

Denitrificatie in poldergronden

Verslag van een onderzoek naar het belang van denitrificatie in de stikstofhuishouding van poldergronden en het mogelijke effect van peilverhoging op de denitrificatie, uitgevoerd in opdracht van de Provincie Zeeland

W.J. Corré

Het DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO) is onderdeel van de Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.

Het instituut is opgericht op 1 november 1993 en is ontstaan door de samenvoeging van het Wageningse Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek (CABO-DLO) en het in Haren gevestigde Instituut voor Bodemvruchtbaarheid (IB-DLO).

DLO heeft tot taak het genereren van kennis en het ontwikkelen van expertise ten behoeve van de beleidsvoorbereiding en -uitvoering van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, het bevorderen van de primaire landbouw en de agrarische industrie, het inrichten en beheren van het landelijk gebied, en het beschermen van natuur en milieu.

AB-DLO heeft tot taak het verrichten van zowel fundamenteel-strategisch als toepassingsgericht onderzoek en is gepositioneerd tussen het fundamentele basisonderzoek van de universiteiten en het praktijkgerichte onderzoek op proefstations. De verkregen onderzoeksresultaten dragen bij aan de bevordering van:

- de bodemkwaliteit;
- duurzame plantaardige produktiesystemen;
- de kwaliteit van landbouwprodukten.

Kernexpertises van het AB-DLO zijn: plantenfysiologie, bodembioïologie, bodemchemie en -fysica, nutriëntenbeheer, gewas- en onkruidecologie, graslandkunde en agrosysteemkunde.

Adres

Vestiging Wageningen:

Postbus 14, 6700 AA Wageningen

tel. 08370-75700

(m.i.v. 10-10-1995: 0317-475700)

fax 08370-23110

(m.i.v. 10-10-1995: 0317-423110)

e-mail postkamer@ab.agro.nl

Vestiging Haren:

Postbus 129, 9750 AC Haren

tel. 050-337777

(m.i.v. 10-10-1995: 050-5337777)

fax 050-337291

(m.i.v. 10-10-1995: 050-5337291)

e-mail postkamer@ab.agro.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting en conclusies	1
Summary and conclusions	3
1. Inleiding	5
2. Materialen en methoden	7
2.1. Proefopzet	7
2.2. Meetprogramma	7
2.3. Monsternamen en analyses	7
3. Resultaten	9
3.1. Algemene bodemkundige kenmerken	9
3.2. Denitrificatie	11
3.3. Overige bodemparameters	13
4. Discussie	21
Literatuur	23
Bijlage 1. Ligging van de proefplekken	25
Bijlage 2. Denitrificatie- en potentiële denitrificatiesnelheid in zes bodemlagen van 20 cm van twee proefplekken op De Rusthoeve	27

Samenvatting en conclusies

Samenvatting

In 1993 is door de Provincie Zeeland, directie Milieu en Waterstaat, het initiatief genomen tot het opstarten van een 'Praktijkproef Nutriëntenbalans'. Aanleiding hiertoe was de vraag naar een betere onderbouwing van modelstudies naar de problematische eutrofiëring van de afgesloten zeearmen, met name het Veerse Meer.

Doel van de proef is het beter in kaart kunnen brengen van het kwantitatieve belang en van de beheersbaarheid van de belasting van het oppervlaktewater met nutriënten uit landbouwgrond. De praktijkproef wordt in 1994/1996 uitgevoerd op de proefboerderij de Rusthoeve in Colijnsplaat.

Omdat kennis over denitrificatie in kleigronden schaars is, is door de Provincie Zeeland aan AB-DLO de opdracht gegeven in 1994 binnen deze praktijkproef een studie naar dit onderwerp te verrichten. Het doel van deze studie is tweeledig: het verkrijgen van meer inzicht in de bijdrage van denitrificatie aan de stikstofbalans van kleigronden en in de mogelijke effecten van een verhoging van het polderpeil op de denitrificatie.

In de periode van mei 1994 tot januari 1995 is de bodem van twee proefplekken in winter-tarwe en graszaad, beide gevolgd door een groenbemester, vijf maal bemonsterd in zes lagen van 20 cm dikte. De denitrificatiesnelheid is bepaald door incubatie van ongestoorde monsters met acetyleen. In de lagen van 40 tot 120 cm diepte is bovendien met dezelfde techniek de potentiële denitrificatiesnelheid bij incubatie zonder zuurstof bepaald. In mengmonsters van de zes afzonderlijke lagen zijn de gehalten aan vocht, minerale stikstof en water-oplosbaar organisch koolstof bepaald. In de zes bodemlagen zijn de temperatuur en het gehalte aan zuurstof in de bodemlucht gemeten. Eenmalig is een aantal algemene bodemkenmerken zoals korrelgrootteverdeling en gehalte aan organische stof bepaald.

De denitrificatiesnelheid was steeds erg laag, alleen de afbraak van ingewerkte gewasresten, mede in combinatie met bemesting van de groenbemester en een vochtige grond verhoogde de denitrificatiesnelheid aanzienlijk. Het totale verlies aan stikstof door denitrificatie werd geschat in de orde van maximaal tien procent van de aan het hoofdgewas gegeven stikstof en mogelijk twintig procent van de aan de groenbemester gegeven stikstof. De potentiële denitrificatiesnelheid lag gemiddeld een factor vier hoger, maar omdat sterk verhoogde grondwaterstanden weinig voorkomen zal deze maar zelden gerealiseerd kunnen worden.

Conclusies

De kwantitatieve bijdrage van denitrificatie aan de stikstofbalans was voor beide proefplekken niet meer dan ongeveer tien procent van de jaarlijkse stikstofgift. Voor een groot deel van de kleigronden onder bouwland zal deze bijdrage niet veel groter zijn. De teelt en de stikstofbemesting van een groenbemester in het najaar leverde een belangrijke bijdrage aan de denitrificatie.

Het deel van de bodemkolom waar denitrificatie plaatsvindt was voor beide proefplekken vrijwel beperkt tot de bewerkingdiepte.

De factoren die in de bodem de denitrificatiesnelheid bepalen waren voor beide proefplekken in volgorde van afnemende belangrijkheid: beschikbaarheid van organische stof, vochtgehalte en temperatuur.

Het effect van een ingreep in het peilbeheer op de denitrificatie is naar verwachting niet groot. De potentiële denitrificatiesnelheid was wel duidelijk hoger dan de denitrificatiesnelheid, maar omdat deze alleen gerealiseerd kan worden in de diepere bodemlagen, zal de totale denitrificatie weinig toenemen.

Summary and conclusions

Summary

In 1993 the Province of Zeeland (Netherlands) started a "Field study Nutrient Balance" of agricultural fields in normal arable use. Reason was the need for a better basis for model studies on the problematic eutrophication of the closed parts of the Delta estuary, especially the 'Veerse Meer'.

The objective of this study is to improve the understanding of the quantitative importance and the controllability of the nutrient flow from agricultural fields to surface waters. The study is performed on the experimental farm 'Rusthoeve' in Colijnsplaat in 1994-1996. Because data on denitrification in clay soils are scarce, the Province of Zeeland commissioned AB-DLO to study this subject. The objective of this study is to improve the understanding of the importance of denitrification in the nitrogen balance of clay soils and of the possible effects of an elevation of the polder water level on denitrification.

Between May 1994 and January 1995 the soil of two experimental plots with winter wheat and a grass seed crop, both followed by a green manure crop, was sampled five times in six layers of 20 cm. The denitrification rate was determined after incubation of undisturbed soil columns with acetylene. In the layers of 40 to 120 cm, the potential denitrification rate was also determined after incubation with acetylene but without oxygen. The contents of water, mineral nitrogen, and water soluble organic carbon were determined in mixed samples from the six soil layers. Soil temperature and oxygen content of the soil air were determined in the six soil layers. A number of general soil characteristics like texture and organic matter content were determined once.

Denitrification rates were always low, only the decay of ploughed-in crop residues, in combination with nitrogen fertilization of the green manure crop, and a moist soil considerably raised the denitrification rate. The total loss of nitrogen by denitrification was estimated at a maximum of approximately ten percent of the nitrogen given to the main crop and possibly approximately twenty percent of the amount given to the manure crop. The potential denitrification rates were on average four times as high. However, since high water tables occur infrequently and only for short periods, the potential denitrification rates are rarely reached.

Conclusions

The *quantitative contribution of denitrification to the nitrogen balance* was not more than approximately ten per cent of the annual nitrogen fertilizer rate. This contribution will not be much higher in most clay soils under field crops. Growth and fertilization of a green manure crop in autumn contributed substantially to denitrification.

The *part of the soil profile where denitrification occurred* was practically limited to the tillage depth.

For both experimental plots the *soil parameters determining the denitrification rate* were (in order of decreasing importance): availability of organic matter, water content, and temperature.

Elevation of the polder water table will probably only have a small effect on denitrification. The potential denitrification rate was clearly higher than the actual denitrification rate, but because this rate can only be reached in the deeper soil layers there will only be a limited increase in total denitrification.

1. Inleiding

Eutrofiëring van het oppervlaktewater is een belangrijk probleem in Zeeland. Met name in de grote wateren met belangrijke natuur- en recreatieve waarden is de aanvoer van zowel fosfor als stikstof ongewenst hoog. In de afgelopen jaren is een modelstudie verricht naar de nutriëntenbalans van het Veerse Meer (Ruijgh *et al.*, 1993). Veruit de belangrijkste bron van nutriënten voor het Veerse Meer is het uitgeslagen polderwater. Het fosfaat hierin is hoofdzakelijk afkomstig uit kwelwater; van de stikstof is ongeveer 50% uit de landbouw afkomstig. Hoewel op regionale schaal de bijdrage van de bronnen kwantitatief goed bekend is, is er op perceelsniveau nog weinig bekend over de relatie tussen de aanvoer van nutriënten en de uitspoeling naar het oppervlaktewater.

Om deze relatie nader in te kunnen vullen is in 1993 door de Directie Milieu en Waterstaat van de Provincie Zeeland het initiatief genomen tot het opstarten van een 'Praktijkproef Nutriëntenbalans' (Hoekstra & Van de Straat, 1994). Doel van deze proef is de conclusies van de modelstudie te onderbouwen en kennisleemten in te vullen. Deze aanvullingen zijn nodig omdat de in de modellen gebruikte kennis van de bodemprocessen hoofdzakelijk gebaseerd is op studies aan zandgronden. De praktijkproef wordt in 1994/1996 uitgevoerd op de proefboerderij de Rusthoeve in Colijnsplaat.

Het onderzoek in de praktijkproef omvat twee onderdelen:

- A. nutriëntenbalans en waterkwaliteit,
- B. bodemprocessen.

A. Voor dit onderdeel wordt in een balansstudie op perceelsniveau de relatie tussen de aanvoer van stikstof en fosfor en de emissie naar het oppervlaktewater onderzocht. Dit onderdeel wordt gezamenlijk uitgevoerd door de Provincie Zeeland, het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne, de Landbouwuniversiteit Wageningen, het TNO Instituut voor Grondwater en Geoenergie en de Proefboerderij de Rusthoeve.

B. Het onderdeel bodemprocessen omvat een studie van de denitrificatie; juist aan dit proces is op kleigronden nog nauwelijks onderzoek gedaan (Van Eck, 1995). Deze studie wordt uitgevoerd door het DLO Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek, in opdracht van de Provincie Zeeland en met financiële steun van het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling.

Denitrificatie is een microbieel proces, waarbij nitraat wordt gereduceerd tot de gasvormige verbindingen N_2O en N_2 . Dit is het enige proces waarbij biologisch of chemisch gebonden stikstof weer in elementaire stikstof kan worden omgezet.

Denitrificatie vindt alleen plaats onder anaërobe omstandigheden en wordt direct beïnvloed door de zuurstofvoorziening, de beschikbaarheid van afbreekbare organische stof, de temperatuur en de pH. De zuurstofvoorziening wordt weer beïnvloed door de diffusieweerstand (structuur en vochtgehalte) en het verbruik (wortelrespiratie en afbraak organische stof).

De plaats van denitrificatie in de stikstofhuishouding van bouwland is weergegeven in schema 1. Door denitrificatie kan tijdens de groeiperiode voor het gewas beschikbare stikstof verloren gaan en kan, vooral in herfst in winter, stikstof omgezet worden die anders in de vorm van nitraat zou uitspoelen. Over de grootte van stikstofverliezen door denitrificatie is al veel gespeculeerd, maar vooral voor kleigronden zijn betrouwbare gegevens nog zeer schaars (o.a. Van Eck, 1995).

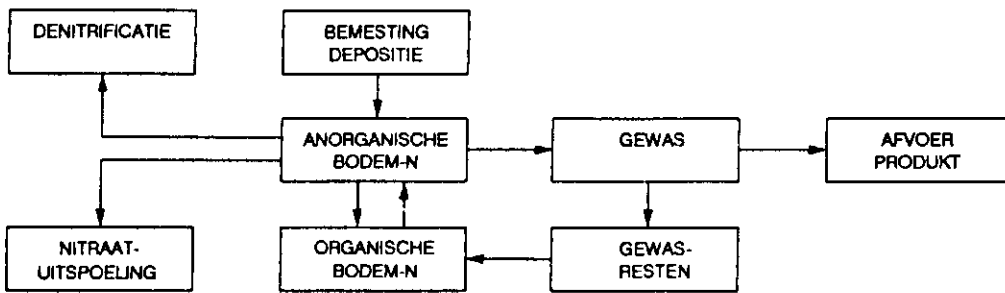
Het onderzoek dient antwoorden te formuleren op de volgende vragen:

1. wat is de kwantitatieve bijdrage van de denitrificatie aan de stikstofbalans?
2. in welk deel van de bodemkolom vindt denitrificatie plaats en door welke factoren in de bodem wordt de denitrificatiesnelheid bepaald?
3. is het te verwachten dat een ingreep in het peilbeheer de denitrificatie zal beïnvloeden?

Dit onderzoek wordt uitgevoerd op twee proefplekken, gelegen op twee percelen van de proefboerderij. Het belangrijkste verschil tussen de twee proefplekken is het kleigehalte van de diepere bodemlagen en het geteelde gewas.

Het onderzoek omvat een beschrijving van de algemene bodemkundige kenmerken van de proefplekken en een vijftal periodieke metingen van de actuele denitrificatie in het gehele profiel (0-120 cm) en van de potentiële denitrificatie in de diepere bodemlagen (40-120 cm). Tijdens deze metingen worden tevens de gehalten aan vocht, minerale stikstof en wateroplosbare koolstofverbindingen van de verschillende bodemlagen bepaald. De potentiële denitrificatie wordt bepaald onder anaërobe omstandigheden, zonder toevoeging van nitraat of afbreekbare koolstofverbindingen.

De periodieke metingen zijn zo gepland dat in de loop van het jaar over een brede reeks van bodemtemperaturen en vochtigheden kan worden gemeten.



Schema 1. Denitrificatie in de stikstofhuishouding van bouwland.

2. Materialen en methoden

2.1. Proefopzet

De studie is uitgevoerd op de percelen 4, waar ook deel A van de praktijkproef wordt uitgevoerd, en 11 van de proefboerderij de Rusthoeve in Colijnsplaat. Beide percelen hebben een bouwvoor van matig tot zeer humusarme kalkrijke zware zavel; de ondergrond van perceel 11 is veel lichter dan die van perceel 4. Beide percelen zijn gedraineerd op een diepte van ongeveer 120 cm met een drainafstand van 12 meter. Het drainwater bevat praktisch geen kwelwater; kwel wordt in het proefgebied alleen gevonden in sloten en watergangen.

Op perceel 4 werd in 1994 wintertarwe geteeld, op perceel 11 voor het derde jaar veldbeemdgras voor zaadteelt. De wintertarwe is drie keer met kunstmeststikstof bemest, op 14 februari ($100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$), op 29 april ($67,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$) en op 30 mei ($54 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$). Het gewas is geoogst op 10 augustus en na onderwerken van de stoppel is op 22 augustus bladrammenas ingezaaid. Dit gewas is op 24 augustus bemest met $67,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$ in de vorm van ammoniumnitraat. Het graszaad is in 1994 met kunstmeststikstof bemest op 14 februari ($143 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$) en is geoogst op 15 juli. De stoppel is op 30 augustus bemest, eveneens met $67,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$ in de vorm van ammoniumnitraat, en na frezen is op 1 september gele mosterd ingezaaid. Beide gewassen dienden als groenbemester en zijn in november ondergeploegd.

Op beide percelen is tussen twee drains een proefplek uitgezet van 12 meter lang en 8 meter breed; proefplek 1 is aangelegd op perceel 4 en proefplek 2 op perceel 11. Een kaart van de ligging en de indeling van de proefplekken is bijgevoegd als bijlage 1. De algemene bodemkundige kenmerken zijn bepaald aan mengmonsters van de gehele proefplek, verder werd per monsterdatum een strook van 2,4 meter lang en 8 meter breed bemonsterd. Direct naast de proefplekken is door de Provincie Zeeland een grondwaterstandsbuis geplaatst.

2.2. Meetprogramma

Op 29 maart (proefplek 1) en op 4 mei 1994 (proefplek 2) zijn grondmonsters genomen voor het bepalen van de korrelgrootteverdeling, de pH-KCl en de gehalten aan kalk, organische stof, totaal stikstof, fosfaat en wateroplosbaar fosfaat.

Op 4 mei, op 20 juni, op 13 september en op 17 oktober 1994 en op 18 januari 1995 zijn beide proefplekken bemonsterd voor het meten van de actuele en de potentiële denitrificatiesnelheid. Op deze data zijn ook grondmonsters genomen voor de bepaling van de gehalten aan minerale stikstof en oplosbare koolstofverbindingen en zijn op verschillende diepten in het profiel de bodemtemperatuur en het zuurstofgehalte van de bodemlucht bepaald en is de grondwaterstand opgenomen. Neerslaggegevens zijn opgenomen op de proefboerderij.

2.3. Monsternamen en analyses

De bodem is steeds bemonsterd tot een diepte van 120 cm, in zes afzonderlijke lagen van 20 cm. Voor de bepaling van de algemene bodemkundige kenmerken is per bodemlaag een mengmonster van 15 steken gemaakt.

De analyses in deze monsters, granulaire samenstelling, pH-KCl, kalkgehalte, organische stofgehalte, totaal stikstof en fosfaat en wateroplosbaar fosfaat zijn uitgevoerd volgens standaard methoden, beschreven in Vierveijzer et al. (1979).

De denitrificatiesnelheid is bepaald door incubatie van ongestoorde grondkolommen met acetyleen, zoals beschreven door Ryden *et al.* (1987). Door de toevoeging van acetyleen wordt specifiek de omzetting van distikstofoxide (N_2O) in stikstof (N_2) geremd, waardoor de bepaling van de N_2O -productie een kwantitatieve maat voor de denitrificatie is.

De grond is geïncubeerd in glazen potten (1 liter), gasdicht afgesloten met een polyacetaal deksel met twee rubber septa en een rubber ring. Per bodemlaag zijn 3 potten met 2 kolommen van 20 cm lengte en een doorsnede van 3,5 cm geïncubeerd. Na toevoeging van 50 ml acetyleen zijn de potten geïncubeerd in een temperatuurkast bij een temperatuur overeenkomend met de in het veld gemiddeld over het gehele profiel gemeten bodemtemperatuur. Na 24 uur is uit de potten een gasmonster van 5 ml genomen; dit is bewaard in een met helium gespoeld glazen monsterflesje met een inhoud van 38 ml, afgesloten met een rubber septum.

De potentiële denitrificatiesnelheid is bepaald in de bodemlaag tussen 40 en 120 cm diepte, in vier lagen van 20 cm. Per laag zijn weer 3 potten met 2 kolommen geïncubeerd. Voor de incubatie met acetyleen zijn de potten vacuüm (0.3 atm) gezogen en gespoeld met stikstof tot in het uitstromende gas geen zuurstof meer meetbaar was. Uit deze potten is na 24 uur en na 48 uur een gasmonster genomen. De potentiële denitrificatiesnelheid is berekend voor de periode tussen 24 en 48 uur; berekening over de eerste 24 uur geeft veelal een onderschatting doordat bij het begin van de incubatie in de grondkolommen nog sporen zuurstof aanwezig kunnen zijn.

Na de incubatie is het totaal gewicht aan vochtige grond en het vochtgehalte per pot bepaald. Het vochtgehalte van de grond is bepaald door drogen bij 105 °C.

De N_2O -gehalten in de lucht uit de monsterflesjes zijn bepaald met een gaschromatograaf (Carlo Erba GC6000), uitgerust met 2 gepakte kolommen (Hayesep Q, 4 m en moleculaire zeef 5A, 2 m) en 2 detectoren (HWD en ECD). De denitrificatiesnelheid is berekend door het gemeten N_2O gehalte in het monsterflesje om te rekenen naar het gehalte in de incubatiepot en vervolgens naar de hoeveelheid omgezette stikstof per oppervlakteenheid. Bij deze berekening is gecorrigeerd voor de temperatuurafhankelijke oplosbaarheid van N_2O in water.

Voor de bepaling van de hoeveelheid minerale stikstof en oplosbare koolstofverbindingen in de grond is per bodemlaag een mengmonster van 10 steken gemaakt. Na extractie van 1 volumedeel veldvochtige grond in 5 volumedelen 1 N KCl is colorimetrisch het gehalte aan ammonium- en aan nitraatstikstof bepaald. In hetzelfde extract is de hoeveelheid oplosbaar koolstof bepaald met een Total Organic Carbon Analyzer (Shimadzu TOC-500). De gehalten aan minerale stikstof zijn van $mg.kg^{-1}$ omgerekend naar $kg.ha^{-1}$ met behulp van de bulkdichtheid, die is berekend uit de gewichten aan droge grond per incubatiepot. De bulkdichtheid was per bodemlaag vrijwel constant in de tijd en bij de berekeningen zijn de gemiddelde waarden aangehouden. Alleen in januari was de bulkdichtheid van de bovenste 2 bodemlagen door het ploegen duidelijk lager geworden en zijn afwijkende waarden aangehouden. De berekende waarden van de bulkdichtheid zijn vermeld bij de algemene bodemkundige kenmerken in tabel 1.

De bodemtemperatuur en het zuurstofgehalte van de bodemlucht zijn gemeten op diepten van 10, 30, 50, 70, 90 en 110 cm. De bodemtemperatuur is gemeten met in de grond gedrukte thermokoppels. Voor de meting van het zuurstofgehalte is een methode gebruikt die recent bij het AB-DLO is ontwikkeld (Rappoldt *et al.*, 1995). Voor de meting worden PVC meetbuizen in de grond gebracht. Deze hebben aan de onderkant een geperforeerde ruimte van 5 of 10 cm lengte en 16 mm doorsnede. Deze ruimte is door koperen buizen, doorsnede 1 mm, verbonden met de bovenkant van de buizen. Nadat de samenstelling van de lucht in de buis in evenwicht is met de bodem kan het zuurstofgehalte bepaald worden door de lucht rond te pompen langs een zuurstofelektrode.

3. Resultaten

3.1. Algemene bodemkundige kenmerken

De gemeten algemene bodemkundige kenmerken zijn samengevat in tabel 1; de korrelgrootteverdeling van de verschillende bodemlagen is bovendien weergegeven in figuur 1. De bodemkundige definities zijn ontleend aan De Bakker & Schelling (1966).

Tabel 1. Algemene bodemgegevens van twee proefplekken op De Rusthoeve. Opname plek 1 29-3-1994, plek 2 4-5-1994.

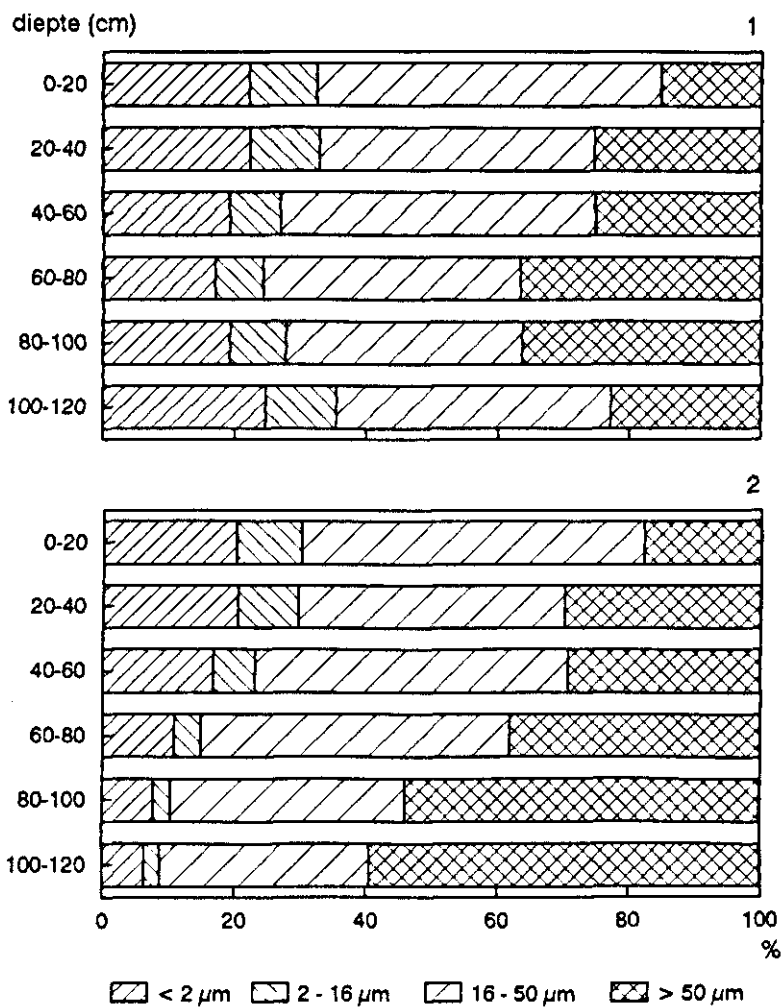
Plek	Diepte (cm)	Korrelgrootteverdeling (%)				% CaCO ₃	pH-KCl
		<2 µm	-16 µm	-50 µm	>50 µm		
1	0- 20	22.2	10.2	52.4	15.2	6.5	7.1
	20- 40	22.3	10.6	41.9	25.2	5.1	7.1
	40- 60	19.2	7.7	48.0	25.1	9.9	7.3
	60- 80	17.0	7.3	39.2	36.5	2.7	7.3
	80-100	19.3	8.5	36.0	36.2	2.8	7.3
	100-120	24.7	10.8	41.8	22.7	3.1	7.2
2	0- 20	20.2	9.9	52.2	17.7	7.0	7.2
	20- 40	20.5	9.2	40.6	29.7	7.7	7.2
	40- 60	16.8	6.4	47.7	29.1	8.1	7.4
	60- 80	10.9	4.0	47.1	38.0	8.5	7.6
	80-100	7.8	2.6	35.7	53.9	9.7	7.8
	100-120	6.4	2.4	31.8	59.4	9.3	7.8

Plek	Diepte	% o.s.	% N-tot.	C/N	P-tot. ¹	P-water ²	bulkd. ³
1	0- 20	1.75	0.12	6	680	6	1.43 (1.00)
	20- 40	2.00	0.14	6	760	12	1.40 (1.30)
	40- 60	0.86	0.06	6	470	1	1.42
	60- 80	0.87	0.06	6	450	1	1.45
	80-100	0.74	0.05	6	510	2	1.55
	100-120	0.70	0.05	6	530	1	1.55
2	0- 20	1.74	0.11	6	910	12	1.39 (1.30)
	20- 40	1.36	0.09	6	800	7	1.45 (1.40)
	40- 60	0.80	0.06	5	480	1	1.43
	60- 80	0.48	0.03	6	380	2	1.37
	80-100	0.30	0.02	6	320	2	1.37
	100-120	0.26	0.01	(10)	310	1	1.37

¹ P-tot. = mg P per kg droge grond

² P-water = mg in water oplosbaar P per kg droge grond

³ bulkdichtheid: kg droge grond per liter, tussen haakjes afwijkende waarde voor januari 1995



Figuur 1. Korrelgrootteverdeling in zes bodemlagen van twee proefplekken (1 en 2) op De Rusthoeve.

De bodem van beide proefplekken is een goed ontwaterde kalkrijke zware zavel. Het belangrijkste verschil tussen de proefplekken is dat proefplek 1 een homogeen profiel heeft en proefplek 2 een aflopend profiel. Aflopend wil zeggen dat het kleigehalte in de ondergrond aanzienlijk lager is dan in de bovengrond. Dit lagere kleigehalte van proefplek 2, in vergelijking met de ondergrond van proefplek 1, gaat gepaard met een lager gehalte aan organische stof en P-totaal en een hoger gehalte aan kalk.

De bodem van beide proefplekken is bijzonder arm aan organische stof. De verschillende bodemlagen van proefplek 1 zijn matig tot uiterst humusarm, de lagen van proefplek 2 zijn zeer tot uiterst humusarm. Uit het lage gehalte aan organische stof volgt ook een laag gehalte aan totaal stikstof, de grond heeft een voor vruchtbare kleigronden normale C/N-verhouding.

De grond bevat veel fosfaat (P-totaal), dat echter door het hoge kalkgehalte zeer slecht oplosbaar is. De fosfaatbeschikbaarheid voor gewassen (P-water) is voldoende. De bulkdichtheid van de grond is normaal voor kleigronden met een goede bodemstructuur.

3.2. Denitrificatie

De monsternamen voor de bepaling van denitrificatiesnelheden heeft plaatsgevonden in het voorjaar (4 mei), in de zomer onder droge omstandigheden (20 juni), in de zomer onder relatief natte omstandigheden (13 september), in het najaar onder relatief droge omstandigheden (18 oktober) en in de winter onder natte omstandigheden (18 januari).

De gegevens van de metingen van de actuele en de potentiële denitrificatiesnelheid zijn weergegeven in bijlage 2. De gegevens zijn bovendien voor de lagen 0-40 cm diepte (alleen denitrificatie) en 40-120 cm diepte (denitrificatie en potentiële denitrificatie) samengevat in tabel 2 en voor denitrificatie in alle lagen in figuur 2.

Zoals duidelijk uit tabel 2 en figuur 2 blijkt waren de gemeten waarden voor de denitrificatie behoudens enkele uitzonderingen erg laag en was de ruimtelijke variatie (standaard afwijking) steeds groot.

De hoge waarde van de laag 40-60 cm van plek 1 op 4 mei werd veroorzaakt door één sterk afwijkende, zeer hoge waarneming; vandaar ook de zeer hoge standaardafwijking. Wel is hier een flink verlaagd zuurstofgehalte in de bodem gemeten, 14 %, wat er op wijst dat de afwijkende waarde waarschijnlijk geen toevallige uitschieter is. Ook de relatief hoge waarde van de laag 80-100 cm van plek 2 op 18 oktober werd veroorzaakt door één uitschieter. Hier is echter geen afwijkende waarde voor een factor die de denitrificatie kan beïnvloeden gevonden zodat een toevallig afwijkende waarde meer voor de hand ligt.

De zeer hoge waarden van de bovenste bodemlaag van beide plekken op 13 september zijn terug te voeren op drie factoren: een hoog gehalte aan verse organische stof, een hoog gehalte aan nitraat en een hoog vochtgehalte. Deze voor denitrificatie gunstige omstandigheden werden veroorzaakt door het onderwerken van de stoppels en het bemesten van de groenbemester met ammoniumnitraat eind augustus en de regenval van 30 mm op 12 september. De relatief hoge waarden voor de bovenste lagen van beide plekken in januari werden veroorzaakt door het onderploegen van een grote hoeveelheid organisch materiaal (groenbemester) in november en het hoge vochtgehalte van de grond in januari. Deze laatste waarden geven echter wel een overschatting van de werkelijke denitrificatiesnelheid omdat de genomen monsters zijn geïncubeerd bij 10 °C en niet bij de gemeten bodemtemperatuur van ongeveer 6 °C. De overschatting bedraagt ongeveer een factor 1,5 tot 2. In de tabel zijn niet-gecorrigeerde waarden vermeld.

De potentiële denitrificatiesnelheid was weliswaar gemiddeld duidelijk hoger dan de actueel gemeten denitrificatiesnelheid, maar was toch ook laag. Dit wijst er op dat de zuurstofaanvoer niet de belangrijkste beperkende factor was voor de denitrificatie, zodat ook bij een slechtere zuurstofvoorziening door veel regen of een hogere grondwaterspiegel geen hoge denitrificatiesnelheden in de ondergrond te verwachten zijn. Gezien de samenhang van de gemeten hogere denitrificatiesnelheden met een hoog vochtgehalte en ondergewerkte gewasresten, lijkt de omzetting van organische stof de belangrijkste bepalende factor. Deze omzetting verloopt het snelst bij een hoog vochtgehalte en zorgt dan voor zuurstofgebrek in de bodem op microschaal, terwijl de (gemeten) zuurstofvoorziening op macroschaal wel optimaal blijft.

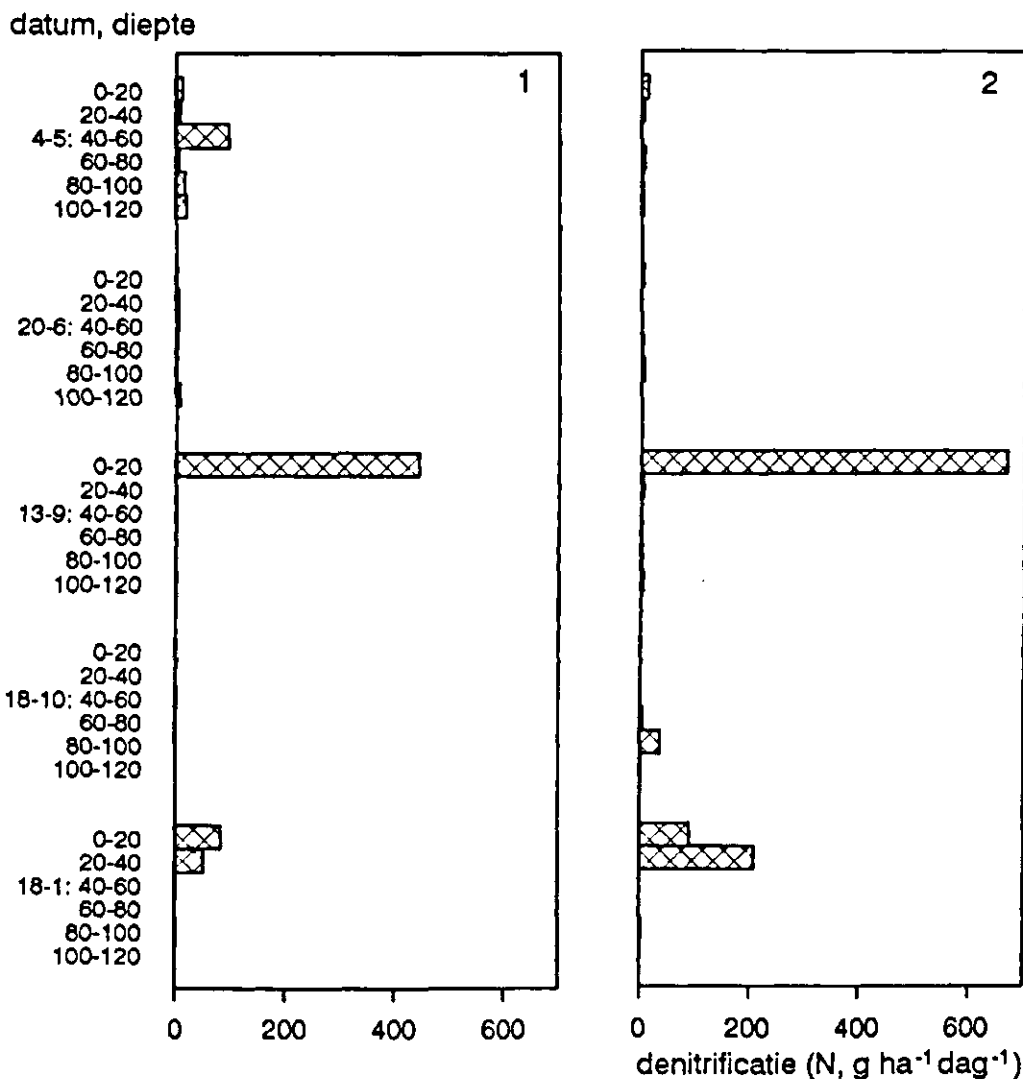
Door de grote variatie van de denitrificatie- en de potentiële denitrificatiesnelheid in de ruimte en in de tijd zijn maar weinig verschillen significant ($p < 0,05$). De denitrificatiesnelheid was op beide proefplekken significant hoger in de bovengrond (0-40 cm) dan in de ondergrond (40-120 cm). De denitrificatiesnelheid was op plek 1 niet significant hoger dan op plek 2; de potentiële denitrificatiesnelheid was op plek 1 echter significant lager dan op plek 2. Op plek 1 was de potentiële denitrificatiesnelheid dan ook niet significant hoger dan de denitrificatiesnelheid; op plek 2 was dat wel het geval. Voor de beide proefplekken gemiddeld was het verschil eveneens significant.

Tabel 2. Denitrificatie- en potentiële denitrificatiesnelheid (N, g.ha⁻¹.dag⁻¹) voor de boven- en ondergrond van twee proefplekken op De Rusthoeve, gemiddelde waarde en standaard afwijkingen N = 3).

Datum	Plek	Diepte	Denitrificatie		Potent. denitrificatie	
			gem.	st.afw.	gem.	st.afw.
4-5-1994	1	0- 40	22	2		
		40-120	145	148	125	67
	2	0- 40	20	24		
		40-120	16	11	43	12
20-6-1994	1	0- 40	9	5		
		40-120	17	6	76	45
	2	0- 40	7	5		
		40-120	13	9	63	39
13-9-1994	1	0- 40	446	464		
		40-120	2	--	31	--
	2	0- 40	674	41		
		40-120	14	2	459	-- (40-100cm)
18-10-1994	1	0- 40	2	--		
		40-120	4	--	118	--
	2	0- 40	4	2		
		40-120	43	42	--	--
18-1-1995	1	0-40	135	75		
		40-120	4	--	54	40
	2	0-40	302	196		
		40-120	7	3	50	27

Correlatieve verbanden tussen denitrificatiesnelheid of potentiële denitrificatiesnelheid en andere bodemparameters waren geen van alle significant.

Het kleine aantal metingen van de denitrificatiesnelheid maakt het slechts mogelijk om een jaarlijks verlies aan stikstof door denitrificatie te schatten in een orde van grootte. Wanneer uitschieters in de waarnemingen beperkt meegeschat worden kan de orde van grootte van het jaarlijkse stikstofverlies geschat worden op 25 kg.ha⁻¹ N voor de bovengrond en 10 kg.ha⁻¹ N voor de ondergrond. Het grootste deel van de denitrificatie in de bovengrond komt op rekening van de teelt en de bemesting van de groenbemesters; zonder deze teelt kan ook het stikstofverlies uit de bovengrond in de orde van 10 kg.ha⁻¹ N per jaar geschat worden.



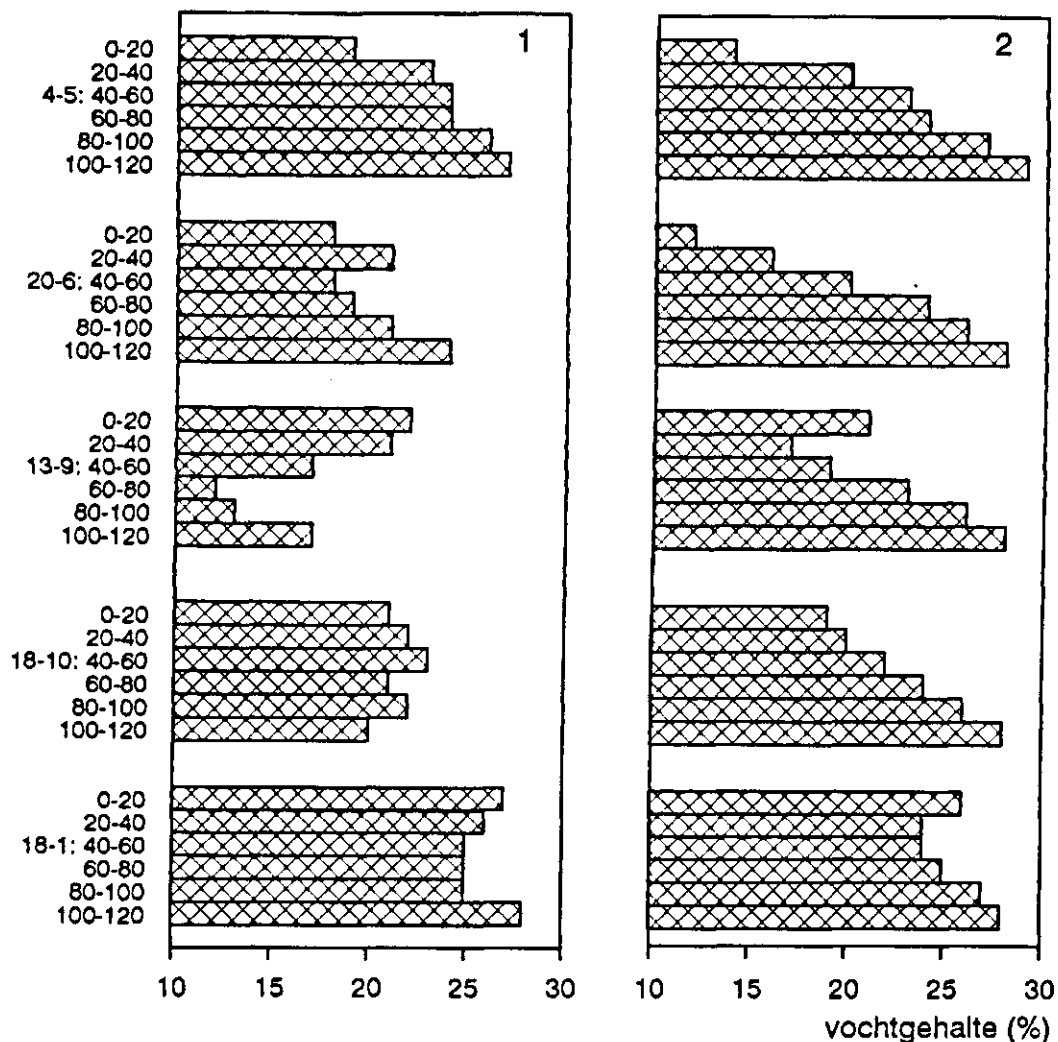
Figuur 2. Denitrificatiesnelheid in zes bodemlagen van twee proefplekken op de Rusthoeve.

De potentiële denitrificatiesnelheid lag gemiddeld ongeveer een factor vier hoger, het potentiële verlies aan stikstof zou dus in de orde van $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ per jaar moeten liggen. Gezien de goede zuurstofvoorziening van het hele bodemprofiel is echter een frequente realisatie van de potentiële denitrificatie niet waarschijnlijk. In erg natte perioden is wel een verhoogde grondwaterspiegel waargenomen, zodat dan ook tijdelijk de potentiële denitrificatiesnelheid gerealiseerd kan zijn. Deze perioden zijn echter altijd kort en kunnen het jaarlijkse verlies aan stikstof dan ook niet sterk verhogen.

3.3. Overige bodemparameters

De gemeten vochtgehalten, bodemtemperatuur en zuurstofgehalten zijn verzameld in tabel 3; de vochtgehalten zijn bovendien weergegeven in figuur 3. De hoeveelheden in de bodem aanwezige minerale stikstof en de gehalten aan wateroplosbare organische koolstofverbindingen zijn samengevat in tabel 4; de hoeveelheden minerale stikstof zijn bovendien voor ammonium- en nitraatstikstof afzonderlijk weergegeven in figuur 4. De op de monsterdata bepaalde grondwaterstanden zijn vermeld in tabel 5; een meer gedetailleerd verloop van de grondwaterstanden is weergegeven in figuur 5. De dagelijks op de proefboerderij gemeten neerslag is voor de proefperiode weergegeven in figuur 6.

datum, diepte



Figuur 3. Vochtgehalten van zes bodemlagen van twee proefplekken op De Rusthoeve.

Het vochtgehalte van de beide proefplekken volgde het bekende patroon: in het voorjaar droogde eerst de bovengrond uit en later ook in meerdere of mindere mate de ondergrond. In het najaar werd eerst de bovengrond weer vochtiger en daarna het gehele profiel. Het erg hoge vochtgehalte van de bovengrond in september werd veroorzaakt door de recente regen, die nog niet over het profiel verdeeld was.

Tussen de beide plekken zijn enkele duidelijke verschillen waargenomen. Op plek twee was de bovengrond in mei en vooral in juni sterker uitgedroogd dan op plek 1, maar de ondergrond was in juni en vooral in september juist veel minder sterk uitgedroogd. Deze verschillen zijn een gevolg van de gewaskeuze, graszaad groeit en verdampt vroeger in het jaar en wortelt minder diep dan wintertarwe.

De grondwaterstand stond in de winter en het vroege voorjaar ongeveer op draindiepte en in natte perioden wat hoger. Na veel regen kan het grondwater korte tijd hoger staan. In de zomer daalde de grondwaterstand; op plek 1 was deze daling veel groter dan op plek 2. Dit kan veroorzaakt zijn door de grotere wateronttrekking door de wintertarwe, maar ook zou een kleinere aanvulling van het grondwater met kwelwater door het hogere kleigehalte van de ondergrond hierbij van belang kunnen zijn.

Tabel 3. Vochtgehalte, bodemtemperatuur en zuurstofgehalte in zes bodemlagen van twee proefplekken op De Rusthoeve.

Datum	Laag	Plek		Plek		Plek	
		1	2	1	2	1	2
		vochtgehalte (%)		bodemtemperatuur (°C)		zuurstofgehalte (%)	
4-5-94	0- 20	19	14	11.7	12.0	21	21
	20- 40	23	20	13.1	12.1	18	21
	40- 60	24	23	11.6	11.1	14	19
	60- 80	24	24	10.7	10.4	18	20
	80-100	26	27	9.8	9.7	--	--
	100-120	27	29	9.7	9.7	19	20
	inc.tem. ¹			10	10		
20-6-94	0- 20	18	12	16.1	17.3	niet bepaald	
	20- 40	21	16	14.9	15.5		
	40- 60	18	20	13.4	13.8		
	60- 80	19	24	13.0	13.6		
	80-100	21	26	12.1	12.7		
	100-120	24	28	12.2	12.6		
	inc.tem. ¹			14	14		
13-9-94	0- 20	22	21	16.1	17.9	> 20	> 20 ²
	20- 40	21	17	15.5	16.2	> 20	> 20
	40- 60	17	19	14.9	15.5	> 20	> 20
	60- 80	12	23	15.4	16.0	> 20	> 20
	80-100	13	26	15.1	15.8	> 20	> 20
	100-120	17	28	15.5	16.2	> 20	> 20
	inc.tem. ¹			16	16		
18-10-94	0- 20	21	19	11.5	10.6	20	21
	20- 40	22	20	11.4	11.0	19	21
	40- 60	23	22	11.5	11.8	19	20
	60- 80	21	24	12.1	12.5	19	20
	80-100	22	26	12.1	12.4	17	20.5
	100-120	20	28	12.7	13.1	16	19.5
	inc.tem. ¹			12	12		
18-1-95	0- 20	27	26	6.5	6.5	21	21
	20- 40	26	24	6.3	6.4	21	21
	40- 60	25	24	5.6	5.8	19	21
	60- 80	24	25	6.3	6.4	21	20
	80-100	25	26	6.5	6.4	20	20.5
	100-120	29	28	6.8	7.1	14	water
	inc.tem. ¹			10	10		

¹ inc.tem. = incubatietemperatuur

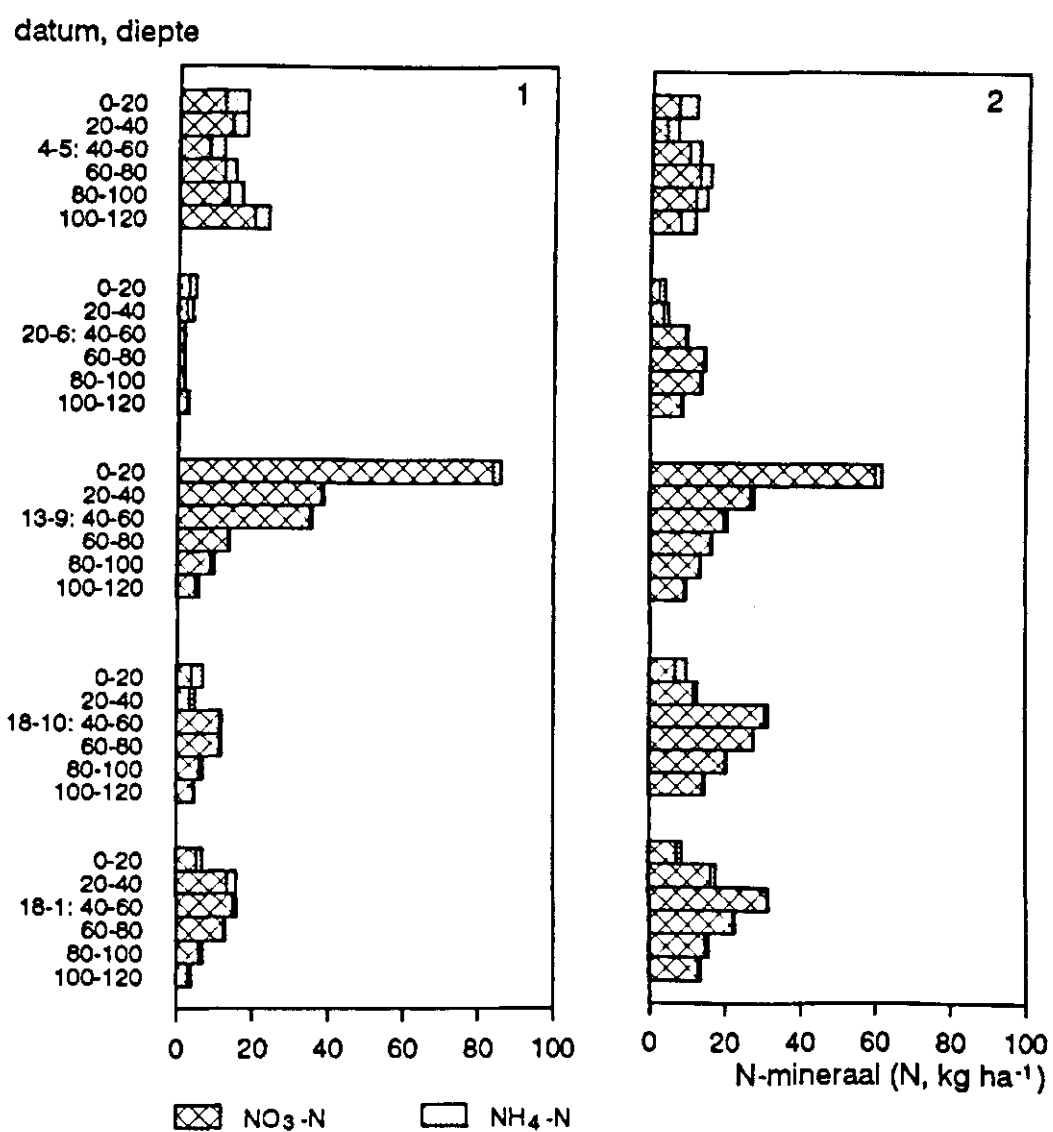
² door instabiliteit van de meter was geen nauwkeuriger meting mogelijk

Tabel 4. Hoeveelheid minerale stikstof en gehalte aan oplosbaar organisch koolstof in zes bodemlagen van twee proefplekken op De Rusthoeve.

Datum	Laag	Plek		Plek	
		1 N-min (kg ha ⁻¹)	2	1 TOC (mg kg ⁻¹)	2
4-5-94	0- 20	17	12	400	360
	20- 40	18	7	445	370
	40- 60	12	13	435	365
	60- 80	17	17	405	405
	80-100	14	14	395	325
	100-120	<u>24</u>	<u>13</u>	435	390
	totaal	101	76		
20-6-94	0- 20	5	4	380	345
	20- 40	3	5	490	380
	40- 60	2	10	450	375
	60- 80	2	16	435	355
	80-100	2	12	400	340
	100-120	<u>3</u>	<u>9</u>	365	365
	totaal	17	57		
13-9-94	0- 20	88	61	400	380
	20- 40	37	28	380	355
	40- 60	36	21	420	400
	60- 80	13	17	360	400
	80-100	9	13	320	375
	100-120	<u>5</u>	<u>10</u>	320	385
	totaal	189	150		
18-10-94	0- 20	7	10	385	390
	20- 40	5	13	405	350
	40- 60	11	32	385	375
	60- 80	11	29	350	340
	80-100	7	19	340	345
	100-120	<u>5</u>	<u>15</u>	355	350
	totaal	47	117		
18-1-95	0- 20	11	10	375	340
	20- 40	16	18	395	400
	40- 60	16	31	390	340
	60- 80	13	24	340	335
	80-100	7	15	335	325
	100-120	<u>4</u>	<u>15</u>	340	330
	totaal	66	112		

Tabel 5. Grondwaterstanden van twee proefplekken op De Rusthoeve.

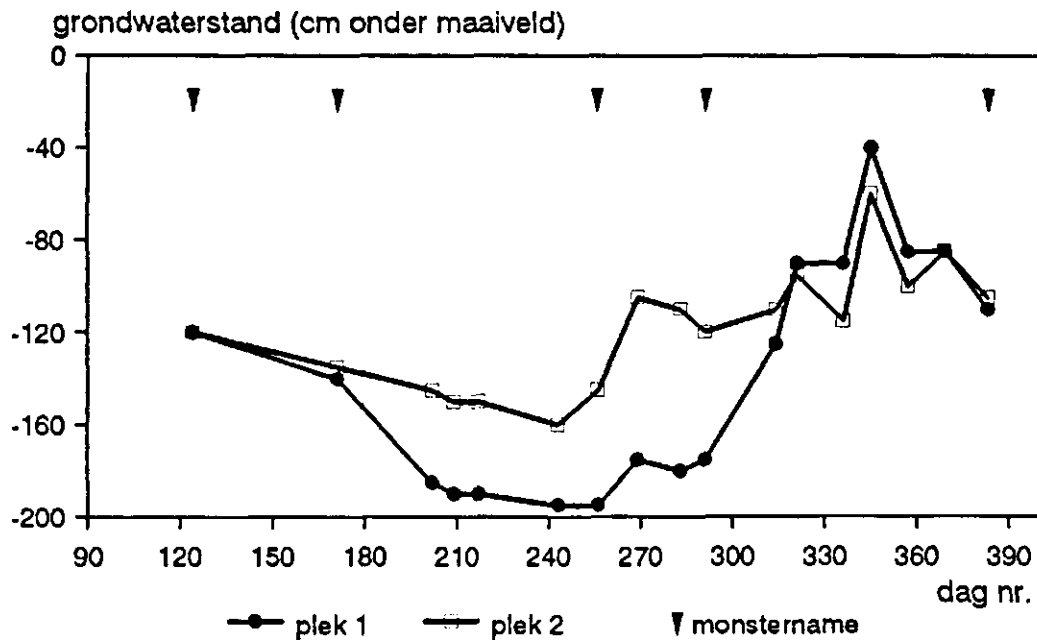
Datum	Grondwaterstand cm beneden maaiveld op plek	
	1	2
4- 5-94	120	120
20- 6-94	140	135
13- 9-94	190	145
18-10-94	170	120
18- 1-95	110	105



Figuur 4. Hoeveelheden minerale stikstof (NO₃-N en NH₄-N) in zes bodemlagen van twee proefplekken op De Rusthoeve.

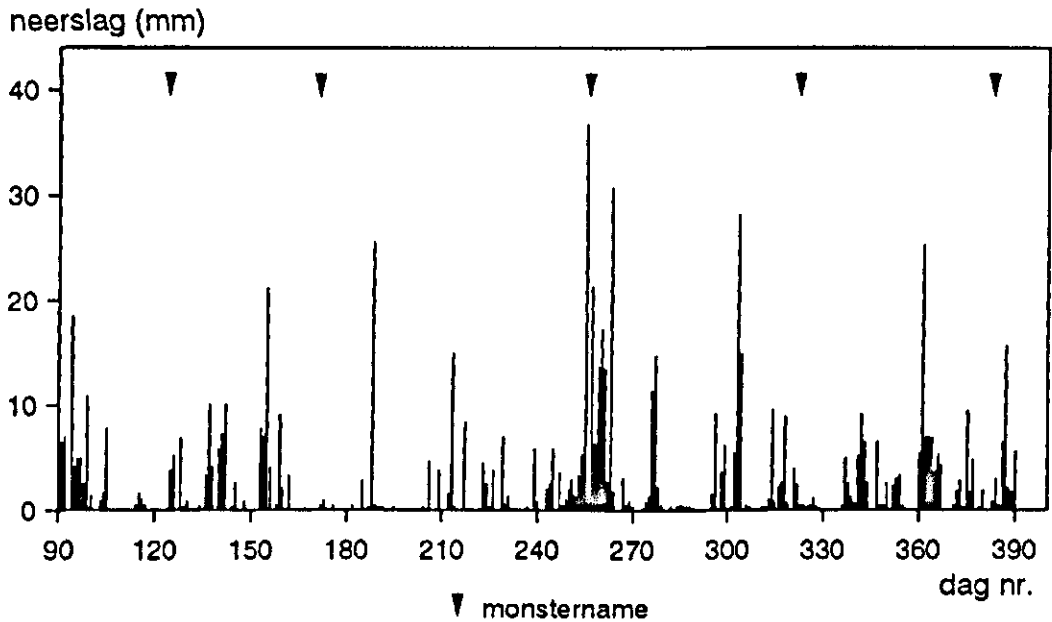
De bodemtemperatuur volgde de normale jaarlijkse cyclus, waarbij de ondergrond later in het seizoen opwarmt en weer afkoelt dan de bovengrond. Omdat niet is gemeten in echt warme of koude perioden zijn alleen gematigde temperaturen gemeten en was er nooit sprake van een grote temperatuurgradiënt over de diepte. Hierdoor week de incubatietemperatuur ook nooit sterk af van de werkelijk gemeten temperatuur in een bodemlaag. Bij de incubatie in januari is bewust afgeweken van de gemeten temperatuur om niet het risico te lopen dat de gemeten denitrificatie te sterk door de temperatuur geremd werd.

Het gemeten zuurstofgehalte is het zuurstofgehalte van de lucht die in de macroporen van de grond aanwezig is. Het in vrijwel elke bodemlaag constant hoge zuurstofgehalte geeft aan dat de grond van beide proefplekken een zeer goede structuur heeft, zodat het verticale luchttransport weinig weerstand ondervindt. Ook 1 dag na 30 mm regen (13 september) was er geen sprake van belangrijk dalende zuurstofgehalten. Dat het zuurstofgehalte in de ondergrond steeds hoog was zal behalve door de goede bodemstructuur mede veroorzaakt zijn door het zeer lage gehalte aan organische stof, zodat vrijwel alle zuurstofverbruik op rekening komt van ingewerkte verse gewasresten en afgestorven wortels.



Figuur 5. Verloop van de grondwaterstand op twee proefplekken op De Rusthoeve.

Ondanks het lagere vochtgehalte was vooral in september het zuurstofgehalte in de ondergrond in plek 1 lager dan in plek 2. Dit kan veroorzaakt zijn door de hogere bulkdichtheid (kleiner poriënvolume, meer weerstand), door het wat hogere gehalte aan organische stof en de aanwezigheid van recent afgestorven wortels. Waarom in voorjaar en winter juist in de laag 40-60 cm van plek 1 een lager zuurstofgehalte is gemeten dan in de onderliggende laag is niet duidelijk.



Figuur 6. Neerslag op De Rusthoeve.

Bij denitrificatie wordt nitraat omgezet. In deze paragraaf wordt echter steeds gesproken over minerale stikstof, de som van ammonium- en nitraatstikstof. In neutrale en basische kleigronden wordt met bemesting gegeven of door mineralisatie vrijgekomen ammonium snel omgezet in nitraat en de in de proefplekken aanwezige hoeveelheid minerale stikstof bestond dan ook vrijwel altijd voor meer dan 80% uit nitraatstikstof (figuur 4). Hierdoor is minerale stikstof toch een betrouwbare maat voor de directe beschikbaarheid van nitraat voor denitrificatie en is het bovendien een goede maat voor het op korte termijn beschikbare nitraat.

Proefplek 1 is in 1994 vier keer met kunstmeststikstof bemest, op 14 februari ($100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$), op 29 april ($67,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$), op 30 mei ($54 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) en op 24 augustus ($67,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$). Op 4 mei was al een groot deel van de op 29 april gegeven stikstof door het gewas opgenomen, maar was in de ondergrond nog vrij veel minerale stikstof aanwezig. Deze stikstof was waarschijnlijk voor een belangrijk deel afkomstig van de eerste bemesting en in het natte voorjaar uitgespoeld naar de ondergrond. Op 20 juni was praktisch alle beschikbare stikstof door het gewas opgenomen.

Op 13 september was de gevonden hoeveelheid minerale stikstof erg hoog; naast de bemesting van eind augustus moet in de zomer ook veel stikstof gemineraliseerd zijn. Dat ook veel minerale stikstof gevonden werd in de laag 20-60 cm wijst op uitspoeling. Dit is mogelijk omdat de regenval geconcentreerd was op een klein aantal dagen en het regenwater dan via scheuren in de vrij droge grond gemakkelijk deze diepte heeft kunnen bereiken. Op 18 oktober was de gevonden hoeveelheid minerale stikstof erg laag. Het is niet goed denkbaar dat het groenbemestingsgewas alle verdwenen stikstof ($\pm 140 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$) heeft opgenomen. Door de grote regenval in de tweede helft van september kan stikstof uitgespoeld zijn, maar verwacht mag worden dat dan een deel van de uit de bovengrond uitgespoelde stikstof in de ondergrond teruggevonden zou zijn. Tussen oktober en januari is door verdere mineralisatie de hoeveelheid minerale stikstof weer wat groter geworden.

Proefplek 2 is in 1994 maar twee keer met kunstmeststikstof bemest, op 14 februari ($143 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$) en op 30 augustus ($67,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$). Op 4 mei was het grootste deel van de in de winter gegeven stikstof al door het gewas opgenomen. In de periode tot 20 juni is vrijwel alleen nog uit de bovenste bodemlaag stikstof opgenomen; door de ondiepe beworteling liet het graszaad aanzienlijk meer minerale stikstof achter in de bodem dan de wintertarwe. Op 13 september was ook op plek 2 meer minerale stikstof aanwezig dan op grond van de bemesting alleen verwacht was, maar wel duidelijk minder dan op plek 1. Ook hier lijkt uitspoeling van stikstof uit de bovenste laag naar diepere lagen waarschijnlijk. Op 18 oktober lijkt op plek 2 de aanwezige hoeveelheid minerale stikstof niet meer gedaald dan door de gewasopname verklaard zou kunnen worden en is wel een duidelijke verplaatsing van minerale stikstof naar de diepere bodemlagen waarneembaar. Tussen oktober en januari is de hoeveelheid minerale stikstof niet veranderd en moeten mineralisatie en uitspoeling elkaar in evenwicht hebben gehouden.

Als norm waarbij geen overmatige uitspoeling verwacht zou kunnen worden circuleert wel het getal van $70 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ minerale stikstof in de bodemlaag 0-100 cm in het najaar (Goossens & Meeuwissen, 1990). Proefplek 1 voldoet op 18 oktober ruim aan deze norm, ondanks de stikstofbemesting van de groenbemester. Proefplek 2 voldoet niet aan deze norm, waarschijnlijk doordat het gewas de dieper in het profiel aanwezige stikstof niet heeft opgenomen. Op deze plek was achterwege laten van de bemesting van de groenbemester mogelijk voldoende geweest om ook aan de norm te voldoen.

De gevonden gehalten aan water-oplosbare organische koolstofverbindingen lagen op beide proefplekken voor alle bodemlagen en alle monstertijdstippen vrijwel op gelijk niveau. Er is geen verband waargenomen tussen het gehalte aan deze stoffen en denitrificatie of enige andere bodemparameter. Waarschijnlijk verloopt de omzetting van verse organische stof (gewasresten) zo snel dat de hoeveelheid oplosbare verbindingen niet meetbaar oploopt en bestaan de oplosbare verbindingen voor het grootste deel uit moeilijk afbreekbare stoffen.

4. Discussie

Ondanks het kleine aantal waarnemingen in dit onderzoek tekent zich toch een duidelijk algemeen beeld af van de denitrificatie en de voor denitrificatie beperkende factoren in de proefplekken.

Hoge denitrificatiesnelheden hingen steeds samen met de afbraak van ingewerkte gewasresten of groenbemesting, waarbij ook een niet te laag vochtgehalte, aanwezigheid van nitraat en een niet te lage temperatuur noodzakelijk zijn. Denitrificatie vindt dus plaats in nazomer, najaar en zachte perioden in de winter en, afhankelijk van gewas, grondbewerking en weer, eventueel ook in het voorjaar. Gewas en grondbewerking bepalen de beschikbaarheid van afbreekbare organische stof; regen bepaalt vooral in de nazomer het vochtgehalte van de grond en in de winter is meestal de temperatuur van doorslaggevend belang. In het voorjaar zal denitrificatie belangrijker zijn naarmate gewasresten, groenbemester of organische mest in het najaar later ingewerkt zijn en de winter kouder is geweest, omdat er dan in het voorjaar meer organisch materiaal beschikbaar is.

In beide proefplekken was de denitrificatiesnelheid in de bodemlagen onder de bouwvoor steeds laag of zeer laag, op het eerste gezicht als gevolg van de goede zuurstofvoorziening. De potentiële denitrificatiesnelheid, gemeten bij incubatie onder stikstof, was echter niet veel hoger zodat ook de beschikbaarheid van organische stof sterk beperkend zal zijn. De beschikbaarheid van nitraat is vrijwel altijd voldoende geweest voor een optimale denitrificatiesnelheid.

Duidelijk hogere denitrificatiesnelheden in kleigronden zijn alleen daar te verwachten waar òf de zuurstofvoorziening in de bovengrond veel slechter is òf in de ondergrond de zuurstofvoorziening slechter is èn de beschikbaarheid van organische stof beter is. Een slechtere zuurstofvoorziening is te verwachten in verslempende gronden, in gronden met een slechte structuur in of onder de bouwvoor en in gronden met een (veel) hoger grondwaterpeil. Een betere beschikbaarheid van organische stof is te verwachten in gronden waar meer organisch materiaal wordt aangevoerd, b.v. door organische bemesting en in grasland, en in gronden met een hoger gehalte aan organische stof.

Het totale stikstofverlies door denitrificatie werd geschat in de orde van $20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$ zonder stikstofbemesting van de groenbemesters; dit is ongeveer 10% van de aangevoerde stikstof. Met inbegrip van de stikstofbemesting van de groenbemesters werd het stikstofverlies door denitrificatie globaal $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$ hoger geschat; dit is naar schatting 20% van deze bemesting. De groenbemester werd met stikstof bemest om in korte tijd een grote hoeveelheid organisch materiaal te kunnen produceren. Groenbemesters die worden geteeld voor het verlagen van de nitraatuitspoeling worden uiteraard niet met stikstof bemest; over het effect van deze teelten op de denitrificatie is geen onderzoek bekend.

Grotere stikstofverliezen door denitrificatie uit bouwland op kleigrond zijn wel bekend uit de literatuur. Colbourn & Dowdell (1984) rapporteren in een overzichtsartikel verliezen tot 30% van de stikstofaanvoer. Verliezen groter dan 10% van de aanvoer bleven echter beperkt tot gronden met een slechte ontwatering of met een hoge weerstand voor zuurstoftransport door het ontbreken van grondbewerking. In de meeste gevallen waren alleen de stikstofverliezen uit de bouwvoor gemeten, zodat de totale verliezen wat groter geweest kunnen zijn.

De kwantitatieve bijdrage van denitrificatie aan de stikstofbalans was voor beide proefplekken gering. Deze bijdrage kan onder andere omstandigheden wel groter zijn, maar voor een groot deel van de kleigronden onder bouwland zal zij niet veel groter zijn.

Voor kleigronden onder grasland zou de bijdrage in veel meer gevallen duidelijk groter kunnen zijn. Kleigronden onder grasland hebben een grotere aanvoer van organisch

materiaal en hebben door de ontbrekende grondbewerking meer weerstand voor zuurstoftransport.

Het deel van de bodemkolom waar denitrificatie plaatsvindt was voor beide proefplekken vrijwel beperkt tot de bewerkingsdiepte. De tarwe- en graszaadstoppel waren ondiep ingewerkt zodat in september alleen in de laag 0-20 cm een hoge denitrificatiesnelheid gemeten werd. De groenbemesters zijn dieper ingeplougd zodat in januari ook in de laag 20-40 cm een verhoogde denitrificatiesnelheid gemeten kon worden.

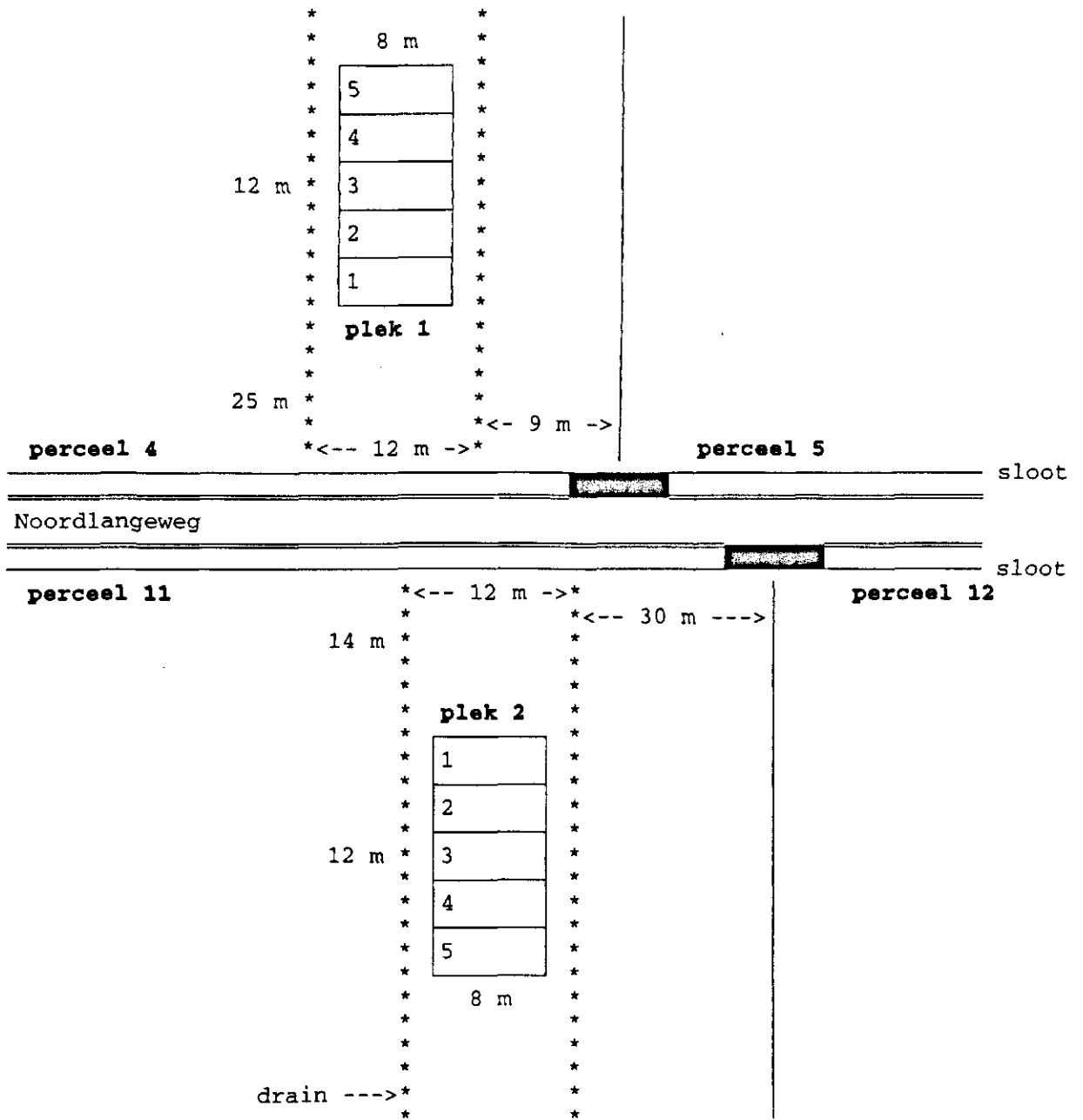
De factoren die in de bodem de denitrificatiesnelheid bepalen waren voor beide proefplekken in volgorde van afnemende belangrijkheid: beschikbaarheid van organische stof, vochtgehalte en temperatuur. Nitraat lijkt bij geen van de metingen beperkend te zijn geweest en de zuurstofvoorziening zal in alle gevallen in gelijke mate beperkend zijn geweest. Een laatste voor denitrificatie belangrijke bodemparameter, de pH, was in beide proefplekken optimaal voor denitrificatie. In het algemeen is te verwachten dat in gronden onder bouwland de beschikbaarheid van organische stof de belangrijkste beperkende factor zal zijn.

Het effect van een ingreep in het peilbeheer op de denitrificatie is naar verwachting niet groot. De potentiële denitrificatiesnelheid was niet veel hoger dan de denitrificatiesnelheid en de grondwaterstand stond een belangrijk deel van het jaar onder de draandiepte. Een duidelijk effect van peilverhoging op de denitrificatie is wel mogelijk en is bijvoorbeeld ook indirect gevonden in Amerikaans onderzoek. Gilliam et al. (1979) vonden op een zavelgrond een ongeveer 20% lager nitraatgehalte in het drainwater bij een periodiek verhoogd slootpeil dan bij een constant laag slootpeil. Modelberekeningen voor andere bodemtypen leverden vergelijkbare verschillen op (Deal et al., 1986). In deze proeven kon het slootpeil echter per perceel geregeld worden en wanneer geen gewas op een perceel stond en het perceel niet bereiden hoefde te worden werd een slootpeil tussen 30 en 45 cm beneden maaiveld ingesteld. Op grotere schaal is een dergelijke ingreep in het peilbeheer niet realiseerbaar en is ook minder effect op de denitrificatie te verwachten.

Een beperkte verhoging van het slootpeil zal bij onveranderde draandiepte tot gevolg hebben dat de verblijftijd van het water in de bodem en in de sloot langer wordt. In de bodem is hiervan zoals gezegd niet veel effect op de denitrificatie te verwachten, maar in de sloot is door de aanvoer van vers organisch materiaal uit water- en oeverplanten een groter effect op de denitrificatie mogelijk.

Literatuur

- Colbourn, P. & R.J. Dowdell, 1984. Denitrification in field soils. *Plant and Soil* 76: 213-226.
- De Bakker, H. & J. Schelling, 1966. *Systeem van bodemclassificatie voor Nederland*. Pudoc, Wageningen, 217 pp.
- Deal, S.C., J.W. Gilliam, R.W. Skaggs & K.D. Konyha, 1986. Prediction of nitrogen and phosphorus losses as related to agricultural drainage system design. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 18: 37-51.
- Gilliam, J.W., R.W. Skaggs & S.B. Weed, 1979. Drainage control to reduce nitrate loss from agricultural fields. *Journal of Environmental Quality* 8: 137-142.
- Goossensen, F.R. & P.C. Meeuwissen, 1990. *Advies van de Commissie Stikstof*. DLO, Wageningen, 93 pp.
- Hoekstra, J.R. & A.A. van de Straat, 1994. *Projektplan praktijkproef nutriëntenbalans*. Provincie Zeeland, directie Milieu en Waterstaat, 26 pp.
- Rappoldt, C., J.A. de Vos & W.J. Corré, 1995. Anaërobie in de bodem in relatie tot denitrificatie. *Jaarverslag 1994*. AB-DLO, Wageningen/Haren, pp. 38-41.
- Ruijgh, E.F.W., H.J. Gerrits, A.M. de Leeuw & M.A. Menke, 1993. *Analyse van nutriëntenbelasting van het Veersche meer vanuit de omliggende polders*. Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 125 pp.
- Ryden, J.C., J.H. Skinner & D.J. Nixon, 1987. A soil core incubation system for the field measurement of denitrification using acetylene-inhibition. *Soil Biology and Biochemistry* 19: 753-757.
- Vierveijzer, H.C., A. Lepelaar & J. Dijkstra 1979. *Analysemethoden voor grond, rioolslib, gewas en vloeistof*. IB-DLO, Haren, 261 pp.



BIJLAGE 2

Denitrificatie- en potentiële denitrificatiesnelheid (N, g.ha⁻¹.dag⁻¹) in zes bodemlagen van twee proefplekken op De Rusthoeve.

Datum	Plek	Diepte	Denitrificatie		Potent. denitrif.		
			gem.	st.afw.	gem.	st.afw.	
4-5-1994	1	0- 20	13	2			
		20- 40	9	3			
		40- 60	98	161	42	49	
		60- 80	7	5	24	10	
		80-100	20	13	48	46	
		100-120	20	18	10	7	
	2	0- 20	14	22			
		20- 40	6	1			
		40- 60	2	3	3	1	
		60- 80	7	8	18	10	
		80-100	3	2	9	3	
		100-120	4	4	14	16	
	20-6-1994	1	0- 20	3	2		
			20- 40	6	5		
40- 60			4	4	4	4	
60- 80			3	2	7	0	
80-100			2	0	13	9	
100-120			8	3	52	51	
2		0- 20	5	3			
		20- 40	2	1			
		40- 60	1	1	10	3	
		60- 80	3	4	8	6	
		80-100	7	8	16	19	
		100-120	2	0	29	39	
13-9-1994		1	0- 20	445	463		
			20- 40	1	1		
	40- 60		2	1	21	22 (2)*	
	60- 80		0	0	4	3 (2)	
	80-100		0	0	2	1	
	100-120		1	1	4	4	
	2	0- 20	670	40			
		20- 40	5	5			
		40- 60	2	0	333	450 (2)	
		60- 80	3	2	39	44	
		80-100	4	5	87	116 (2)	
		100-120	5	4	--	--	

Datum	Plek	Diepte	Denitrificatie		Potent. denitrif.		
			gem.	st.afw.	gem.	st.afw.	
18-10-1994	1	0- 20	2	1			
		20- 40	1	1			
		40- 60	2	1	64	37	
		60- 80	1	1	30	-- (1)	
		80-100	1	1	15	-- (1)	
		100-120	1	1	9	10 (2)	
	2	0- 20	3	2			
		20- 40	1	1			
		40- 60	2	0	--		
		60- 80	6	8	--		
		80-100	32	45	--		
		100-120	2	0	--		
	18-1-1995	1	0- 20	83	60		
			20- 40	52	17		
40- 60			1	1	8	10	
60- 80			1	1	10	11	
80-100			1	1	3	2	
100-120			1	1	34	27	
2		0- 20	93	83			
		20- 40	209	117			
		40- 60	2	1	17	15	
		60- 80	1	1	21	14	
		80-100	3	4	8	7	
		100-120	1	1	4	3	

* Afwijkend aantal herhalingen tussen haakjes.