

Stikstof depositie in de duinen: alles in beeld?

De natuurwaarden in de duinen komen vooral voor in de duingraslanden. Zij bevatten een aanzienlijk deel van de Rode Lijstsoorten. Door vergrassing en verstruweling staat de kwaliteit en kwantiteit ervan onder druk. Beheerders doen er veel aan om ze in stand te houden, maar het is de vraag of dat een haalbare doelstelling is. De stikstofbelasting daalt weliswaar, maar is nog steeds hoog en er zijn ook tot dusver nog niet gekwantificeerde factoren die roet in het eten kunnen gooien.

Bezien vanuit plantensoorten zijn de droge duingraslanden samen met de vochtige duinvalleien de grote bijzonderheden van het duinlandschap (tabel 1). Ook in Europese context wordt dat onderkend: de zogenaamde ‘grijze duinen’ zijn niet voor niets een prioritair te beschermen habitattype (H2130). Er zijn veel factoren die de afgelopen decennia een rol speelden bij de teloorgang van zowel de kwaliteit als de kwantiteit van de duingraslanden (zie Arens *et al.*, dit nummer). Wij lichten hier een aspect uit dat hele scala, namelijk stikstof.

Stikstofdepositie in Nederland

Nederland heeft net als andere geïndustrialiseerde landen een historie van toename van stikstofdepositie. De natuurlijke atmosferische afzetting wordt geschat op 1-5 kg stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹ (Stuyfzand, 1993; Asman *et al.*, 1998; Galloway *et al.*, 2004). In Nederland, waar zeewind dominant is, wordt deze vaak gesteld op ongeveer 1,7 kg stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹ (Van Jaarsveld, 2004). Verbranden van fossiele brandstoffen en de modernisering en intensivering van de landbouw hebben de atmosferische stikstofdepositie sterk verhoogd. Zo nam deze toe van on-

geveer 15 naar 40 kg stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹ tussen 1950 en 1990 (Noordijk, 2007; Vitousek *et al.*, 1997; Galloway *et al.*, 2004; Galloway, 1995). De stikstofafzetting bestaat uit zowel ammoniakverbindingen als stikstofoxiden die respectievelijk uitgestoten worden door de landbouw (ongeveer 90%) en door het verkeer (50%). In 1988 was de stikstofdepositie in Nederland op haar maximum met ongeveer 50 kg stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹, een waarde die tien maal hoger was dan die rond 1900 (Noordijk, 2007). Sinds 1990 is de situatie aan de beterende hand. Door verschillende maatregelen is de gemiddelde stikstofdepositie in Nederland gedaald tot ongeveer 29 kg stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹ in 2007 (Compendium voor de Leefomgeving, 2012), maar het streefdoel van gemiddeld 22 kg stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹ in 2010 (VROM, 2001) is niet gehaald.

Stikstofdepositie in de duinen

De duinen liggen gunstig omdat zij over het algemeen wat verder verwijderd zijn van agrarische stikstofbronnen en vaak te maken hebben met zuidwestelijke wind die relatief schone lucht aanvoert. Uit een aantal actuele rapporten zou dan ook blijken dat de kritische depositiewaarden in ongeveer 62% van het duingebied op dit moment niet overschreden worden (Van Hinsberg *et al.*, 2001; Lammers *et al.*, 2005; Schouwenberg, 2007; Kros *et al.*, 2008; De Vries, 2008), zie figuur 1. Verschillende duinbeherende en onderzoeksinstanties vragen zich echter af of het wel zo goed gaat met de Nederlandse duinen. De berekende depositiewaarden komen niet altijd overeen met de gemeten afzettingen, zie tabel 2.

structuurtype	%	vocht	%	voedselrijkdom	%
pionier	28	aquatisch	5	arm, zuur	6
grasland	49	nat	2	arm, zwakzuur	32
ruderaal	4	vochtig	36	arm, basisch	31
struweel	11	droog	30	matig voedselrijk	15
water	5	-	3	zeer voedselrijk	2
?/-	3	-	-		14

ANNEMIEKE
KOOIJMAN, HARRIE
VAN DER HAGEN &
ERIK NOORDIJK

Dr. A.M. Kooijman
Instituut voor
Biodiversiteit en
Ecosysteem Dynamica,
Universiteit van
Amsterdam, Science Park
904, 1098 XH Amsterdam,
a.m.kooijman@uva.nl
Drs. H.G.J.M. van der
Hagen Dunea Duin & Water
Drs. H. Noordijk
Planbureau voor de
Leefomgeving

Tabel 1 percentage van de Nederlandse Rode Lijst plantensoorten dat min of meer specifiek gebonden is aan de duinen, gekarakteriseerd naar structuurtype, vochtgraad en voedselrijkdom (Runhaar *et al.*, 1987). In totaal gaat het om 187 van de 486 Rode Lijstsoorten

Table 1 percentage of Dutch Red List plant species which is more or less confined to the coastal sand dunes, characterised after structure type, water conditions and nutrients (Runhaar *et al.*, 1987). In total it concerns 187 of the 486 Red List species.

Foto Flip Witte

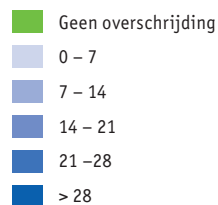
Tabel 2 gemeten natte depositie van stikstofverbindingen in duingebieden (Kooijman *et al.*, 2009a).

Table 2 empirical data from wet deposition of nitrogen in dune areas (Kooijman *et al.*, 2009a).

Figuur 1 overschrijding van de kritische stikstofdepositie in de duinen in 2010 (Door PBL/Sandy van Tol berekend uit: Compendium voor de Leefomgeving, 2012). De relatief gunstige cijfers voor de duinen (Kooijman *et al.*, 2009) geven een te positief beeld van de situatie.

Figure 1 exceeding of the critical nitrogen deposition in the coastal sand dunes in 2010 (By PBL/Sandy van Tol based on: Compendium voor de Leefomgeving, 2012). The relative favourable amounts for the dunes (Kooijman *et al.*, 2009) give a too positive image of the reality.

Overschrijdingen kritische depositie in kg ha⁻¹ jaar⁻¹



Natte stikstofdepositie (kg ha⁻¹ jaar⁻¹)

	Stuyfzand, 1991	Bobbink, niet gepubliceerd	Van der Meulen <i>et al.</i> , 1996	Sival & Strijkstra-Kalk, 1999
Leiduin (5,6 km van zee); 1937-'39	5			
Leiduin (5,9 km van zee); 1979-'81	36			
Bergen (3,6 km van zee); 1979-'81	45			
Castricum (2,0 km van zee); 1979-'81	43			
Wijk aan Zee (0,9 km van zee); 1979-'81	53			
Scheveningen (0,6 km van zee); 1979-'81	80			
De Kooy (4,8 km van zee); 1983-'87	33			
Leiduin (5,9 km van zee); 1988-'89	36			
Terschelling & Schiermonnikoog; 1992-'93				20-35
Meijndel; 1991-'94		21-28	30	
Schoorl; 1992-'94			27	

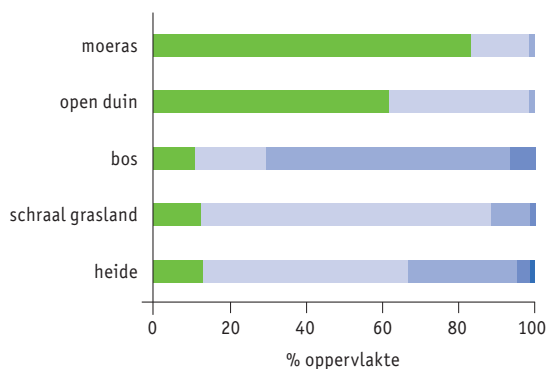
Zo is de depositie van 5 kg stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹ in Leiduin (Amsterdamse Waterleidingduinen) rond 1938 hoger dan men zou verwachten vanuit de natuurlijke achtergrondwaarden. En ook in de duinen werden in de tachtiger jaren van de vorige eeuw hoge stikstofdeposities gemeten: tot 45 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ (tabel 2). Bovendien traden er grote veranderingen op in de duinen de laatste decennia, zoals een afname van zeldzame kruiden (onder meer Van der Meulen *et al.*, 1996) en vooral van korstmossen (Ketner-Oostra, 2006), een afname van actieve dynamische ecosystemen (Arens *et al.*, dit nummer), een

toename van gefixeerde duingraslanden, een toename van struweel (onder meer Van Til *et al.*, 2002), en een versnelde bodemverzuring (Ten Harkel & van der Meulen, 1996; Kooijman *et al.*, 1998; Jones *et al.*, 2004; Kros *et al.*, 2008). Veel onderzoek wijst naar te hoge deposities van stikstof en/of zuur als belangrijke oorzaken.

Dit artikel laat aan de hand van recent onderzoek zien dat de stikstofdepositie in de duinen een groter probleem is dan op basis van de gangbare depositieberekeningen wordt verwacht. Zowel de berekende deposities als de kritische depositiewaarden staan namelijk ter discussie.

Kritische depositiewaarden

De depositie bepaalt samen met de stikstofgevoeligheid van ecosystemen in hoeverre stikstof in een natuurgebied een probleem is. Het effect van een bepaalde depositie op de vegetatie loopt via de stikstofconcentratie in de bodem. Deze concentratie is niet rechtstreeks uit de depositiewaarden af te leiden, omdat deze ook van andere factoren afhangt, waaronder de vegetatiestructuur, de bodemeigenschappen en de historie van de depositie. Om toch een relatie te leggen met het effect op planten,



zijn nationaal en internationaal voor elk vegetatietype of groep van vegetatietypen kritische depositiewaarden bepaald op basis van experimenten en modelberekeningen. Wanneer de stikstofdepositie de kritische niveaus van de voorkomende habitattypen overschrijdt, dan bestaat het risico op significante negatieve effecten, waardoor de samenstelling van de vegetatie op den duur kan veranderen (De Haan *et al.*, 2008). Speciaal bij hoge en langdurige overschrijding neemt de kans op vergrassing sterk toe. Duingraslanden, vooral het zwakgebufferde type, zijn het meest kritisch ten aanzien van de kritische depositiewaarde (Kooijman *et al.*, 1998; Van Dobben & Van Hinsberg, 2008). Andere begroeiingen, waaronder duinstruwelen, zijn minder kritisch.

Bobbink *et al.* (2010) geven aan dat de kritische depositiewaarden voor de duinen te optimistisch lijken en hebben voorstellen gedaan voor een nadere aanscherping. Maar de kritische depositie staat met die aanscherping erbij nog steeds ter discussie. Volgens Remke *et al.* (2009) worden duingraslanden namelijk al negatief beïnvloed bij een totale stikstofdepositie van 5-8 kg ha⁻¹ jaar⁻¹. Dit betekent dat er meer duingebieden zijn waar de kritische depositiewaarde wordt overschreden dan tot dusver verondersteld op basis van modelberekeningen. Bovendien is die berekende depositie te rooskleurig ingeschat.

Berekening van de stikstofdepositie

Het meten van de werkelijke depositie van stikstof is een stuk moeilijker en kostbaarder dan de meting van stikstofconcentraties in de lucht. Er zijn dan ook weinig echte depositiemetingen beschikbaar en daarom gaat men uit van modelberekeningen. In Nederland wordt vooral het OPS-model gebruikt (Van Jaarsveld *et al.*, 2004). Sinds de jaren negentig worden deze berekende deposities geïntegreerd met concentratiemetingen in de

lucht op acht locaties overwegend in agrarisch gebied. De berekende en gemeten concentraties komen gemiddeld goed overeen en daarmee lijkt de berekende depositie over heel Nederland tamelijk goed ingeschat te zijn. Maar juist in de duinen is er een probleem zoals in de volgende paragraaf wordt besproken.

Het algemene beeld is dat de intensieve veehouderij nog steeds zorgt voor de meeste uitstoot, hoewel de emissies sinds 1980 met 40% zijn gedaald. De belangrijkste brongebieden zijn de gebieden met intensieve veehouderij in Zuid- en Oost-Nederland. Daar vindt de hoogste depositie plaats. De duinen liggen, met veel wind van zee, volgens de berekeningen zeer gunstig. De invloed van bronnen vanuit het land lijkt beperkt. In mindere mate geldt dit ook voor stikstofoxiden, waarvan het ruimtelijke patroon wordt gedomineerd door het verkeer. Specifiek voor de duinen is ook de zeescheepvaart van belang. De bijdrage hiervan kan oplopen tot circa 1 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ en lokaal hoger. Ten opzichte van 20 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ is dat een bijdrage om rekening mee te houden.

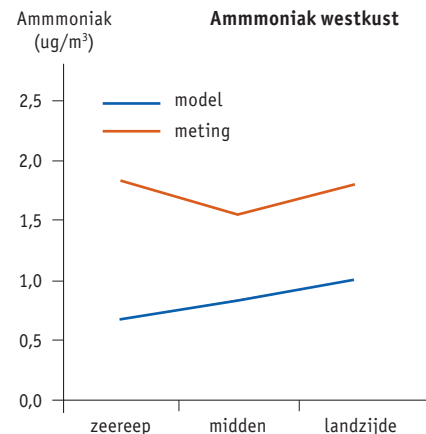
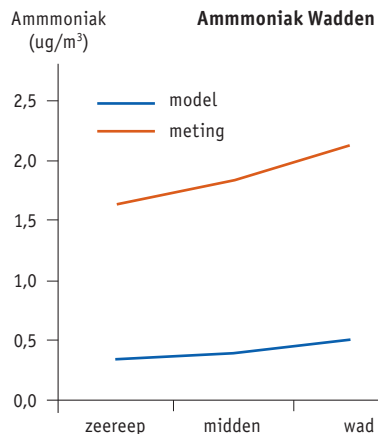
De berekeningen voor stikstofoxiden zijn van oudsher betrouwbaarder dan voor ammoniakverbindingen. Om de ammoniakberekeningen in natuurgebieden te verifiëren is in 2005 het MAN (Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden) opgezet (Stolk *et al.*, 2009).

Meer ammoniak in duinen dan berekend

Vanaf het begin verschilden in de duinen de MAN-metingen substantieel van de berekende concentraties. Ze zijn enkele malen hoger, zie figuur 2. In de duinen zou op de meeste plaatsen bijna 6 kg stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹ meer neerslaan dan berekend. Uit aanvullend onderzoek is gebleken dat de meetmethode in de duinen inmiddels voldoende nauwkeurig is om daar niet meer aan te twifelen. Dit betekent dat er serieus gekeken moet worden naar onvolkomenheden in de berekening. Wat

Figuur 2 grafieken van de berekende en in het MAN gemeten ammoniakconcentraties, gemiddeld over vier transecten op de Waddeneilanden en drie langs de westkust van Holland 2005-2010. Ieder transect heeft een meetpunt vlak bij zee, een punt centraal in het duingebied en een punt nabij de Waddenzee of de overgang naar het agrarische binnenland.

Figure 2 graphs of the calculated and measured ammonia concentrations, averaged over four transects on the Wadden islands and three along the west coast of Holland 2005-2010. Every transect gives data from near the sea, centrally in the dune area and near the Wadden Sea or on the border of the dunes and the hinterland.

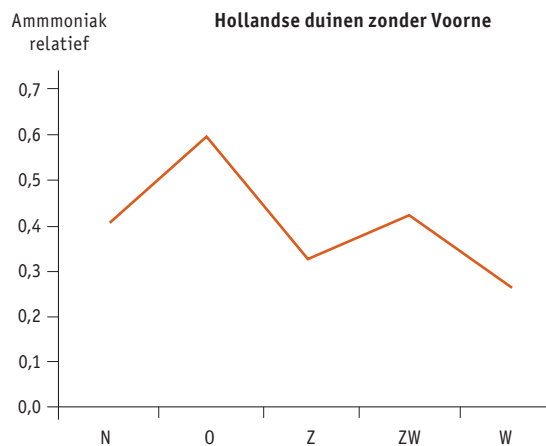


in figuur 2 opvalt, is dat het verschil in concentratie in de Hollandse duinen het grootst is in de zeereep. Op de Waddeneilanden is deze het grootst bij de Waddenzee. Dit wekt de verwachting dat de zee als bron van ammoniak optreedt. Figuur 3 bevestigt dit. De concentratie op alle duinlocaties van de westkust is hoger bij zuidwest- of noordenwind dan bij zuiden- en westenwind. In die gevallen bereikt de wind het land via een lang tra-

ject door de brandingzone. En omdat de ammoniakconcentratie daardoor verhoogd raakt – op een zomerdag, als er een zeebriesje over de branding en de eerste duinenrijen waait, met wel enkele $\mu\text{g m}^{-3}$ – lijkt die brandingzone een belangrijke bron van ammoniakuitstoot die de discrepantie tussen model en meting ten dele of geheel verklaart. De zee bevat vooral nabij de kust veel ammoniumverbindingen, samenhangend met plankton en algen, rottend organisch materiaal en bloei van schuimalg (*Phaeocystis*) die vooral in het voorjaar voor verhoogde ammoniakconcentraties zorgt (Rauch et al., 2008). Deze verbindingen zullen deels verdampen naar de atmosfeer en in de branding verstuiven. In samenwerking met anderen werkt het RIVM deze factoren op dit moment uit om zo tot een verbeterde modellering van de stikstofdepositie in de duinen te komen.

Figuur 3 invloed van de windrichting op de in het MAN gemeten concentraties van ammoniak in de zeereep van de Hollandse kust. De concentratie is relatief weergegeven ten opzichte van de gemiddelde concentratie bij die windrichting in Nederland.

Figure 3 influence of the wind direction on ammonia concentrations in the sea shore from the Dutch coast. The concentration is plotted relatively to the average concentration from that wind direction in The Netherlands.



Interactie met fosfaat

De duinen hebben een sterke verzuring ondergaan. Ten dele is die het gevolg van natuurlijke successie, maar ook de hoge zuurdepositie heeft een rol gespeeld, met name die van zwavel. Precieze cijfers zijn niet bekend,

maar een schatting geeft aan dat de extra verzuring uit de depositie geleid kan hebben tot een verlaging van het kalkfront in 20 jaar met 4-11 millimeter in kalkrijke bodems, en 43-110 millimeter in kalkarme bodems (Kooijman et al., 2009a). Deze verzuring leidt tot een versterkte oplossing van calciumfosfaat. Calciumfosfaat is bij hoge pH onoplosbaar en zorgt voor fosfaatfixatie in de bodem (Kooijman et al., 1998, Kooijman & Besse, 2002). Als er door verzuring meer fosfaat beschikbaar komt, wordt het effect van verhoogde stikstofdepositie versterkt, omdat beide stoffen essentiële voedingsstoffen zijn. Als er veel stikstof beschikbaar is, maar weinig fosfaat, kan de vegetatie het hogere stikstofaanbod eigenlijk niet gebruiken. Als er echter zowel veel stikstof als fosfaat is, zal de biomassa-productie van de vegetatie fors hoger worden, en zullen de duingraslanden vergrassen.

De gevolgen van hoge stikstofdepositie voor de vegetatie hangen dus mede af van de beschikbaarheid van fosfaat. Dat betekent ook dat de gevolgen van hoge stikstofdepositie kunnen verschillen tussen het Wadden- en Renodunaal district en anderzijds het voor-, midden- en achterduin. In kalkrijke bodems is fosfaat van nature vooral aanwezig als calciumfosfaat. In kalkarme bodems kan fosfaat ook worden gefixeerd, maar alleen als het gehalte aan ijzer hoog is (Kooijman et al., 2009b). In de Hollandse duinen zijn zowel het kalkgehalte als het ijzergehalte relatief hoog vanwege de herkomst van het zand uit het stroomgebied van de Rijn. Daar is fosfaatfixatie dan ook mogelijk, vooral in de voorduinen, in bodems met een kalkrijke bovengrond, en in de achterduinen, in zones met actieve stuifkuilen waar het organische stofgehalte van de bodem laag is. In deze laatste bodems is fosfaat gefixeerd in ijzerfosfaat. Daardoor is de vergrassing minder prominent en ook gemakkelijker terug te draaien door bijvoorbeeld begrazing.

In de middenduinen, maar ook in achterduinen en in toenemende mate in de voorduinen waar bodems voorkomen rijk aan organische stof, is de fosfaatbeschikbaarheid echter veel hoger. Dit komt door het oplossen van calciumfosfaat in ontcalcite bodems (middenduinen), en de binding van fosfaat aan complexen van ijzer en organische stof (achterduinen) die veel zwakker is dan aan ijzerfosfaat. In de middenduinen en achterduinen is vergrassing een veel groter probleem, en ook moeilijker terug te draaien door beheer. Het lukt wel met bijvoorbeeld begrazing, maar er is meer voor nodig dan in bijvoorbeeld kalkrijke duinen.

Ook de duinen van het Waddendistrict hebben een relatief hoge fosfaatbeschikbaarheid. Ze zijn vaak kalkarm en het ijzergehalte is van nature heel laag, omdat het zand uit Noordoost-Europa komt (Eisma, 1968). Fixatie van fosfaat in de vorm van calcium- of ijzerfosfaat is dan ook bijna niet mogelijk. Als gevolg daarvan zijn de vergrassing en het terugdringen hiervan op de Waddeneilanden een groter probleem dan aan de Hollandse kust, ondanks de lagere stikstofdepositie. Bijkomend probleem is dat grazers helm (*Ammophila arenaria*) veelal links laten liggen.

Langdurig extra beheer

De gedachte dat de kustduinen voor een deel ontsnappen aan de hoge stikstofdepositie blijkt niet te kloppen. Ook is duidelijk dat er nog onzekerheden zijn in de vaststelling van de juiste hoeveelheden stikstof die op de duinen valt. Het is aannemelijk dat de al opgetreden problemen in de bodem en vegetatie pas verbeteren na extra beheer of na een zeer lange tijd zonder deposities boven de kritische waarde (Commissie m.e.r., 2012). Volgens deze commissie verdient het de voorkeur om de PAS (Programmatiese Aanpak Stikstof) zodanig uit te werken dat een tijdpad wordt gegeven waarbinnen de



Foto **Jerry van Dijk**
Wisentporen in het
Kraansvlak (Nationaal Park
Zuid-Kennemerland).

instandhoudingdoelen worden behaald en dat de ontwikkelingsruimte voor landbouwbedrijven niet eerder wordt uitgegeven dan nadat natuurherstel daadwerkelijk is opgetreden. Het kan echter jaren duren voordat natuurherstel zichtbaar wordt omdat natuur dynamisch, voor een deel onvoorspelbaar en niet maakbaar is (Commissie m.e.r., 2012). Daarnaast is het niet onwaarschijnlijk dat hoge atmosferische verzurende deposities in het verleden hebben geleid tot irreversibele ver-

anderingen in kalkrijke bodems en vegetaties. Begrazingsbeheer wordt veel gebruikt om het tij te keren. Verstuiving vanuit de zeereep is een ander belangrijk initiatief (Arens *et al.*, dit nummer). Het openen van de zeereep kan leiden tot vorming van nieuwe paraboolduinen en het verplaatsen daarvan landinwaarts, zodat kalkrijk zand de doorgaande verzuring kan verminderen of zelfs tegengaan. Echter, ook dit is een proces van lange adem.

Summary

Nitrogen deposition in coastal sand dunes: how bad is the situation still?

Annemieke Kooijman, Harrie van der Hagen & Erik Noordijk

coastal sand dunes, nitrogen influx, ammonium, influence of the sea

Coastal dune grasslands are under threat mainly due to grass and shrub encroachment. A surplus of nitrogen is an important factor. At the beginning of the last century the nitrogen load was about 5 kg ha⁻¹ year⁻¹. Because of agriculture, industry and traffic the amount of nitrogen went up to about 45 kg. The last twenty years it has been reduced to 30 kg ha⁻¹ year⁻¹ or a bit lower. Recent papers state that the critical load in 62% of the dune area is met.

Dune managers and researchers are not convinced due to the continuing process of grass encroachment. Because of an intensified monitoring network, especially in and along the coastal area, this could be proven. There is an additional 6 kg ha⁻¹ year⁻¹, which has to be taken in consideration. The sea and especially the waters along the beach along the mainland coast and on the Wadden sea produce ammonium vapour, partially from organic origin. Another problem which has to be addressed is the accumulation of organic matter in the soil profile, which probably accumulated in higher amounts than under low nitrogen conditions. This heritage has to be taken into account when management measures are taken. Cattle grazing practices might not be sufficient to maintain the (European) goals for dune grasslands (grey dunes).

Literatuur

Arens, S.M., L.H.W.T. Geelen, H.G.J.M. van der Hagen & Q.L. Stings, dit nummer. Duinmobiliteit: Is zandaanvoer door de zeereep de sleutel tot succes? *Landschap* 29/3: 131-139.

Asman, W.A.H., M.A. Sutton & J.K. Schjørring, 1998. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition. *New Phytologist* 139: 27-48.

Bobbink, R., T. Tomassen, M. Weijters & J-P. Hettelingh, 2010. Revisie en update van kritische N-depositiewaarden voor Europese natuur. *De Levende Natuur* 111 (6): 254-258.

Commissie m.e.r., 2012. Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). Advies van de Commissie m.e.r. Rapportnummer 2540-168.

Compendium voor de Leefomgeving, 2012. Overschrijding kritische stikstofdepositie op natuur. <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl>.

Dobben, H.F. van & A. van Hinsberg, 2008. Overzicht van kritische depositiewaarden voor stikstof, toegepast op habitattypen en Natura 2000-gebieden. *Alterra-rapport 1654*. Wageningen. Alterra.

Eisma, D., 1968. Composition, origin and distribution of Dutch coastal sands between Hoek van Holland and the island of Vlieland. PhD-thesis. Groningen. Rijksuniversiteit Groningen.

Galloway, J.N., 1995. Acid deposition: perspectives in time and space. *Water, Air, and Soil Pollution* 85: 15-24.

Galloway, J.N., F.J. Dentener, D.G. Capone, E.W. Boyer, R.W. Howarth, S.P. Seitzinger, G.P. Asner, C.C. Cleveland, P.A. Green, E.A. Holland, D.M. Karl, A.F. Micheals, J.H. Porter, A.R. Townsend & C.J. Vörösmarty, 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* 70: 153-226.

Haan, B.J. de, J. Kros, R. Bobbink, J.A. van Jaarsveld, W de Vries & H. Noordijk, 2008. Ammoniak in Nederland. PBL-rapport 500125003. Bilthoven. Planbureau voor de Leefomgeving.

Harkel, M.J. ten & F. van der Meulen, 1996. Impact of grazing and atmospheric nitrogen deposition on the vegetation of dry coastal dune grasslands. *Journal of Vegetation Science* 7: 445-452.

Hinsberg, A. van, M.L.P van Esbroek, A.M. Hendriks, G.P. Beugelink, W.A.J. van Pul, M.J.H. Pastoors & J.M.M. Aben, 2001. Knelpuntanalyse van milieudruk in relatie tot de provinciale natuurdoelen. RIVM rapport 408663 002. Bilthoven. Natuurplanbureau.

Jaarsveld, J.A. van, 2004. The Operational Priority Substances model. Description and validation of OPS-Pro. RIVM-rapport 500045001. Bilthoven. RIVM.

- Jones, M.L.M., H.L. Wallace, D. Norris, S.A. Brittain, S. Haria, R.E. Jones, P.M. Rhind, B.R. Reynolds & B.A. Emmett, 2004.** Changes in vegetation and soil characteristics in coastal sand dunes along a gradient of atmospheric nitrogen deposition. *Plant Biology* 6: 598-605.
- Ketner-Oostra, R., 2006.** Lichen-rich coastal and inland sand dunes (Corynephorion) in The Netherlands: vegetation dynamics and nature management. Dissertatie Wageningen Universiteit.
- Kooijman, A.M., J. Dopheide, J. Sevink, I. Takken & J.M. Verstraten, 1998.** Nutrient limitation and their implications on the effects of atmospheric deposition in coastal dunes: lime-poor and lime-rich sites in the Netherlands. *Journal of Ecology* 86: 511-526.
- Kooijman, A.M. & M. Besse, 2002.** On the higher availability of N and P in lime-poor than in lime-rich coastal dunes in the Netherlands. *Journal of Ecology* 90: 394-403.
- Kooijman, A.M., H. Noordijk, A. van Hinsberg & C. Cusell (2009a).** Stikstofdepositie in de duinen; een analyse van de N-depositie, de kritische niveaus, de erfenis uit het verleden en de stikstofefficiëntie in verschillende duinzones. Rapport Universiteit van Amsterdam, in opdracht van Waternet, Dunea en PWN.
- Kooijman, A.M., I. Lubbers & M. van Til, 2009b.** Iron-rich dune grasslands: Relations between soil organic matter and sorption of Fe and P. *Environmental Pollution* 157: 3158-3165.
- Kros, J., B.J. de Haan, R. Bobbink, J.A. van Jaarsveld, J.G.M. Roelofs & W. de Vries, 2008.** Effecten van ammoniak op de Nederlandse natuur: achtergrondrapport. Alterra-rapport 1698. Wageningen. Alterra.
- Lammers, G.W., A. van Hinsberg, W. Loonen, M.J.S.M. Reijnen & M.E. Sanders, 2005.** Optimalisatie Ecologische Hoofdstructuur: Ruimte, milieu en watercondities voor duurzaam behoud van biodiversiteit. MNP-rapport 408768003. Bilthoven. Milieu- en Natuurplanbureau.
- Meulen, F. van der, A.M. Kooijman, M.A.C. Veer & J.H. van Boxel, 1996.** Effectgerichte maatregelen tegen verzuring en eutrofiëring in open droge duinen: eindrapport fase 1, 1991-1995. Amsterdam. Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam.
- Noordijk, H., 2007.** Nitrogen in the Netherlands over the past five centuries. In: G.J. Monteny & E. Hartung (eds.). Ammonia emissions in agriculture. Proceedings "First International Ammonia Conference in Agriculture", Ede, Nederland.
- Rauch, M., L. Denis & J.C. Dauvin, 2008.** The effects of Phaeocystis globosa bloom on the dynamics of the mineralization processes in intertidal permeable sediment in the eastern English Channel (Wimereux, France). *Mar. Pollut. Bull.* 56(7): 1284-1293.
- Remke, E., E. Brouwer, A. Kooijman, I. Blindow, H. Esselink & J.G.M. Roelofs, 2009.** Even low to medium nitrogen deposition impacts vegetation of dry, coastal dunes around the Baltic Sea. *Environmental Pollution* 157: 792-800.
- Runhaar, J., C.L.G. Groen, R. van der Meijden & R.A.M. Stevers, 1987.** Een nieuwe indeling in ecologische groepen binnen de Nederlandse flora. *Gorteria* 13(1987): 277-359.
- Schouwenberg, E.P.A.G., 2007.** Huidige en toekomstige stikstofbelasting op de Natura 2000-gebieden. WOT Natuur & Milieu, werkdocument 59. Wageningen. Alterra.
- Sival, F.P. & M. Strijkstra-Kalk, 1998.** Atmospheric deposition of acidifying and eutrophication substances in dune slacks. *Water, Air, and Soil Pollution* 116: 461-477.
- Stolk, A.P., M.C. van Zanten, H. Noordijk, J.A. van Jaarsveld & W.A.J. van Pul, 2009.** Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden. Meetresultaten 2005-2007. RIVM rapport 680710001/2009. Bilthoven. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Stuyfzand, P.J., 1991.** De samenstelling van regenwater langs Hollands kust. KIWA-rapport SWE 91.010. KIWA, Nieuwegein.
- Stuyfzand, P.J., 1993.** Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. PhD-thesis. Amsterdam. Free University of Amsterdam.
- Til, M. van, P. Ketner & S. Provoost, 2002.** Duinstruwelen in opmars. *De Levende Natuur* 103 (3): 74-77.
- Vitousek, P.M., J.D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger & D.G. Tilman, 1997.** Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* 7: 737-750.
- Vries, W. de, 2008.** Verzuring: oorzaken, effecten, kritische belastingen en monitoring van de gevolgen van ingezet beleid. Alterra-rapport 1699. Wageningen. Alterra.
- VROM, 2001.** Nationaal Milieubeleidsplan 4. Den Haag.