankproblemen;
- klimaatverandering door N₂O (opwarming) en NH₄NO₃ (koeling);
- aantasting van de ozonlaag via NO_x-emissies van vliegtuigen op grote hoogte;
- belemmering van het zicht door deeltjesvorming.



Figuur 4. Het cascade-effect van stikstofatomen

In tegenstelling tot andere verontreinigende stoffen, kan door een stikstofatoom in reactieve vorm een opeenvolgende reeks van effecten optreden. Het zogenoemde 'cascade-effect' van stikstof is geïllustreerd in Figuur 4 (Galloway et al., 2003). Zo kan de stikstof in eerste instantie leiden tot directe schade aan vegetatie dichtbij bronnen, of bijdragen aan de vorming van deeltjes en smog waardoor de menselijke gezondheid wordt aangetast. Na verspreiding in de atmosfeer en depositie in natuurgebieden kan stikstof vervolgens verzuring of vermesting in de hand werken, en in de vorm van nitraat uitspoelen naar het grondwater en daarmee opnieuw een risico vormen voor de menselijke gezondheid, ditmaal via het drinkwater. Via het grondwater wordt ook het oppervlaktewater bereikt wat leidt tot eutrofiëring. Eenmaal getransporteerd naar zee kan de stikstof daar algenbloei veroorzaken. Vanuit zee, en ook in verschillenden tussenstappen, kan lachgas

worden gevormd dat bijdraagt aan een versterkt broeikaseffect en klimaatverandering. Uiteindelijk wordt de stikstof weer tot N_2 omgezet, maar niet nadat het een deel van het stratosferisch ozon heeft afgebroken. Het is onduidelijk hoe belangrijk dit cascade effect is. Hiernaar is meer onderzoek nodig.

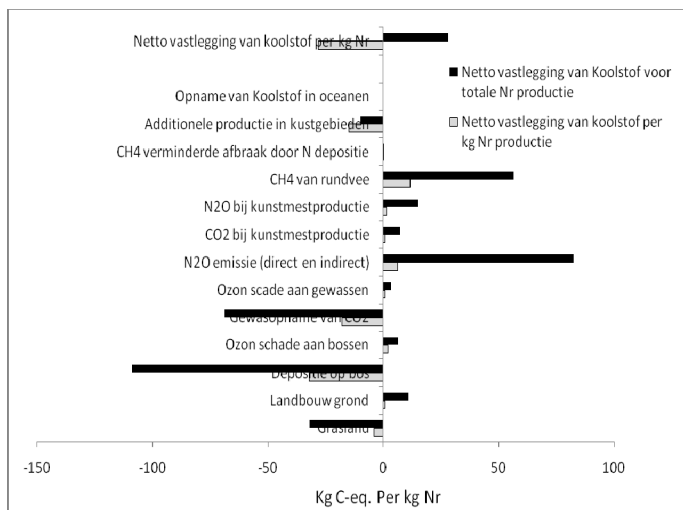
De invloed van Stikstof op de klimaatverandering

Nr heeft een groot effect op het klimaat door de interactie met de koolstofcyclus en de stralingsbalans. Het gaat hierbij om *directe en indirecte effecten*. Onder de *directe effecten* vallen de emissie van N_2O , een 300 keer sterker broeikasgas dan CO_2 , de vorming van het broeikasgas ozon, en de vorming van stikstofhoudende aerosolen, zoals ammoniumnitraat en ammoniumsulfaat. Deze hebben een koelende werking omdat ze zonlicht weerkaatsen en/of de condensatiekernen zijn voor de vorming van wolken, die de straling weerkaatsen (bv. Hungate et al., 2003). Onder *indirecte effecten* vallen de beïnvloeding van de koolstofvastlegging in landbouwgebieden, bossen en natuurgebieden, open wateren, kustgebieden en de oceanen. Kenmerkend voor deze beïnvloeding is de stikstofverrijking als gevolg van bemesting, de uit- en afspoeling en/of de atmosferische depositie. Het betreft hier de negatieve beïnvloeding van plantengroei (en dus CO_2 opname) door de blootstelling aan ozon, de afbraak van methaan door ozon (en daaruit gevormde OH-radicalen) en de verhoogde methaanuitstoot door rundvee als gevolg van geïmporteerde nutriënten (bv. Raey et al., 2008; De Vries et al., 2009).

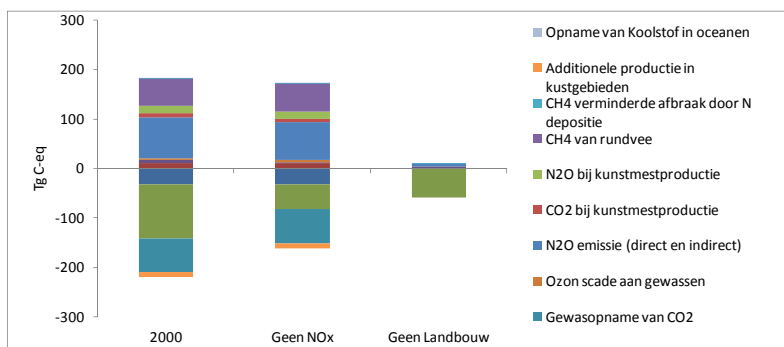
De belangrijkste indirecte invloed is de gestimuleerde groei via het luchttransport van stikstof en de depositie op bossen. Hierdoor wordt waarschijnlijk meer koolstof vastgelegd, precies zoals de bemesting in de landbouw (bv. De Vries et al., 2008; Magnani et al., 2007). Daar waar stikstof niet het groeilimiterende element is, zal extra depositie geen gevolgen voor de koolstofvastlegging hebben. Waar het wel gevolgen voor heeft, is de biodiversiteit. Nog voor er sprake is van groeistimulatie heeft Nr al een afname van de biodiversiteit tot gevolg. Bij hogere depositie wordt de afname steeds groter, wordt de vitaliteit van de bomen aangetast en het grondwater met nitraat belast. In deze fase zal ook de groeistimulans omslaan in groeiafname, N_2O emissies uit de bodem toenemen en de netto opname van CO_2 omslaan in emissies. Het is relevant dit te kunnen kwantificeren omdat het gevolgen kan hebben voor een klimaatovereenkomst waar de vastlegging van koolstof in bossen wordt gewaardeerd met koolstofcredits. Als hier extra koolstof wordt vastgelegd doordat er sprake is van stikstofdepositie, zou deze extra koolstof niet tot credits mogen leiden. Het gaat hier over ongecontroleerde bemesting in plaats van gecontroleerde en gestuurde (kunstmest) bemesting.

Ik heb geprobeerd voor Europa het effect van stikstof op het klimaat voor het eerst te kwantificeren. Hiertoe heb ik stikstof en koolstofbalansen gebruikt die recentelijk zijn gepubliceerd (Schulze et al., 2009; Velthof et al., 2009). De relaties zijn weergegeven in Figuur 5. Hier staat wat per kg stikstof het effect is op de CO_2 equivalenten voor de verschillende (in)directe relaties tussen stikstof en koolstof. Het netto effect is positief, ofwel per kg Nr wordt er koolstof vastgelegd. In dezelfde figuur is aangegeven wat er gebeurt als je de kg Nr gebruikt die nu geproduceerd wordt in Europa, dan is het netto effect negatief. De opname van CO_2 -eq. is kleiner dan de afgifte door de grotere absolute bijdrage van Nr aan de CO_2 emissies. Belangrijk in de balans zijn de CO_2 opname door bossen en de N_2O emissie uit de landbouw. Wanneer je nu landbouw en energie scheidt, door de kg Nr uit landbouw niet mee te rekenen en andersom, dan komen daar de twee balansen uit die staan in Figuur 6. Figuur 6 geeft de netto CO_2 -eq. per bron weer voor de huidige situatie (jaar 2000) en voor 2

scenario's: geen landbouw en geen NOx van fossiele brandstoffen. De resultaten geven aan dat de emissie van NOx een positief effect heeft via de depositie op bossen, ondanks dat dezelfde NOx depositie die een grotere opname tot gevolg heeft ook ozon vormt dat schade aan de bossen toebrengt, waardoor er een groeiafname plaats vindt. De landbouw ziet er veel complexer uit en laat een netto emissie van broeikasgassen zien. Er moet bij gezegd worden dat het positieve effect van de stikstofbemesting op bossen, zoals eerder vermeld, teniet gedaan wordt door het verlies aan biodiversiteit en de grondwater belasting. Dit soort studies geeft ons houvast over waar we ons onderzoek en mogelijke maatregelen op moeten richten.



Figuur 5. De directe en indirecte effecten van Nr op de koolstofbalans als Kg C per kg Nr en als totale hoeveelheid koolstof (Tg) per totale hoeveelheid Nr in Europa.



Figuur 6. De directe en indirecte effecten van totaal Nr op de koolstofbalans in Europa (Tg) voor 2000, bij het uitsluiten van landbouw en bij het uitsluiten van NOx.

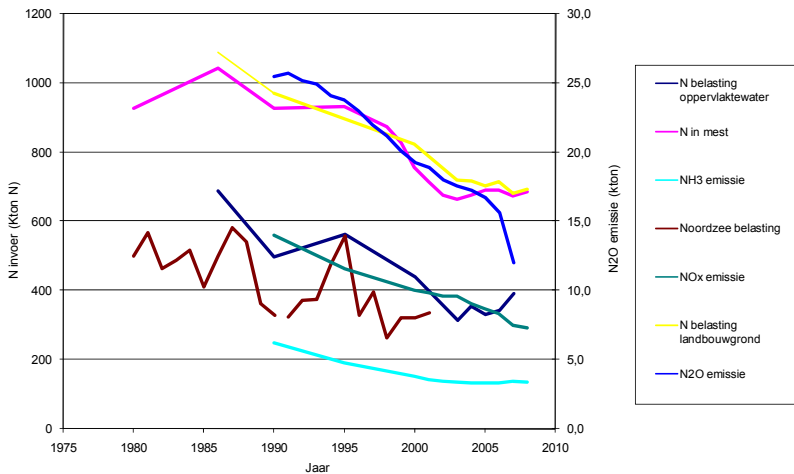
Waarom een integrale benadering?

Bovenstaande heeft duidelijk gemaakt dat de stikstofproblematiek door veel verschillende bronnen uit verschillende sectoren bepaald wordt, die door de interactie in het milieu en het cascade effect uiteindelijk tot een scala aan effecten leidt, waarbij de oorsprong van de reactieve stikstof er niet meer toe doet. Hierdoor zal een integrale benadering meerwaarde hebben. Daar waar Nr gereguleerd wordt, is dit op individuele verliezen naar het milieu gestoeld: er is 1) een Nitraat Richtlijn die uit- en afspoeling naar het (grond)water reguleert, 2) een Luchtkwaliteit Richtlijn, die NOx en de vorming van deeltjes reguleert, 3) de Emissieplafond Richtlijn die een maximum stelt aan verzurende en ozon vormende emissies, 4) het Kyoto protocol dat de emissies van broeikasgassen limiteert, etc.

Een integrale benadering zou gericht moeten zijn op het verminderen van de effecten van reactief stikstof terwijl de voedsel- en energievoorziening toereikend blijft. Het beleid en de maatregelen zouden gericht moeten zijn op:

- het beperken van de productie van niet biologisch Nr, wat de hele cascade aan milieu effecten vermindert;
- het verhogen van de efficiëntie van het gebruik van stikstof, dat de verliezen naar het milieu beperkt;
- het verminderen van de invoer van nutriënten en van de concentratie ervan door relatief kleine gebieden (zoals Nederland). Dit draagt bij aan een betere verdeling van reactief stikstof dat een vergroting van de efficiëntie tot gevolg kan hebben; en
- de bevordering van omzetting in N₂ daar waar verliezen naar het milieu niet kunnen worden voorkomen. Dit is o.a. te bewerkstelligen door katalytische omzetting of door het bevorderen van de-nitrificatie.

Het stikstofbeleid in Nederland heeft de afgelopen jaren zijn vruchten afgeworpen (Erisman et al., 2005). Figuur 7 toont dat alle emissies van stikstof naar het milieu een dalende trend hebben laten zien. Dit is het gevolg van emissiereducerende maatregelen, zoals de inzet van katalytische omzeters voor NOx emissies in personenvervoer (drie-wegkatalysator) en in de industrie (Selective Catalytic Converter, SCR) en van mestinjecteurs, emissie-arme stallen, etc. Een belangrijke bijdrage aan de vermindering van emissies is geleverd door de introductie van het mineralen boekhoudingsysteem MINAS in de landbouw. Dit heeft er voor gezorgd dat het gebruik van kunstmest de afgelopen jaren is afgenomen en daarmee de emissies van stikstof naar het milieu. Ik vind dit een goed voorbeeld van een integrale maatregel die helaas onder druk van de Europese Commissie niet blijvend is toegepast. De stikstofniveaus zijn nog ver boven de kritische waarden en er lijkt de afgelopen jaren een stilstand in de dalende trend te zijn opgetreden.



Figuur 7. Trend in stikstofemissies naar het milieu in Nederland. Bron: www.compendiumvoordeleefomgeving.nl

Een belangrijke parameter/indicator voor een integrale aanpak is de stikstofefficiëntie (Neff), gedefinieerd als de Stikstof in het product gedeeld door dat wat nodig was voor het product, in procenten. Tabel 1 geeft een overzicht van de Neff in de verschillende sectoren in Nederland.

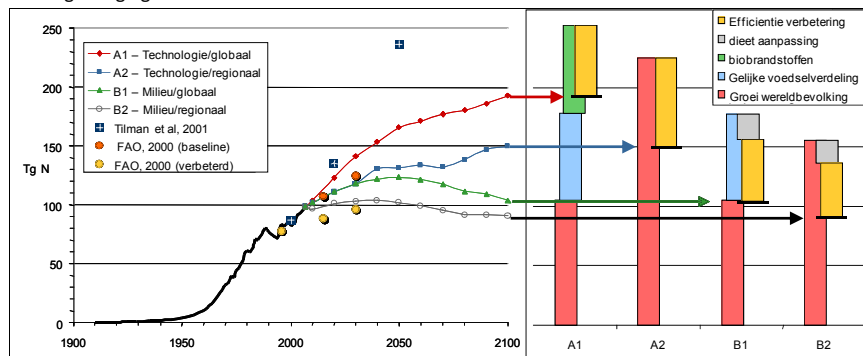
Tabel 1. Stikstofefficiëntie in verschillende sectoren in Nederland in 2000 (Erisman et al., 2005)

Sector	N input (kton/jr)	N output (kton/jr)	N _{eff} (%)	N loss (kton/jr)
Landbouw	859	288	34	571
Industrie	1038	949	91	89
Kunstmest industrie	2580	2526	98	54
Verkeer en transport	88	0	0	88
Huishoudens	425	300	71	125
Afvalverwerking	86	34	40	52

De grootste Nr productie vindt plaats in de kunstmestindustrie. Aangezien Neff hier vrij hoog is, is er relatief weinig verlies naar het milieu. Het grootste verlies zit in de landbouw met een lage Neff, en de huishoudens. De Neff in de landbouw is wel gerelateerd aan het kunstmestgebruik. Het is de kunstmest die accumuleert en in het landbouwsysteem cascadeert. Bij de verbranding van fossiele brandstoffen is Neff nul, omdat Nr verlies hier een ongewenst bijproduct is. De depositie die het gevolg is van de emissies van stikstof van fossiele bronnen geldt als behoorlijke input in het landbouwsysteem. Het beleid en de maatregelen zullen daarom in onderlinge samenhang moeten worden beschouwd in een integrale benadering.

Wat kunnen wij doen?

De landbouw en de productie van ons voedsel heeft topprioriteit. De omvang van de veestapel bleef in Nederland tot aan de Tweede Wereldoorlog beperkt omdat de boeren de dieren voornamelijk voor eigen consumptie fokten. Pas na de oorlog stegen de dierenaantallen sterk. De overheid stimuleerde de voedselproductie; Nederland zou nooit meer een hongervinter kennen! Hetzelfde zien we nu in China waar de voedselproductie topprioriteit heeft, zodanig dat kunstmest sterk gesubsidieerd wordt. Hetzelfde zal in Afrika gaan gebeuren. Figuur 8 geeft een inschatting van het kunstmestgebruik voor de komende 100 jaar gebruikmakend van vier IPCC scenario's (Erisman et al., 2008). Het figuur laat zien dat in het gunstigste geval het wereld kunstmestgebruik gelijk blijft aan dat in 2000, maar dat in alle drie de andere scenario's het gebruik groeit, zelfs tot een factor twee in het ongunstige geval.



Figuur 8. Scenario's voor het kunstmestgebruik de komende 100 jaar gebaseerd op IPCC scenario's (IPCC, 2007). Er is een inschatting gemaakt van de invloed van de 5 belangrijkste factoren (verbetering van de efficiëntie, aanpassing dieet, groei van biobrandstoffen, gelijke voedselverdeling over de wereld en de groei van de wereldbevolking) op het kunstmestgebruik (Erisman et al., 2008).

Het spanningsveld tussen de grote behoefte aan voedsel, vlees en energie aan de ene kant, en het milieu en de stikstofproblematiek aan de andere kant, is en blijft daarmee erg groot. Het is moeilijk gebleken om de honger naar energie te stillen dan wel de fossiele bronnen te vervangen door duurzame bronnen die geen NOx emitteren. Hetzelfde geldt voor onze honger naar voedsel, de groei van de wereldbevolking en de veranderende diëten (meer vlees), zoals uit Figuur 8 blijkt. In beide gevallen is door besparing reeds veel te winnen; besparing van energie door technologische en gedragsmaatregelen. Besparing van kunstmest heeft in Nederland de afgelopen jaren de stikstofverliezen naar het milieu doen afnemen, zonder noemenswaardige verliezen van productie (zie Figuur 7). De vraag is hoe dit in de toekomst met de groeiende wereldbevolking en behoefte aan voedsel en veranderende diëten zal gaan, even zoals de groeiende behoefte aan biobrandstoffen (Fig. 8).

Er zijn verschillende maatregelen die een positief effect hebben op het milieu, zonder dat het ten koste gaat van de voedsel- of energievoorziening. Tot de niet-technologische opties in de landbouw behoren:

- Kunstmestgebruik: aanwending op het juiste tijdstip, juiste plaats met de beste technologie en optimale bemestingsniveau – onder andere door het beter scholen van boeren in het efficiënt gebruik en toepassen van (kunst)mest (zie fig. 7);
- Managen op het juiste optimum: stikstofgift, gewasopbrengst of economisch optimum.
- Nieuwe gewas selectie en teelt;
- Water en land management;
- Aanpassing voer voor intensieve veehouderij;
- Efficiënter gebruik van producten (voedsel, energie, biomassa) en verminderen van afval.

Technisch gezien is er ook veel mogelijk:

- katalytische omzetting van NOx bij de verbranding van fossiele brandstoffen;
- vervanging van fossiele brandstoffen door energiebesparing;
- zon- en windenergie;
- N₂O reductie bij de kunstmestproductie;
- Gebruik van gecoate kunstmestkorrels (getemporeerde afgifte van stikstof in de bodem);
- Tweede generatie kunstmest op basis van organisch gebonden stikstof (biochar);
- Genetische manipulatie van gewassen en markt-ondersteunde genetische selectie voor de identificatie van genen die de stikstofefficiëntie verhogen (Good et al., 2004).
- Landbewerking- en bebouwingstechnieken voor optimale Nr en C benutting/vastlegging;
- precisie bemesting ondersteund door satellietwaarnemingen en GPS technologie;
- gesloten kringlopen in de veehouderij door emissievrije stallen en mestverwerking;
- tertiaire afvalwaterbehandeling, vooral in ontwikkelingsgebieden.

In een recent artikel van Galloway e. a. (2008) is berekend dat deze maatregelen een kwart tot een derde van de huidige Nr productie kunnen verminderen. In IPCC (2007) is berekend dat deze maatregelen in termen van CO₂ kosten erg lucratief kunnen zijn omdat de meeste geld op brengen (management), terwijl de technologische maatregelen veelal beneden de 15 €/ton liggen.

Er is een grote rol weggelegd voor de consument, vooral in relatie tot energiegebruik en vleesconsumptie. Met de groei van de economie (BNP), neemt ook de vleesconsumptie toe. De Neff voor vlees is zeer laag vergeleken bij die van vegetarisch voedsel. Ook is er een groot verschil tussen verschillende soorten vlees: rundvlees is twee maal zo inefficiënt als varkensvlees, wat weer twee keer zo inefficiënt is als kippenvlees. Het meest efficiënte vlees is dat van insecten. Beperken van de vleesconsumptie heeft grote positieve invloed op de stikstofkringloop en ook op andere milieugevolgen (Milieubalans, 2009).

Waar zal de leerstoel zich de komende jaren op richten?

De stikstofcyclus is een van de meest door mensen aangetaste biogeochemische cycli. Er zijn gebieden met te weinig en gebieden met teveel stikstof. Er is een groot aantal vragen te formuleren op het gebied van de stikstofcyclus, maar het is vooral op het snijvlak met andere cycli, zoals water en koolstof waar interessante onderzoeksuitdagingen liggen. ECN heeft een (inter)nationale positie op het gebied van stikstofonderzoek en assessments. De activiteiten bestaan uit de ontwikkeling van meetinstrumenten voor luchtsamenstelling, en kwantificering van de atmosfeer-biosfeer uitwisseling. Ze bestaan uit ontwikkeling van modellen voor de verspreiding van stikstof in de biosfeer, uit assessments van blootstelling, effecten, drivers (kunstmestgebruik, biofuels,

energiegebruik, stikstofefficiëntie, etc.). Daarnaast kijkt ECN naar mogelijk beleid voor vermindering van de problematiek.

De afdeling Hydrologie en Geomilieuwetenschappen van het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU heeft als doel het bestuderen, analyseren en voorspellen van de effecten van menselijke invloeden (zoals veranderend landgebruik) en klimaat op hydrologische, hydrochemische, hydrometeorologische en biogeochemische en ecologische processen. Het doel is te begrijpen hoe deze processen worden geïntegreerd op stroomgebied en aquifer schaal. De afdeling doet theoretisch, praktisch, fundamenteel en toegepast onderzoek. Veldwerk en veldexperimenten zijn een essentieel onderdeel van onze onderzoek en onderwijsstrategie. De stikstofcyclus is een belangrijke aanvulling op de onderwerpen binnen de afdeling, mede vanwege het grote effect op de koolstofcyclus.

Het toekomstige onderzoek zal zich richten op de volgende onderwerpen:

- Het kwantificeren van de interactie tussen de koolstof- en stikstofcyclus. Dit kan door meting van de fluxen boven bos, het vaststellen van de factoren die de fluxen en interacties bepalen (modellering) en door vertaling van de resultaten in modellen die op Europese schaal de interacties kwantificeren. De modellen worden getoetst met onafhankelijke metingen. Tijdens het side event op de eerste dag van COP15 in Kopenhagen heb ik gepleit voor het schrijven van een Special report on Nitrogen and Climate, door de Taskforce of Reactive Nitrogen en IPCC;
- Het kwantificeren van de bronnen en putten van stikstof in de stikstofcascade. Dit betreft de stikstofvastlegging in ecosystemen en de (de)nitrificatie waarbij de reactieve stikstof omgezet wordt in atmosferisch stikstof en geen bijdrage levert aan de cascadering van effecten van stikstof in reactieve vorm. Het betreft zowel metingen als modellering op verschillende schalen en voor verschillende systemen;
- Het maken van een ammoniak emissie- en depositiekaart op verschillende schalen. Hier zit momenteel de grootste onzekerheid in de stikstofcyclus en kwantificering van de depositie van stikstof. Beide zijn nodig voor het bepalen van de effecten op biodiversiteit, eutrofiering en de koolstofinteracties;
- Het leveren van een bijdrage aan (inter)nationaal onderzoek naar de stikstofcyclus in relatie tot biomassaproductie en voedselvoorziening. Het gebruik van kunstmest in de landbouw en het ineffektieve gebruik ervan leidt tot een cascade van effecten in het milieu in verschillende systemen. De groei van de wereldbevolking, het verschuiven van voedselpatronen en het gebruik van biomassa voor de energievoorziening zal een sterke wereldwijde groei van het kunstmestgebruik veroorzaken. Er is sterke behoefte aan kwantificering van de voor- en nadelen, de cascade effecten en de bronnen en putten van reactief stikstof in het milieu.
- Het uitdragen van de resultaten van dit onderzoek via nationale en internationale programma's (bv. COST, ESF en mogelijk UNEP). Het is van belang dat het publiek, de overheid en de stakeholders zich bewust worden van de groeiende problemen als gevolg van de groeiende stikstofbelasting in het milieu. Hiervoor is het noodzakelijk om communicatiemiddelen te ontwikkelen, zoals het stikstofspel NitroGenius

(www.nitrogenius.com), het visualisatietool (www.initrogen.org/visualisation.html) en recentelijk de footprint calculator voor stikstof (www.N-print.org).

Een deel van deze onderwerpen vergen een multidisciplinaire aanpak en zullen in samenwerking met andere afdelingen binnen de VU worden uitgevoerd. Juist de mogelijkheden van deze multidisciplinaire aanpak maakt de VU zeer geschikt om de complexe stikstofproblematiek te onderzoeken. De nadruk zal liggen op de atmosfeer-biosfeer uitwisseling en de invloed van stikstof op broeikasgasontwikkeling en visa versa.

Het onderwijs zal zich richten op eerstejaars, Global Change, master onderwijs (Global Biogeochemical Cycles). Ook zal het een sterke bijdrage kunnen leveren aan het onderwijs van Aarde en Economie vanuit een integraal stikstof perspectief, waarin ook aandacht kan worden besteed aan maatschappelijke processen.

Het doel van de leerstoel Integrale Stikstofproblematiek is deze aspecten nader te onderzoeken om te komen tot nieuw beleid en maatregelen op het gebied van stikstof management. Hierdoor kunnen de milieu- en klimaateffecten worden beperkt terwijl in de behoefte naar voldoende voedsel en energie kan blijven worden voorzien. Ik zal mij binnen de leerstoel Integrale Stikstofproblematiek richten op onderwijs, op bovenstaande wetenschappelijke vragen en de vertaling ervan in integraal beleid en integrale maatregelen die tot verbetering kunnen leiden.

Dankwoord

Dames en heren, aan het einde van mijn rede gekomen, wil ik de directie van het Energieonderzoek Centrum Nederland en het College van Bestuur van de Vrije Universiteit bedanken voor het instellen van de leerstoel en mijn benoeming als hoogleraar daarop. In het bijzonder dank ik Han Dolman en Bauke Oudega hiervoor. Kees van der Klein ben ik veel dank verschuldigd aangezien hij mij de afgelopen jaren heeft ondersteund in mijn ontwikkeling en mij alle vrijheid daartoe heeft gegeven. Mijn collega's van ECN en dan vooral die van de unit Biomassa, Kolen en Milieuonderzoek ben ik zeer erkentelijk voor de prettige samenwerking en de geweldige ondersteuning. Albert Bleeker wil ik speciaal noemen omdat wij de afgelopen jaren samen veel gerealiseerd hebben (inter)nationaal. Wetenschap doe je niet alleen en daarom wil ik de volgende collega's bedanken voor hun (in)directe bijdrage aan de ontwikkeling van de kennis rond de stikstofproblematiek (in alfabetische volgorde): Roel van Aalst, Willem Asman, Aldrik Bakema, Ronald Bobbink, Fred Bosveld, Ton Bresser, Ed Buijsman, Hub Diederer, Han van Dobben, Geert Draaijers, Jan Duyzer, Ludger van der Eerden, Klaas van Egmond, Bernard van Elzakker, Kees Folkertsma, Hans van Grinsven, Bronno de Haan, Gerard ter Hart, Bert-Jan Heij, Arjan Hensen, Peter Heuberger, Klaas van der Hoek, Nico Hoogervorst, Monique Hootsmans, Wilfried Ivens, Hans van Jaarsveld, Peter Janssen, Alex Kamst, Jep Karres, Volkert Keizer, Kees van der Klein, Hans Kros, Frank de Leeuw, Erik van Leeuwen, Leny Lekkerkerk, Dick van Lith, Sjeef van der Lubbe, Hans Maas, Harriet Marseille, Marcel Mennen, Gert-Jan Monteny, Oene Oenema, Dirk Onderdelinden, Elsbeth Pinksterboer, Edith van Putten, Gert-Jan Reinds, Jan Roelofs, Ferd Römer, Kaj Sanders, Sjaak Slanina, Johan Sliggers, Rob Smeenge, Stan Smeulders, Chris Venderbos, Aart Vermetten, Alex Vermeulen, Germt de Vries, Wim de Vries, Anita Waijers-Ijpelaar, Hilbrand Weststrate, Paul Wyers, en iedereen die ik verder vergeten ben!

Ik wil Baud Schoenmaeckers bedanken voor zijn kritisch commentaar op dit manuscript en zijn tips om de leesbaarheid te verbeteren.

Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor alles wat ze mij hebben meegegeven. Mijn twee geweldige dochters Jetske en Marja ben ik heel dankbaar voor de liefde en steun die ze mij gegeven hebben! Ik ben vreselijk trots op jullie en hoop dat jullie dat ook op mij kunnen zijn!

Ik heb gezegd

Referenties

- Bobbink, R., 2004. Plant species richness and the exceedance of empirical nitrogen critical loads: an inventory. Report Landscape Ecology. Utrecht University/RIVM, Utrecht, pp. 1-19.
- Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erisman, J.-W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L., & de Vries, W. (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on plant terrestrial diversity: a synthesis. *Ecological Applications* (in press).
- Brimblecombe, P. (1989). *The big smoke*. Londen, Engeland.
- Cowling E.B., Galloway J.N., Furiness C.S., Erisman J.W. (2002). *Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection: Report from the Second International Nitrogen Conference*. Washington (DC): Ecological Society of America.
- Crookes, Sir William (1898) Presidential Address to the British Association for the Advancement of Science 1898. Published in *Chemical News*, 1898, 78, 125
- De Vries W., Solberg S., Dobbertin M., Sterba H., Laubhahn D., Reinds G.J., Nabuurs G.-J., Gundersen P. (2008) Ecologically implausible carbon response. *Nature*, 451, E1-E3.
- De Vries, W., Solberg S., Dobbertin M., Sterba H., Laubhahn D., van Oijen, M. Evans, C., Gundersen, P., Kros, J., Wamelink, G.W.W., Reinds, G.J. Sutton, M.A. (2009) The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and heathlands, *Forest Ecology and Management*, Volume 258, Issue 8, The relative importance of nitrogen deposition and climate change on the sequestration of carbon by forests in Europe, 1814-1823, ISSN 0378-1127, DOI: 10.1016/j.foreco.2009.02.034.
- Dise, N.B., Stevens, C.J., 2005. Nitrogen deposition and reduction of terrestrial biodiversity: evidence from temperate grasslands. *Science in China Series C, Life Sciences/Chinese Academy of Sciences* 48, 720-728.
- European Environment Agency (EEA), 2005. *The European environment – State and outlook 2005*. Copenhagen. 576 pp.
- Erisman, J.W., 2000. *De vliegende geest: ammoniak uit de landbouw en de gevolgen voor de natuur*. BetaText, Bergen, Nederland, ISBN 90-75541-06-6, 271 pp.
- Erisman J.W., et al. (1998). Nitrogen, the Confer-N-s, First International Nitrogen Conference 1998: Summary statement. *Environmental Pollution* 102: 3–12.
- Erisman J.W. and Fowler D. (2003), *Oxidized and Reduced Nitrogen in the Atmosphere*, in *KNOWLEDGE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT An Insight into the ENCYCLOPEDIA OF LIFE SUPPORT SYSTEMS Volumes I,II,III*, UNESCO Publishing-Eolss Publishers, Oxford, UK.
- Erisman, J.W. The Nanjing declaration on management of reactive nitrogen (2004) *BioScience*, 54 (4), pp. 286-287.
- Erisman, J.W., Domburg, N., de Vries, W., Kros, H., de Haan, B., Sanders, K. The Dutch N-cascade in the European perspective. (2005) *Science in China. Series C, Life sciences / Chinese Academy of Sciences.*, 48 Spec No, pp. 827-842.
- Erisman, J.W. Galloway, J.A. Sutton, M.S. Klimont, Z. & Winiwater, W. (2008) How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1: 636 - 639.
- Galloway, J.N., Cowling, E.B., 2002. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio* 31, 64-71

- Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B., Cosby, B.J. (2003) The nitrogen cascade *BioScience*, 53 (4): 341-356.
- Galloway, J.N., Townsend, A.R. Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z.e Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A. (2008) Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320: 889-892
- Good, A.G., Shrawat, A.K. and Muench, D.G. (2004) Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *TRENDS in Plant Sci.*, 9, 597-605
- Goulding, K.W.T., Bailey, N.J., Bradbury, N.J., Hargreaves, Y.P., Howe, M., Murphy, D.V., Poulton, P.R., Wilson, T.W., 1998. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. *New Phytologist* 139 (1), 49-58.
- Hungate, B., Dukes, J.S., Shaw, M.R., Yiqi Luo and Field, C.B. (2003) Nitrogen and climate change. *Science*, 302, 1512-1513.
- Langan J, editor. (1999) The impact of nitrogen deposition on natural and seminatural ecosystems. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 1– 251.
- Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis PG, Kolari P, Kowalski AS, Lankreijer H, Law BE, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff JB, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J (2007) The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 447: 848-850
- Mansfield TA, Goulding KWT, Sheppard LJ, editors. (1998) Major biological issues resulting from anthropogenic disturbance of the nitrogen cycle. *New Phytol*, vol. 139. Cambridge, UK: Cambridge University Press. p. 1– 234.
- Marschner, H. (1997) Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press Limited, London. ISBN 0-12-473542-8, pp 889.
- Matson, P., Lohse, K.A., Hall, S.J., 2002. The globalization of nitrogen: consequences for terrestrial ecosystems. *Ambio* 31, 113-119
- Phoenix, G.K., et al., 2006. Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: the need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts. *Global Change Biology* 12, 470e476.
- Reay, D. S, Dentener, F., Smith, P., Grace, J., Feely, R. Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nature Geosci.* 1, 430–437 (2008).
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J.A. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475 (24 September 2009) | doi:10.1038/461472a
- Reid WV, Mooney HA, Cropper A, Capistrano D, Carpenter SR, Chopra K e.a. (2005) Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
- Schlesinger, W.H. (2009) On the fate of anthropogenic nitrogen. *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences)* 104:203-208
- Schulze, E.D., Luysssaert, S. Ciais, P., Freibauer, A., Janssens, I.A. et al. *Nature Geoscience* 2, 842–850 (2009); published online: 22 November 2009; ...

- Smil, V. (2001a) *Cycles of Life; Civilization and the Biosphere*. Scientific American Library, New York, ISBN 0-7167-6039-8, pp 221.
- Smil, V. (2001b) *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch and the Transformation of World Food Production*. The MIT Press, Cambridge, MA, xvii + 338 pp.
- Snelders, H.A.M. (1984). *Landbouw en scheikunde in Nederland in de voor-Wageningse periode (1800-1876)*.
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, and de Haan C. (2006) *Livestock's long shadow: environmental issues and options* (Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp.
- Stevens, C.J., Dise, N.B., Mountford, J.O., Gowing, D.J., (2004) Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science* 303 (5665), 1876-1879.
- Townsend, A. R., R. W. Howarth, M. S. Booth, C. C. Cleveland, S. K. Collinge, A. P. Dobson, P. R. Epstein, E. A. Holland, D. R. Keeny, and M. A. Malin. 2003. Human health effects of a changing global nitrogen cycle, *Frontiers in Ecol.*, 1(5), 240-246.
- UNEP (2007) *Reactive Nitrogen in the Environment - Too Much or Too Little of a Good Thing*. UNEP, Nairobi, Kenya.
- Van Aardenne, J.A., Dentener, F.J., Olivier, J.G.J., Klein Goldewijk, C.G.M. and J. Lelieveld (2001) A 1 x 1 degree resolution dataset of historical anthropogenic trace gas emissions for the period 1890-1990. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 909-928
- Velthof et al., 2009 G.L. Velthof, D.A. Oudendag, H.P. Witzke, W.A.H. Asman, Z. Klimont and O. Oenema, *Integrated assessment of nitrogen losses from agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE*, *J. Environ. Qual.* 38 (2009), pp. 402–417.
- Vitousek, P.M. and J.M. Melillo, 1979. Nitrate losses from disturbed forests: Patterns and mechanisms. *Forest Sci.* 25: 605-619.
- Vitousek, J.P.W., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H., Tilman, D.G., 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* 7 (3), 737e750.
- Von Liebig, J (1840). *Die organische Chemie in ihre Auswendung auf Agricultur und Physiologie*. Brunswick, Duitsland.
- Yang, H.S., 2006. Resource management, soil fertility and sustainable crop production: Experiences of China, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 116, Issues 1-2, Nutrient Management in Tropical Agroecosystems, August 2006, Pages 27-33, ISSN 0167-8809, DOI: 10.1016/j.agee.2006.03.017.

