



WAGENINGEN UR

For quality of life

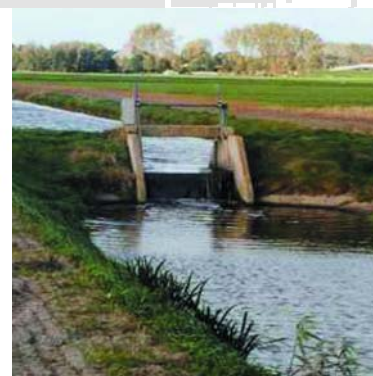
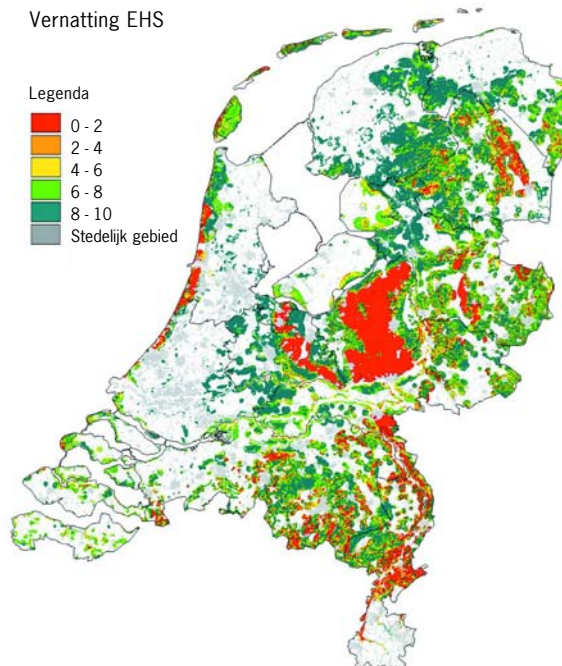
Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden

Syntheserapport

J.A. de Vos
O.A. Clevering
F.P. Sival

Vernatting EHS

Legenda



Alterra-rapport 1393, ISSN 1566-7197

Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van
landbouwgronden

Syntheserapport

Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden

Syntheserapport

J.A. de Vos ¹⁾

O.A. Clevering ²⁾

F.P. Sival ¹⁾

¹⁾ Alterra, Wageningen

²⁾ PPO- Akkerbouw, Groene Ruimte en Vollegrondsgroente, Lelystad

Alterra-rapport 1393

Alterra, Wageningen, 2006

REFERAAT

Vos, J.A. de, O.A. Clevering en F.P. Sival, 2006. *Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden; Syntheserapport*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1393. 54 blz.; 15 fig.; 11 tab.; 33 ref.

Uit onze analyse blijkt dat 675.000 ha van de netto-Ecologische Hoofdstructuur kan worden vernat, met mogelijke gevolgen voor 529.00 ha landbouwgrond binnen de EHS. Uit veldexperimenten blijkt dat een grondwaterstandverhoging van 110 (normaal peil) naar 75 cm-mv (hoog peil) op akkerbouwland geen effect heeft op de opbrengsten en productkwaliteit. Deze vernatting resulteerde wel in lagere N-afvoer en hogere P-afvoer met het gewas. Bij het hoge peil werden lagere nitraat-N en hogere totaal-P concentraties in het grondwater gevonden. Bij het normale peil zijn NO₃-concentraties ca. 100 mg/l. Er vindt nauwelijks PO₄-P-uitspoeling plaats. Subirrigatie van 250-330 mm water per jaar leidde in 2003 tot 80 mm minder beregening. De waterkwaliteit van infiltrerend oppervlaktewater is sterk bepalend voor nutriëntenconcentraties in het grondwater. Met een door ons aangepast waterkwaliteitsinstrumentarium kunnen nitraatconcentraties in het grondwater, de N- en P-afvoer en de N- en P-concentraties naar het oppervlaktewater op regionale schaal berekend worden.

Trefwoorden: waterbeheer, nitraatuitspoeling, gewasopbrengsten, subirrigatie

ISSN 1566-7197

Kosten Alterra-rapport 1393: € 30,-.

Dit rapport is digitaal beschikbaar via www.alterra.wur.nl. Een gedrukte versie van dit rapport, evenals van alle andere Alterra-rapporten, kunt u verkrijgen bij Uitgeverij Cereales te Wageningen (0317 46 66 66). Voor informatie over voorwaarden, prijzen en snelste bestelwijze zie www.boomblad.nl/rapportenservice

© 2006 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veeleelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Ecologische Hoofdstructuur	11
1.2 Verdroging en vernatting	12
1.3 Vernatting in en rond de Ecologische Hoofdstructuur	13
1.4 Milieukundige en agronomische gevolgen van vernatting	14
1.5 Beleid op gebied van landbouw, water, milieu en natuur	17
1.6 Onderzoeksvragen	18
1.7 Leeswijzer	19
2 Veldexperimenten	21
2.1 Veldexperimenten Vredepeel en Veulen 2000-2004	21
2.1.1 Gewasopbrengsten en nutriëntenopname	22
2.1.2 N- en P-concentraties in grondwater	23
2.2 Veldexperimenten Vredepeel 2003-2005	26
2.2.1 Gewasopbrengsten en nutriëntenopname	27
2.2.2 P-toestand van de bodem	28
2.2.3 Grondwaterstanden, drainage en infiltratie	29
2.2.4 N- en P-concentraties in drainage- en infiltratiewater	32
2.2.5 Water- en nutriëntenbalansen	34
2.2.6 Milieukundige gevolgen vernatting	37
3 Vernattingsinstrumentarium	39
3.1 Evaluatie bestaande modellen nutriëntenverliezen	39
3.2 Waterkwaliteitsinstrumentarium vernatting landbouwgronden	41
3.3 Nutriëntenverliezen bij vernatting van zand-, veen- en kleigrond	42
3.4 Toepasbaarheid vernattingsinstrumentarium	47
4 Conclusies	49
4.1 Vernatting in en rond de Ecologische Hoofdstructuur	49
4.2 Veulen en Vredepeel 2000-2004	49
4.3 Vredepeel 2003-2005	49
4.4 Vernattingsinstrumentarium	51
Literatuur	53

Woord vooraf

Het herstel van natuurgebieden door anti-verdrogingsmaatregelen (vernatting) zal ook gevolgen hebben voor de omliggende landbouwgronden. Naast agronomische gevolgen kan vernatting van landbouwgrond van invloed zijn op de uitspoeling van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater. Ook door klimaatverandering, zeespiegelstijging en bodemdaling kunnen per saldo nattere omstandigheden ontstaan. In de toekomst zullen door de implementatie van de Kaderrichtlijn Water naar verwachting strengere normen gaan gelden voor nutriëntenconcentraties in het oppervlaktewater. Belangrijk is daarom inzicht te krijgen in hoeverre vernatting deze concentraties beïnvloedt.

In Nederland zijn maar weinig studies uitgevoerd waarbij de milieukundige (nutriëntenemissie) en agronomische gevolgen van peilverhoging zijn bepaald. J. Alblas (PPO-AGV) is in 2000 gestart met vernattingsexperimenten op proefboerderij Vredepeel en op een perceel te Veulen (Limburg). In 2003 hebben Alterra en PPO-AGV de experimenten op proefboerderij Vredepeel (Limburg) uitgebreid met een N- en P-trappenproef en extra waterkwaliteitsmetingen, om zo experimentele gegevens te verzamelen over vernatting van landbouwgronden. Deze experimenten hadden als doel om de ideeën die er leefden rond de effecten van vernatting op nutriëntenverliezen te onderbouwen, en waren onderdeel van het project “Kwantificering van de invloed van de waterhuishouding op stikstof- en fosfaatverliezen” in het LNV-Mest- en Mineralen-programma van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselveiligheid (Programma 389-II).

Wij hebben voor de samenstelling van dit synthesesrapport gebruik gemaakt van de afstudeerrapportages van Bart van Rijn (2004) met betrekking tot de hydrologische analyse van het watersysteem te Vredepeel, en Bart-Jan Vreman (2005) met betrekking tot de ontwikkeling van het vernattingsinstrumentarium. Wij willen Bart en Bart-Jan nogmaals bedanken voor hun bijdrage aan dit project.

Samenvatting

Het Nationaal MilieubeleidsPlan 4 (NMP4, 2001) geeft aan dat 200.000 tot 300.000 ha landbouwgrond in de buurt van de Ecologische HoofdStructuur (EHS) zal moeten vernatten. Deze vernatting is bedoeld om natuurontwikkeling in verdroogde natuurgebieden mogelijk te maken en betekent een structurele peilverhoging gedurende een groot deel van het jaar. Daarnaast zullen klimaatverandering, zeespiegelstijging, bodemdaling en waterberging ook vaker leiden tot nattere situaties.

Het totale oppervlakte netto-EHS dat op dit moment in aanmerking komt voor vernatting is berekend op ruim 1,5 miljoen hectare. Circa 675.000 ha van de netto-EHS biedt goede mogelijkheden om vernat te worden. Daarnaast ligt ongeveer 529.000 hectare landbouwgrond binnen de netto-EHS en deze landbouw komt ook in aanmerking voor vernatting. De vraag is wat de gevolgen van vernatting zijn op de gewasopbrengsten en wat er met de nutriënten in de bodem gebeurt?

In de akkerbouwexperimenten op Veulen en Vredepeel in de periode 2000-2004 heeft vernatting geresulteerd in een gemiddelde grondwaterstandsverhoging gedurende het groeiseizoen van circa 110 naar 75 cm-mv. Bij stikstofbemesting volgens advies had deze vernatting geen effect op de opbrengsten en productkwaliteit. Deze vernatting leidde gemiddeld tot 6 kg/ha lagere N-afvoer en 0,5 kg/ha hogere P-afvoer met het gewas. Er werd daarbij 7 kg/ha minder N_{min} in de bodemlaag 0-90 cm teruggevonden, evenredig verdeeld over de bodemlagen. Bij het normale peil werd een gemiddelde (Vredepeel en Veulen, 2000-2004) NO₃-concentratie in het bovenste grondwater gevonden van 124 mg NO₃/l en bij hoog peil van 66 mg NO₃/l. Bij het normale peil was de gemiddelde (Vredepeel en Veulen, 2000-2004) totaal-P concentraties 0,12 mg P/l en bij hoog peil 0,18 mg P/l.

Vernatten door het opzetten van slootwaterpeilen van een akkerbouwperceel te Vredepeel resulteert in infiltratie van een grote hoeveelheid water van 250-330 mm/jaar in de goed doorlatende bodem. Het infiltratiewater had een gemiddelde concentratie van circa 20 mg NO₃/l en 0,4 mg PO₄-P/l. Dit betekent dat NO₃ betreft dat relatief schoon slootwater infiltreert en dat dit water wordt gemengd met het relatief NO₃-rijke water afkomstig uit het perceel. Dit leidt tot een lage NO₃-concentratie in het diepere grondwater door verdunning. Met het slootwater worden relatief hoge concentraties PO₄ aangevoerd, wat tot een verrijking van de PO₄-concentraties in het grondwater leidt. Als er op een grotere ruimtelijke schaal vernatting wordt toegepast dan op de enkele percelen op Vredepeel, dan zal de grote laterale waterstroming, zoals die in Vredepeel optrad, afnemen. Bij vernattingsprojecten dient met deze hydrologische (schaal)effecten rekening gehouden te worden.

Vernatting heeft in het droge groeiseizoen 2003 te Vredepeel geleid tot 80 mm minder beregening (75 mm) op het perceel met hoog peil ten opzichte van het perceel met het normale peil (155 mm). De netto aardappelopbrengst met 80 ton/ha

was voor beide percelen gelijk, maar perceel 39 (normaal peil) had een 13% hogere N-gewasopname en perceel 38 (hoog peil) een 9% hogere P-gewasopname. Dit wijst er op dat door periodieke beregening vooral de N-beschikbaarheid in de bovengrond wordt verhoogd, en dat door permanente vernatting de P-beschikbaarheid ook al in het begin van de groeiperiode, wanneer veel P wordt opgenomen ten behoeve van wortelgroei, waarschijnlijk wordt verhoogd.

De geschatte stikstofverliezen naar grond- en oppervlaktewater te Vredepeel zijn aanzienlijk en variëren voor de periode 1 april 2002 t/m 31 maart 2003 (teelt aardappel) van 105 kg N/ha voor het perceel met het normale peil tot 141 kg N/ha voor het perceel met het hoge peil hoog peil. Voor de periode 1 april 2003 t/m 31 maart 2004 (teelt maïs) was dit tussen 28 kg N/ha voor het perceel met hoog peil en 43 kg N/ha voor het perceel met het normale peil. Dit zijn globale schattingen, gezien de grote onzekerheden in de stikstofbalansberekeningen. Op het perceel met het normale peil liggen gemeten NO_3 -concentraties in grond- en drainagewater rond de 100 mg NO_3/l ; een factor 2 boven de EU-norm van 50 mg NO_3/l . Op het perceel met hoog peil wordt het stikstofoverschot sterk verdund met relatief schoon infiltratiewater waardoor de geschatte NO_3 -concentraties variëren tussen de 50-100 mg NO_3/l , de enkele grondwatermetingen geven echter concentraties rond de 100 mg NO_3/l aan. De fosfaatuitspoeling is verwaarloosbaar klein. Op Vredepeel heeft de verdunning van het grondwater met relatief schoon oppervlaktewater een veel groter effect op de NO_3 -concentratie dan een mogelijk toegenomen denitrificatie. De onzekere schatting van de nutriëntenverliezen worden voor een groot gedeelte veroorzaakt door de complexe hydrologische situatie op Vredepeel. Bij toekomstige vernattingsexperimenten verdient het de voorkeur eenvoudigere hydrologische situaties te kiezen.

Het waterkwaliteitsinstrumentarium “Vernatting landbouwgronden” kan op basis van metamodellen gemiddelde nitraatconcentraties in het grondwater, de N- en P-afvoer en de N- en P-concentraties naar het oppervlaktewater op regionale schaal voorspellen. Door vernatting zullen in het algemeen de P-concentraties in het grond- en oppervlaktewater toenemen door het in oplossing gaan van P. Tevens zal door vernatting in verhouding meer nitraat naar het oppervlaktewater dan naar het grondwater uitspoelen, door een verandering van de transportroutes in de bodem naar het oppervlaktewater. In grondwater kunnen nitraatconcentraties afnemen doordat bij vernatting denitrificatie toeneemt.

1 Inleiding

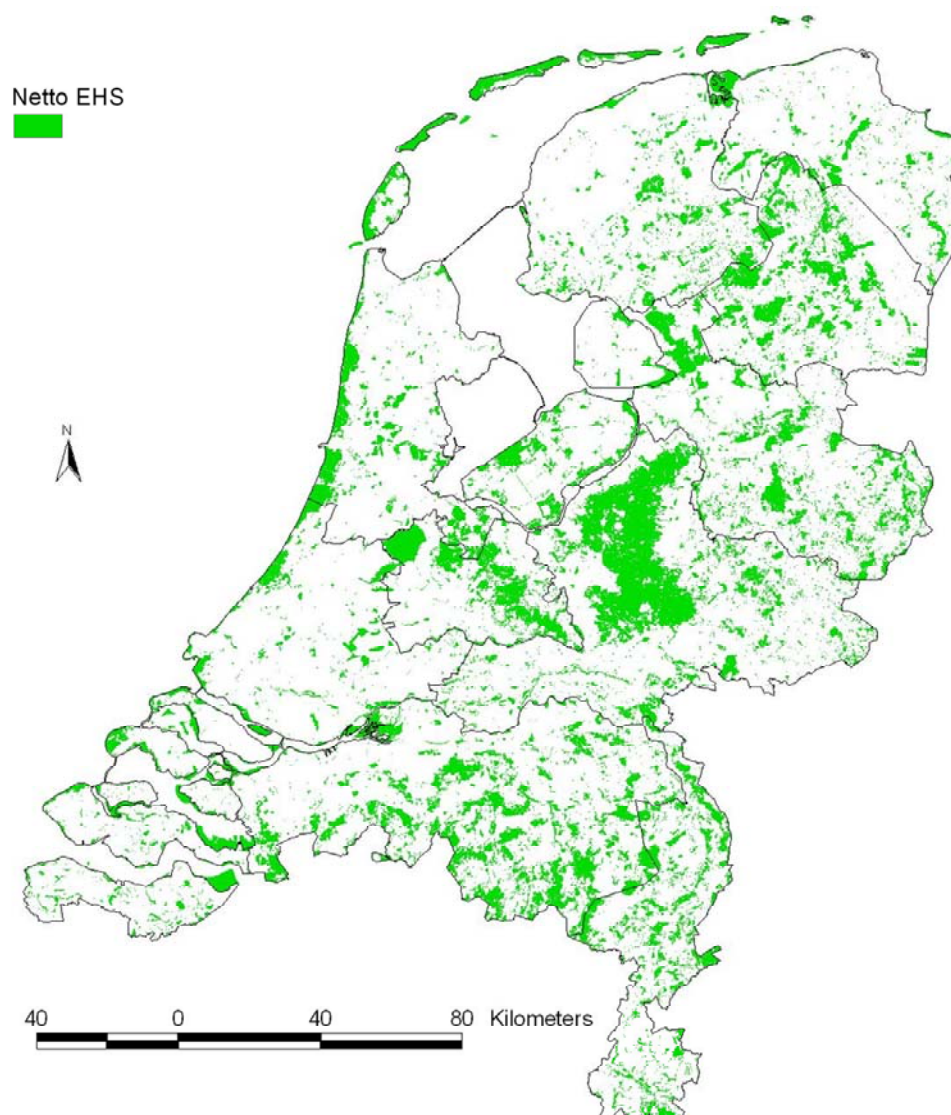
Het Nationaal MilieubeleidsPlan 4 (NMP4, 2001) geeft aan dat 200.000 tot 300.000 ha landbouwgrond in de buurt van Ecologische hoofdstructuur (EHS) zal moeten vernatten ten behoeve van verdrogingbestrijding. Deze vernatting is bedoeld om natte natuurontwikkeling mogelijk te maken en betekent een structurele peilverhoging gedurende een groot deel van het jaar. Daarnaast zullen klimaatverandering, zeespiegelstijging, bodemdaling en waterberging ook vaker leiden tot nattere situaties. De vraag is wat de landbouwkundige en milieukundige gevolgen hiervan zijn in landbouwgebieden die in of naast de vernatte EHS liggen? We zullen in dit hoofdstuk eerst beschrijven waar de EHS in Nederland ligt, kort beschrijven wat de problematiek van verdroging en vernatting is, en aangeven waar mogelijkheden voor vernatting zijn. De invloed van de waterhuishouding op stikstof- en fosfaatverliezen in open teelten wordt kort beschreven. Enkele resultaten van eerdere vernattingsexperimenten worden vervolgens samengevat. Dan geven we een kort overzicht van het (internationale) beleid dat relevant is voor de vernattingproblematiek in relatie tot nutriëntenemissies uit de landbouw naar grond- en oppervlaktewater. Uit het bovenstaande volgen de onderzoeksvragen die in de volgende hoofdstukken van dit rapport behandeld worden. In de leeswijzer kunt u vinden welke delen van het rapport voor u interessant zijn.

1.1 Ecologische Hoofdstructuur

De ‘Ecologische Hoofdstructuur’ (EHS) werd in 1990 geïntroduceerd in het Natuurbeleidsplan (LNV, 1990) van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV). De EHS is een netwerk van gebieden in Nederland waar de natuur voorrang heeft (Structuurschema Groene Ruimte; LNV, 2002). Het netwerk helpt voorkomen dat planten en dieren in geïsoleerde gebieden uitsterven en dat de natuurgebieden hun waarde verliezen. In grote lijnen bestaat de EHS uit:

- Bestaande natuurgebieden, reservaten en natuurontwikkelingsgebieden en robuuste verbindingen;
- Landbouwgebieden met mogelijkheden voor agrarisch natuurbeheer (beheergebieden);
- Grote wateren (zoals de kustzone van de Noordzee, het IJsselmeer en de Waddenzee).

Het streven is om in 2020 meer dan 750.000 hectare aan EHS-gebieden te hebben. De Nederlandse EHS sluit aan bij het Pan-Europees Ecologisch Netwerk (PEEN), de zogenaamde Natura-2000 gebieden. Figuur 1.1 laat de huidige netto-EHS (LNV, 2002) zien, hierin zijn de zogenaamde “EHS-zoekgebieden” niet opgenomen.



Figuur 1.1 Netto-EHS volgens Structuurschema Groene Ruimte 2 (LNV, 2002)

1.2 Verdroging en vernatting

Verdroging van de natuur is in Nederland een groot probleem (RIZA, 2005). In verdroogde gebieden is de oorspronkelijke grote verscheidenheid (biodiversiteit) aan planten verdwenen. Het is daarom belangrijk dat in deze gebieden water zo lang mogelijk wordt vastgehouden. In kwelgebieden kan een doel zijn de vegetatie in contact te laten komen met het grondwater.

Verdroging wordt vooral veroorzaakt door de ontwatering in de landbouw, de snelle afvoer in water uit het stedelijke gebied, en watergebruik voor drinkwaterwinning en industrie. De omvang van verdroogde natuur in 1985 is geschat op ongeveer 600.000

ha (IPO/RIZA, 1994; 1996; 1998). In 2000 was nog circa 492.000 ha natuur verdroogd (IPO/RIZA, 2000), terwijl het streven 450.000 ha was. In 2010 moet de verdroging ten opzichte van 1985 met ongeveer 40% zijn afgenomen (VROM, 1997). Waarschijnlijk wordt deze doelstelling niet gehaald. De lange termijnambitie blijft gehandhaafd om in 2030 geen verdroogde natuur meer te hebben (NMP4, 2001).

Verdroging kan worden tegengegaan door te vernatten door middel van het veranderen van het waterbeheer of door de hydrologische herinrichting van een gebied. Bij structurele vernatting wordt de grondwaterstand gedurende het gehele jaar verhoogd. Vernatting kan worden gerealiseerd door het verminderen van de grondwateronttrekkingen, waardoor het grondwaterpeil gemiddeld hoger zal komen te staan, of door water in het gebied langer vast te houden (minder afvoer). De waterbeheerder kan dit bereiken door ingrepen in de ontwatering- en afwateringssystemen. Het plaatsen van stuwtjes en/of het verontdiepen van sloten kunnen in dit geval effectieve maatregelen zijn. In zandgebieden is veelal het doel om meer gebiedseigen water in het gebied vast te houden waardoor de grondwaterstand in de zomer minder ver daalt. Het inlaten van gebiedsvreemd water is een andere mogelijkheid om de oppervlakte- en grondwaterpeilen op een hoger niveau te houden, maar stuit vaak op bezwaren door de afwijkende samenstelling van het inlaatwater ten opzichte van het gebiedseigen water.

Naast positieve effecten van anti-verdrogingsmaatregelen kunnen ook een aantal negatieve neveneffecten optreden. Vernatting kan in zowel het stedelijke als agrarische gebied tot wateroverlast leiden, omdat de waterbergingscapaciteit in de onverzadigde zone van de bodem afneemt. Bij vernatting neemt weliswaar droogteschade in de landbouw af, maar neemt het risico op natschade sterk toe, bovendien zijn de gevolgen voor de nutriëntenemissies nog grotendeels onbekend.

1.3 Vernatting in en rond de Ecologische Hoofdstructuur

Vreman (2005) heeft onderzocht welke gebieden in en rond de EHS voor vernatting in aanmerking komen. Door van der Gaast *et al.* (2003) zijn bufferzones berekend rond de EHS op basis van de invloedssfeer van het effect van een oppervlaktewaterpeilverhoging op de freatische grondwaterstand. Het criterium was dat een gebied nog tot de bufferzone behoort als de freatische grondwaterstandsverhoging meer dan 5% is van de ingestelde oppervlaktewaterpeilverhoging. Vervolgens is een landsdekkende kaart (Fig. 1.2) gemaakt met de mogelijkheden om te vernatten in en rond verdrogingsgevoelige natuurgebieden. Hierbij zijn gebieden met een grote waterdoorlatendheid in de ondergrond en/of een zeer diepe grondwaterstand (bijv. de Veluwe als ongeschikt voor vernatting ("slecht") gekwalificeerd, aangezien het niet de bedoeling is dergelijke droge natuurgebieden te vernatten. De vernattingsmogelijkheden zijn geclassificeerd in 10 klassen. Klasse 1 biedt slechte mogelijkheden om te vernatten en klasse 10 biedt optimale mogelijkheden om te vernatten.

De totale oppervlakte EHS die in aanmerking komt voor vernatting is ruim 1,5 miljoen hectare. Ruim 43% van de EHS heeft optimale mogelijkheden om vernat te kunnen worden (waardering 8-10). Het totale oppervlak met goede mogelijkheden om vernat te worden (waardering 6-8) is circa 1,0 miljoen hectare (59%).

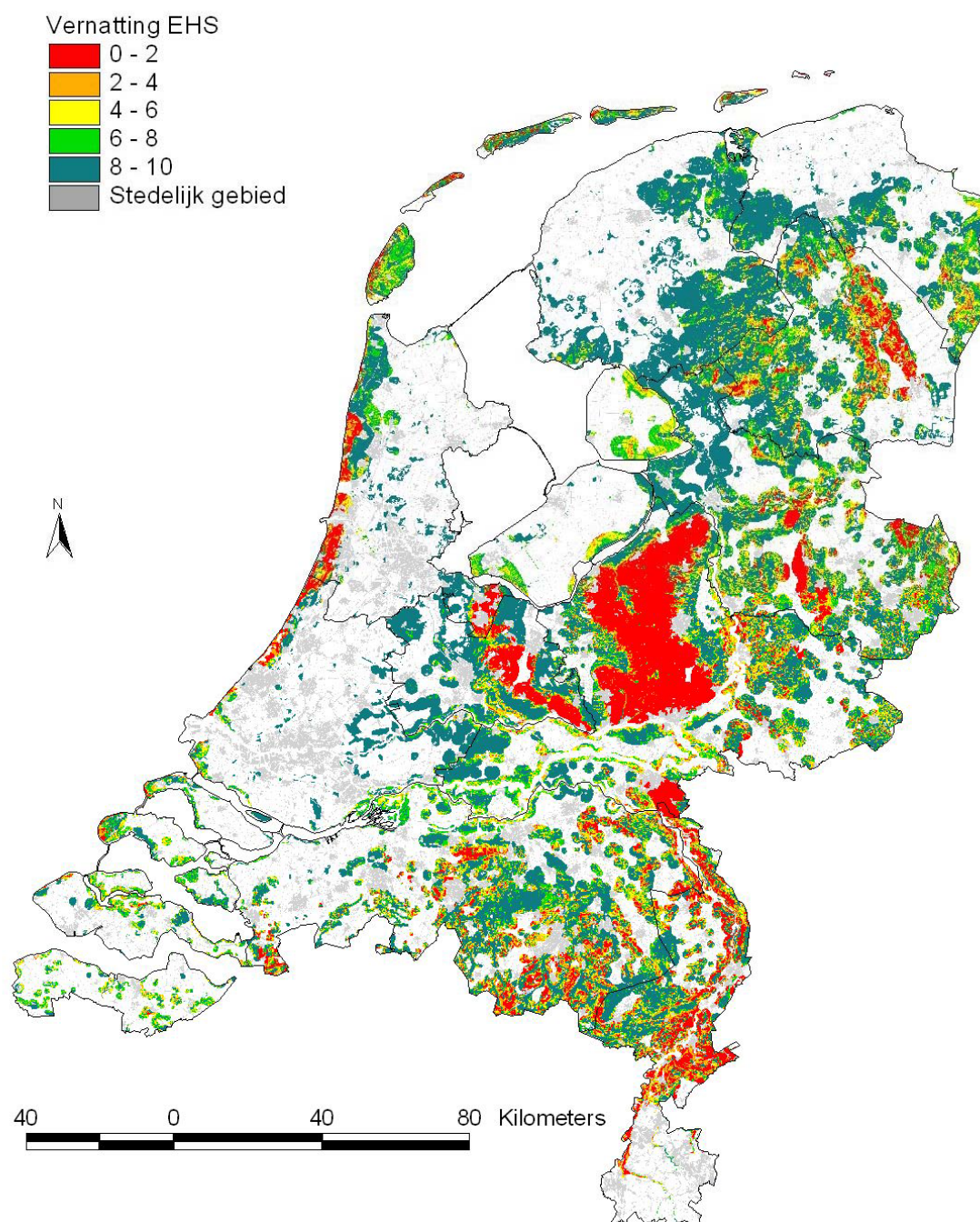
Met behulp van een geografisch informatiesysteem (GIS)-applicatie is bepaald welke landbouwgronden in de buffer van de te vernatten EHS liggen. De landbouwgronden zijn ingedeeld in 6 landbouwfuncties namelijk: grasland, maïsland, aardappelen, bieten, granen en overig landbouwgebruik. Uit deze analyse blijkt dat ongeveer 529.000 hectare landbouwgrond in aanmerking komt voor vernatting (Figuur 1.3), waarbij het grootste gedeelte grasland is en een aanzienlijk deel akkerbouwland (maïs, aardappelen, bieten en granen).

1.4 Milieukundige en agronomische gevolgen van vernatting

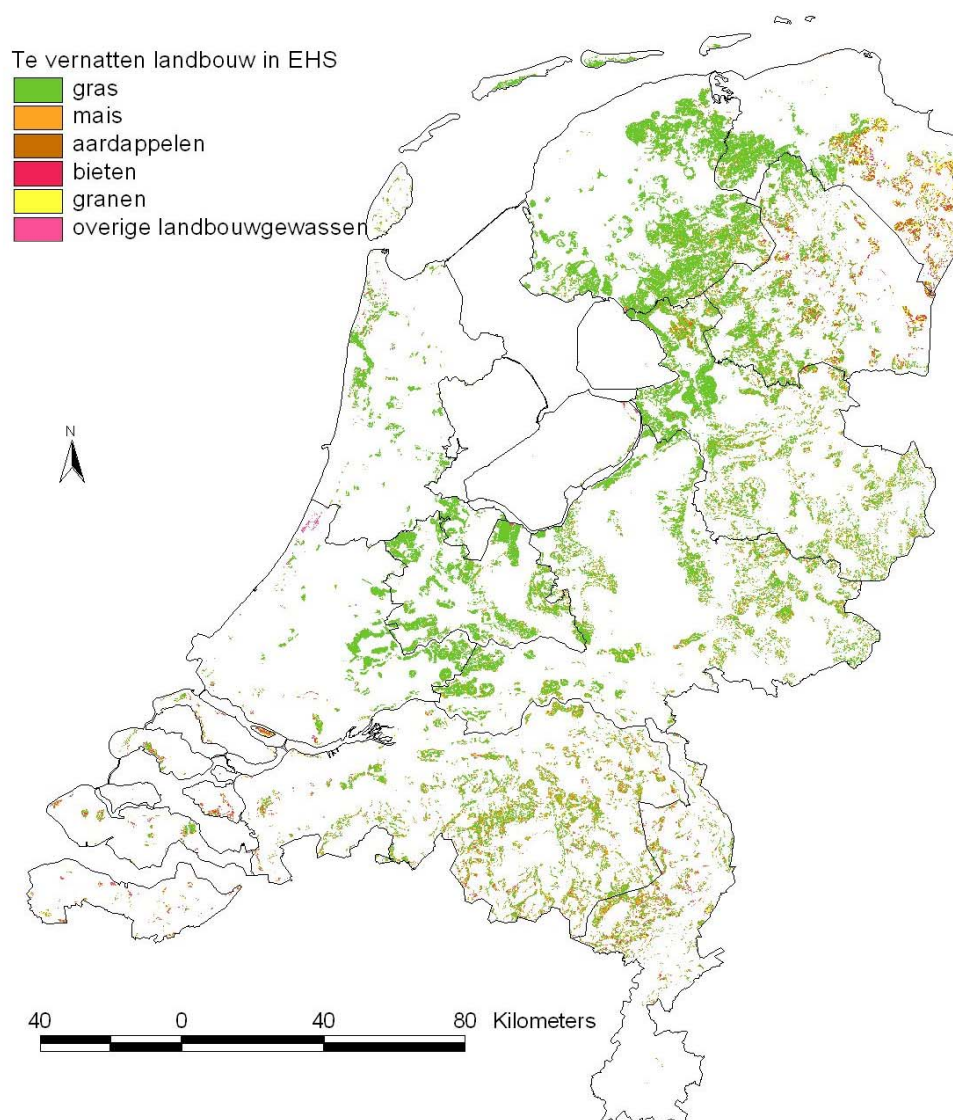
De toplaag van Nederlandse bodems is deels fosfaatverzaadigd. Onder nattere condities zal het bodemwatergehalte toenemen en het zuurstofgehalte afnemen. De redox-potentiaal zal dan afnemen, wat kan leiden tot een verhoogde mobiliteit van fosfaat, met risico's op een verhoogde fosfaatbelasting van het oppervlaktewater. Bij vernatting vermindert de mineralisatie van stikstof, waardoor minder ammonium en nitraat wordt gevormd. Nattere bodemcondities leiden tot een verhoogde denitrificatie en een afname van nitraatuitspoeling naar het grondwater. De kans op extra broeikasgasemissie als lachgas (N₂O) neemt toe.

Bij het transport van nitraat naar het oppervlaktewater speelt ook de verandering van de transportroute van de bodem naar het oppervlaktewater een belangrijke rol. Het is nog niet aan te geven wat gemiddeld genomen het effect van vernatting op de nitraatbelasting van het oppervlaktewater zal zijn. Voor een uitgebreide beschrijven van de gevolgen van vernatting wordt verwezen naar de Vos *et al.* (2003).

Bij vernatting is vooral het risico aanwezig dat de P-concentraties in het oppervlaktewater door uit- en afspoeling zullen toenemen door een verhoogde oplosbaarheid van P en een geringere opname door het gewas onder natte omstandigheden. Er zijn weinig proeven uitgevoerd waarin het lot van P en het gewas onder vernatte omstandigheden is gemeten.



Figuur 1.2 Geschiktheid voor vernatting in en rond verdrogingsgevoelige natuurgebieden in de netto-EHS (van der Gaast et al., 2003). Vernattingsmogelijkheden: 0-2: slecht, 2-4: matig, 4-6: redelijk, 6-8: goed, 8-10: optimaal



Figuur 1.3 Grasland en akkers (maïsland, aardappelen, bieten, granen en overige landbouwgewassen) binnen de gebieden van de EHS met “goede” of “optimale” mogelijkheden om vernet te worden. Deze kaart is tot stand gekomen door een samenvoeging van de vernattingskaart van de EHS en de landgebruikskaart van Nederland

In het landbouwkundig onderzoek is veel meer aandacht besteed aan de gevolgen van verdroging dan aan de gevolgen van wateroverlast. Dit is te verklaren uit de waterhuishoudkundige inrichting van Nederland, gericht op een goede ontwatering voor de landbouw, waardoor de kans op natschade sterk verminderd is. Echter zowel het anti-verdrogingsbeleid als klimaatsveranderingen zullen resulteren in een verhoogde kans op schade door wateroverlast aan landbouwgewassen; daarnaast zal

ook het risico van af- en uitspoeling van nutriënten toenemen. Dit geldt zeker voor fosfaat. Voor nitraat valt te verwachten dat in verhouding meer nitraat naar het oppervlakte- dan naar het grondwater zal uitspoelen door een verkorte transportroute in de bodem. Derhalve kan de verwachte toename in de frequentie en intensiteit van stortbuien in combinatie met waterconservering een negatieve invloed hebben op de kwaliteit van het oppervlaktewater. Door denitrificatie zullen nitraatconcentraties in het grondwater afnemen door vernatting.

Uit onderzoek met een verhoogd winterpeil (zie: Clevering *et al.*, 2006) blijkt dat opbrengstdervingen ten gevolge van overschrijdingen van een waterpeil van 30 cm-mv gedurende het winterseizoen gecompenseerd kunnen worden door een ca. 30 kg/ha hogere N-gift bij zomergerst en haver. Uit onderzoek met verschillende zomerpeilen (zie: Clevering *et al.*, 2006) blijkt ook dat opbrengstreducties door peilverhoging gecompenseerd kunnen worden met hogere N-giften.

Zolang er voor de wortelgroei voldoende zuurstof in de bodem aanwezig is, heeft vernatting vooral invloed op de beschikbaarheid van stikstof voor het gewas. Bovendien wortelen gewassen ondieper bij een hoog peil. Opbrengstreducties ten gevolge van zuurstofloosheid zullen naar verwachting dan ook voornamelijk optreden als het water tot in de bouwvoor komt, op het land blijft staan en bij sterk fluctuerende waterpeilen.

Onder vernatte omstandigheden zullen we vaker te maken hebben met suboptimale omstandigheden voor gewasgroei, waardoor er een lagere opbrengst wordt verkregen of dat opbrengstverliezen door extra stikstofbemesting gecompenseerd zullen moeten worden. Duidelijk is dat grondsoort, teelt, waterbeheer en nutriëntenbeheer sterk aan elkaar gekoppeld. De nutriëntenverliezen onder nattere bodemcondities zijn dus nog erg onzeker en zullen verder moeten worden onderzocht.

1.5 Beleid op gebied van landbouw, water, milieu en natuur

Nutriëntenemissies uit de landbouw naar het milieu moeten drastisch worden teruggedrongen, zodat voldaan wordt aan kwaliteitseisen voor het grond- en oppervlaktewater, de bescherming van waardevolle aquatische en terrestrische natuurgebieden en de uitstoot van broeikasgassen en verzurende stoffen naar de atmosfeer. Er zijn belangrijkste internationale afspraken op dit gebied gemaakt die van grote invloed zijn op de toekomstige ontwikkelingen in landbouw, waterbeheer en natuur (de Vos *et al.*, 2003). De EU-Kaderrichtlijn Water (KRW) (EU, 2000) is gericht op het herstel en de bescherming van watersystemen en geeft aan dat op stroomgebiedniveau de waterkwaliteit niet achteruit mag gaan. De EU-nitraatrichtlijn (EU, 1980) geeft aan dat het nitraatgehalte in het grondwater onder de norm van 50 mg/l moet blijven in de zogenaamde kwetsbare gebieden. Nederland heeft haar gehele oppervlak als kwetsbaar gebied opgegeven. De EU-nitraatrichtlijn schrijft ook het gebruik van een maximale hoeveelheid stikstof van 170 kg N/ha in dierlijke mest voor. Het Nederlandse derogatieverzoek is recent goedgekeurd en voor grasland mag nu 250 kg N/ha aan dierlijke mest worden gegeven op bedrijven met meer dan 70%

grasland. De EU-nitraatrichtlijn is nu een onderdeel van de EU-KRW. In de Paris conventions and Oslo commission (OSPAR, 2001; Walle and Sevenster, 1998) is een reductiedoelstelling geformuleerd van 50% in de nutriëntenbelasting van de Noordzee ten opzichte van 1985 naar aanleiding van eerdere afspraken in de International North Sea Conferences. Deze doelstelling is nog niet gehaald maar blijft wel geldig als streven. In het Kyoto-protocol (Kyoto-conferentie 1997) is een 6% reductie van de broeikasgasemissie in 2008-2012 ten opzichte van het referentiejaar 1990 geformuleerd. Er zijn nog geen specifieke doelstellingen voor de Nederlandse landbouw geformuleerd, maar de landbouw zou wel kunnen bijdragen aan de reductie van de emissie van overige broeikasgassen, met name lachgas (N_2O) en methaan (CH_4). In de EU-National Emission Ceilings (NEC)-richtlijn en het Gothenborg-protocol is de ammoniakemissiedoelstelling voor het jaar 2010 geformuleerd van maximaal 115 miljoen kg ammoniakemissie uit de landbouw in Nederland. De bedoeling is om zure, nutriëntenrijke depositie in natuurgebieden tegen te gaan. Deze doelstelling is overgenomen in het NMP4 (2001).

Op korte termijn (1-3 jaar) blijft de EU-Nitraatrichtlijn belangrijk en de daaraan gekoppelde nieuwe mestwetgeving. Op wat langere termijn (>2 jaar) zal daarnaast het belang toenemen van de oppervlaktewaterkwaliteitseisen geformuleerd in de KRW. In de KRW krijgt fosfor relatief meer aandacht, aangezien fosfor momenteel het meest bepalende nutriënt is met betrekking tot de kwaliteit van het zoete oppervlaktewater (van der Bolt *et al.*, 2004).

Voor het beleid is het van belang dat de regelgeving op het gebied van water, nutriënten en natuur op elkaar worden afgestemd, zodat afwenteling van problemen wordt voorkomen. Het risico bestaat dat door een veranderend waterbeheer (bijvoorbeeld vernatten) het nutriëntenbeheer wordt aangepast, met risico's voor verhoogde mestgiften en extra risico's op nutriëntenverliezen. Het is belangrijk dat bij de invulling van de KRW rekening wordt gehouden met de verschillende functies van het oppervlaktewater, zodat alleen goede ecologische toestanden worden geformuleerd daar waar het wenselijk is. Het lijkt niet verstandig om net als bij de Nitraatrichtlijn voor heel Nederland een generiek beleid te formuleren, maar lokaal- en gebiedsgericht beleid te formuleren.

1.6 Onderzoeksvragen

Nutriëntenverliezen uit de bodem leiden tot eutrofiëring van het oppervlaktewater en het overschrijden van (drinkwater)normen in het grondwater. De Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) handhaaft bestaande normen op het gebied van grondwaterkwaliteit (EU-nitraatrichtlijn) en zal scherpere eisen gaan stellen aan de ecologische kwaliteit van het oppervlaktewater op stroomgebiedsniveau. In het waterbeheer worden veranderingen voorgesteld om met name rond de EHS te gaan vernatten. Dit zal gevolgen hebben voor landbouwgebieden in en rond de EHS. De vraag is wat de gevolgen zijn voor de gewasopbrengsten bij nattere omstandigheden en wat er met de nutriënten in de bodem gebeurt bij vernatting? De verwachting is dat er meer fosfaat in oplossing kan gaan en kan uitspoelen naar grond- en

oppervlaktewater. Bij nitraat speelt de kans op denitrificatie een belangrijke rol. De interactie tussen waterbeheer en nutriëntenbeheer is onvoldoende bekend en dient beter te worden gekwantificeerd.

In de DWK-onderzoeksopdracht van LNV “Kwantificering van de nutriëntenstromen bij vernatting van landbouwgronden” werd expliciet gevraagd om vooral experimenten uit te voeren en gegevens te verzamelen en te interpreteren over vernatting in de akkerbouw. Deze resultaten, gecombineerd met de resultaten uit ander onderzoek, dienden te worden geïntegreerd in een methodiek/instrumentarium waarmee effecten van de vernatting en verdroging op de mobiliteit van fosfaat in de bodem, stikstof- en fosfaatverliezen uit grasland en open teelten naar grond- en oppervlaktewater en op stikstofverliezen door (de)nitricatie op perceelsniveau kunnen worden gekwantificeerd.

Dit is het syntheserapport van het bovengenoemde onderzoeksproject. Reeds eerder is een rapport verschenen (de Vos *et al.*, 2003) waarin de mogelijke effecten van vernatting op nutriëntenverliezen werden besproken. Clevering *et al.* (2006) hebben een overzicht gemaakt van de agronomische gevolgen van vernatting te Vredepeel en Veulen in de periode 2000-2004; en de Vos *et al.* (2006) hebben de experimentele gegevens met betrekking tot hydrologie en waterkwaliteit te Vredepeel 2003-2005 beschreven.

1.7 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een korte beschrijving van de resultaten van de vernattingsexperimenten op de proefvelden te Veulen en Vredepeel. In Hoofdstuk 3 wordt het waterkwaliteitsinstrumentarium “Vernatting landbouwgronden” toegelicht met voorbeeldberekeningen van de gevolgen van vernatting voor een zand-, veen- en kleigrond. Hoofdstuk 4 geeft de conclusies die we uit dit vernattingsonderzoek kunnen trekken.

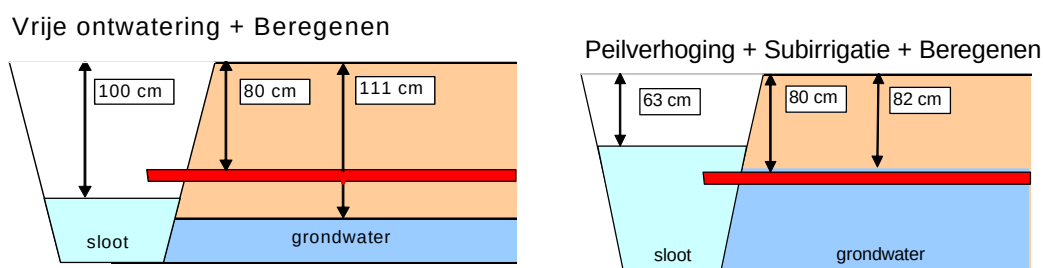
2 Veldexperimenten

Dit hoofdstuk geeft een samenvatting van de belangrijkste resultaten van de veldexperimenten met betrekking tot vernatting die op akkerbouwpercelen te Vredepeel en Veulen zijn uitgevoerd. Eerst bespreken we de agronomische gevolgen van vernatting op basis van resultaten in de periode 2000-2004, zoals in detail besproken door Clevering *et al.* (2006). Vervolgens bespreken we de experimenten te Vredepeel 2003-2005, waarbij de hydrologie waterkwaliteit meer aandacht krijgen (de Vos *et al.* (2006).

2.1 Veldexperimenten Vredepeel en Veulen 2000-2004

Het agronomisch onderzoek is op twee locaties in Noord-Limburg (Vredepeel en Veulen) op leemarm fijn zandgrond uitgevoerd. Op beide locaties is het proefveld op een diepte van ca. 80 cm gedraineerd. Beide proefvelden zijn opgesplitst in een normaal en hoog peil (Tabel 2.1). Gedurende het groeiseizoen werd bij het normale peil het slootpeil onder de eindbuis van de drains gehouden (vrije ontwatering); bij het hoge peil werd het slootpeil boven de eindbuis van de drains gehouden (waardoor de ontwatering wordt afgeremd en subirrigatie mogelijk is) (Fig. 2.1). Het slootpeil werd met behulp van stuwen zo constant mogelijk gehouden. Om na te gaan in hoeverre peilverhoging van invloed is op de nutriëntenbeschikbaarheid van het gewas werden verschillende bemestingsvarianten aangelegd. Op beide locaties is volgens de goede landbouwpraktijk beregend.

In de periode 2002-2004 werd op Vredepeel achtereenvolgens snijmaïs, suikerbiet, stamslabonen, aardappel en snijmaïs geteeld; op Veulen aardappel, conservenerwt, waspeen, en 2x snijmaïs. Door peilverhoging is minder beregend. Bij het normale peil is bij vier van de tien experimenten beregend; bij het hoge peil slechts éénmaal. Cumulatief over alle gewassen in de periode 2000-2004 is bij het normale peil 230 mm beregend; bij het hoge peil 80 mm. Door peilverhoging hoefde er minder beregend te worden. Cumulatief over alle gewassen is bij het normale peil 230 mm beregend, bij het hoge peil 80 mm. Dit is zelfs een onderschatting, aangezien op het normale peil nog meer beregend had moeten worden.



Figuur 2.1 Vrije ontwatering (normaal peil) en peilverhoging en subirrigatie (hoog peil) werden vergeleken. De gemiddelde drooglegging en grondwaterstanden gedurende het groeiseizoen en de draindiepte (cm-mm) zijn aangegeven

Tabel 2.1 Gemiddelde sloot- en grondwaterstanden in de verschillende jaren in de periode 1 april t/m 1 november (groeiseizoen) op Vredepeel en Veulen

Locatie	Gewas	Jaar	Slootwaterstand (cm-mv)			Grondwaterstand (cm-mv)		
			Normaal	Hoog	Verschil	Normaal	Hoog	Verschil
Vredepeel	suikerbiet	2001	104	79	25	114	85	29
Vredepeel	stamslabonen	2002	95	62	33	114	82	32
Vredepeel	aardappel	2003	120	65	44	114	75	39
Vredepeel	snijmaïs	2004	100	64	36	108	*	
Veulen	aardappel	2000	109	63	46	116	86	30
Veulen	conservenerwt	2001	99	60	39	101	81	20
Veulen	waspeen	2002	97	55	42	115	81	34
Veulen	snijmaïs	2003	106	62	44	138	108	30
Veulen	snijmaïs	2004	102	57	45	107	74	33

*= slechts incidenteel gemeten

2.1.1 Gewasopbrengsten en nutriëntenopname

Tabel 2.2 geeft de opbrengsten van de verschillende gewassen bij verschillende N-bemestingsniveaus: geen bemesting, lage bemesting (ca. 60% van de adviesbemesting) en adviesbemesting bij de verschillende waterpeilen. In Tabel 2.3 is een samenvatting van de relatieve resultaten van 7 bemestingsproeven gegeven, wat betreft de effecten op gewasgroei en nutriëntenopname. Bij N-bemesting volgens advies heeft peilverhoging geen duidelijk effect op de opbrengsten en productkwaliteit. Bij het achterwege laten van bemesting is de opbrengst gemiddeld genomen 12% lager bij het normale peil. Bij het hoge peil met N-bemesting volgens advies ontrok het gewas gemiddeld genomen 6 kg N/ha minder, maar 0,5 kg P/ha meer ten opzichte van het normale peil. Er is daarbij ook 7 kg/ha minder N in de bodem teruggevonden, evenredig verdeeld over de verschillende bodemlagen. Bij het achterwege laten van N-bemesting werd ca. 20 kg N/ha minder teruggevonden. Het gewas nam 16 kg N/ha minder op; en er bleef 4 kg N/ha minder in de bodem achter. Dit alles in vergelijking met het normale peil. Dit komt goed overeen met het stikstofverlies van 15-25 kg N/ha dat door Meijer (1968) is gevonden. Peilverhoging leidt dus tot een lagere N-beschikbaarheid, maar een hogere P-beschikbaarheid.

Tabel 2.2 Marktbaar opbrengsten op basis van versgewicht (ton ha⁻¹) in relatie tot waterpeil en N-bemesting voor verschillende gewassen op Vredepeel en Veulen

		Normaal peil			Hoog peil		
		Bemesting	geen	laag	advies	geen	laag
<i>Gewas</i>	<i>Jaar</i>						
<i>Vredepeel</i>							
suikerbieten	2001	33	53	53	31	52	59
stamslabonen	2002	11	11	10	7	9	10
<i>Veulen</i>							
aardappel	2000	53	72	72	41	64	75
conservenerwt	2001	50	51	50	45	47	45
waspeen	2002	80	75	79	73	77	82
snijmaïs*	2003			46			60
snijmaïs*	2004			46			49

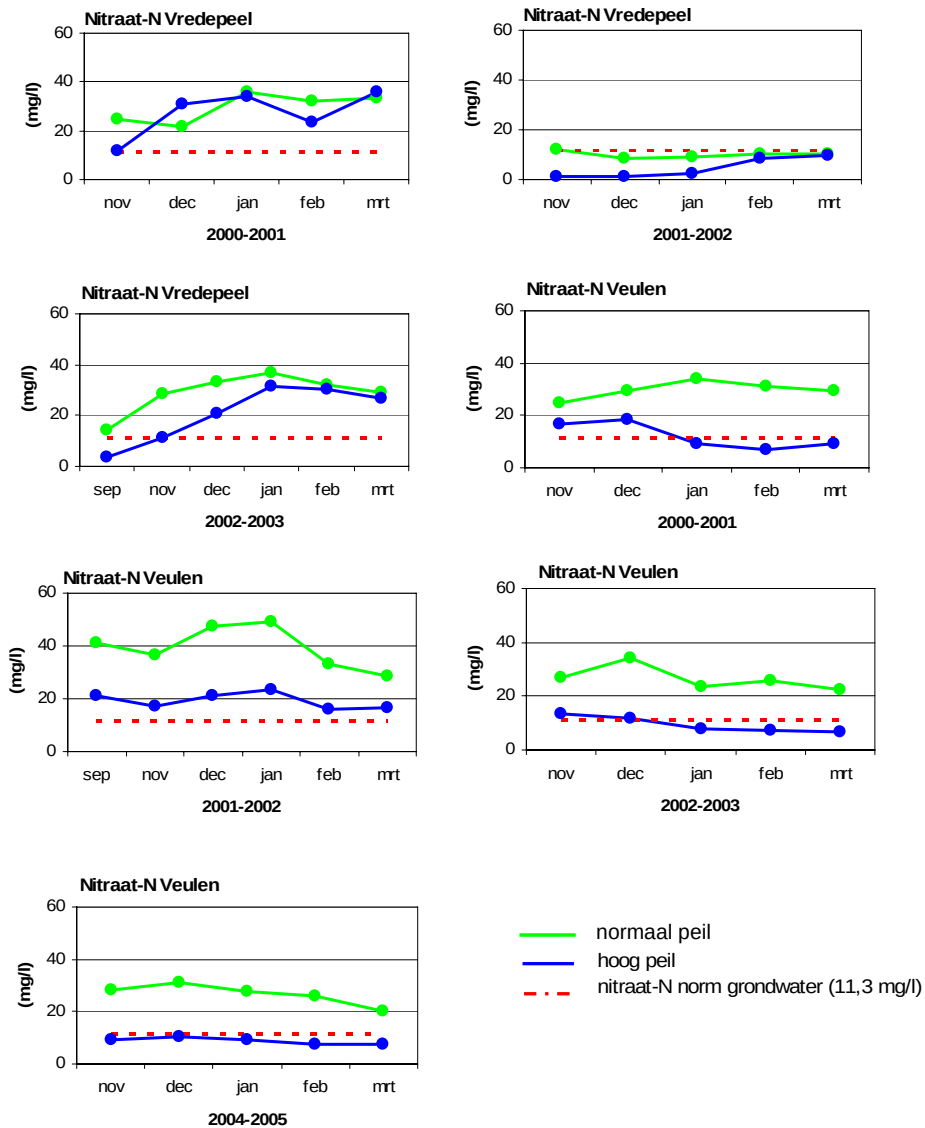
* Bij snijmaïs wordt de marktbaar opbrengst gebaseerd op het drooggewicht

Tabel 2.3 Gemiddelde relatieve waarden (%) van de verschillende variabelen bij N-bemesting volgens de adviesbasis ("bemest") en onbemest. De waarden bij het normale peil bemest zijn op 100% gesteld. De resultaten zijn gemiddelden van 7 verschillende proeven op Veulen en Vredepeel in de periode 2000-2004

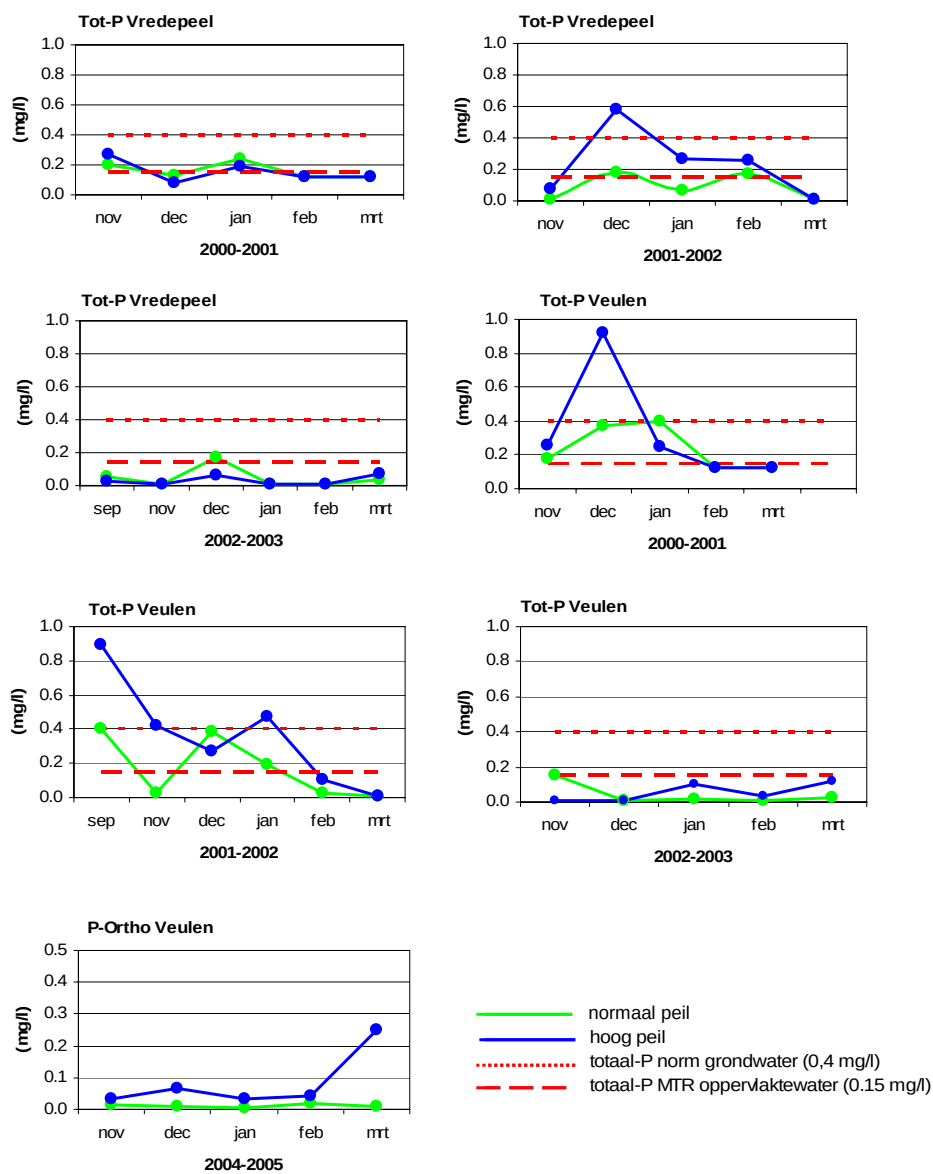
	Normaal peil		Hoog peil	
	onbemest	bemest	onbemest	bemest
<i>Gewas</i>				
Versgewicht	78	100	61	99
Drooggewicht	77	100	63	100
N-gehalte	76	100	71	97
N-onttrekking	58	100	48	97
P-gehalte	105	100	108	101
P-onttrekking	81	100	72	101
<i>Bodem</i>				
Nmin (oogst)	35	100	35	63
Nmin (najaar)	67	100	42	60

2.1.2 N- en P-concentraties in grondwater

NO₃-N en PO₄-P-concentraties in het bovenste grondwater zijn voor de uitspoelseizoenen voor Veulen en Vredepeel weergegeven in Figuren 2.2. en 2.3. In het bovenste grondwater wordt bij het normale peil 28 mg/l NO₃-N en 0,12 mg/l P-totaal gevonden, en bij het hoge peil 15 mg/l NO₃-N en 0,18 mg/l P-totaal (gemiddeld over groeiseizoenen en de locaties; Tabel 2.4). Bij het hoge peil wordt dus een ca. 46% lagere nitraat-N concentratie in het bovenste grondwater gevonden; daarentegen is de totaal-P concentraties ca. 51% hoger. Deze verschillen worden grotendeels verklaard uit de instroom van stikstofarm, maar fosfaatrijk slootwater bij subirrigatie, zoals in de volgende paragrafen besproken zal worden.



Figuur 2.2 Nitraat-N concentraties (mg l^{-1}) bij een normaal en hoog peil in de verschillende uitspoelingsseizoenen te Veulen en Vredepeel



Figuur 2.3 Totaal-P en ortho-P (Veulen 2004-2005) concentraties in de verschillende uitspoelingsseizoenen bij een normaal en hoog peil te Veulen en Vredepeel

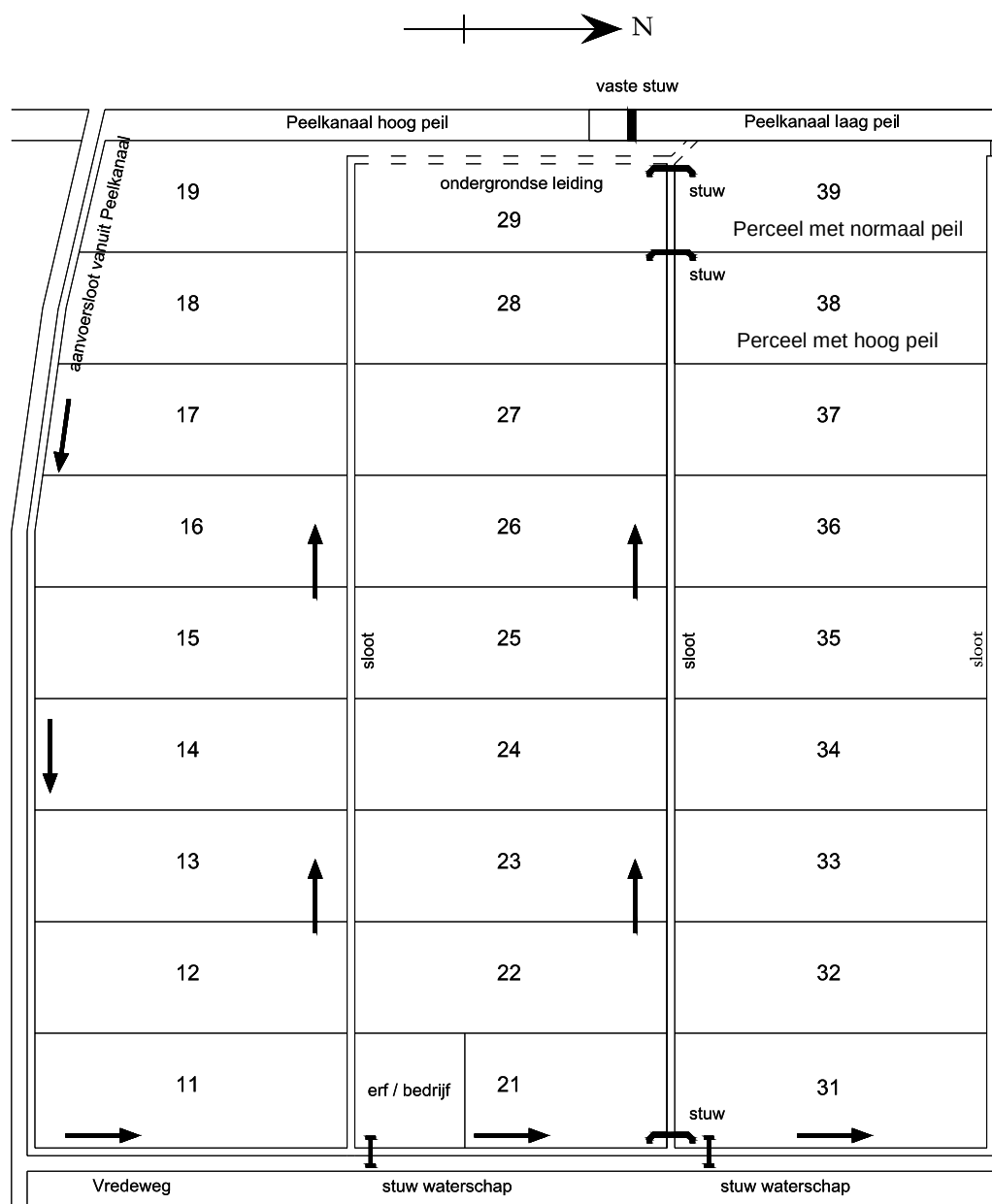
Tabel 2.4 Gemiddelde concentraties van nitraat-N, totaal-P of ortho-P in het bovenste grondwater bij het hoge en normale peil in de verschillende uitspoelingsseizoenen

		Nitraat-N (mg l ⁻¹)		Totaal-P* (mg l ⁻¹)		Ortho-P (mg l ⁻¹)	
		laag	hoog	laag	hoog	laag	hoog
Locatie	Uitspoelingsseizoen						
Vredepeel	2000-2001	30	27	0,16	0,16		
Vredepeel	2001-2002	10	5	0,09	0,24		
Vredepeel	2002-2003	32	24	0,05	0,03		
Veulen	2000-2001	30	12	0,24	0,33		
Veulen	2001-2002	39	19	0,18	0,36		
Veulen	2002-2003	27	9	0,04	0,05		
Veulen	2004-2005	27	9			0,01	0,09
	gemiddeld	28	15	0,12	0,18		

*) Voor waarden onder de detectiegrens is de helft van de waarde van de detectiegrens aangenomen.

2.2 Veldexperimenten Vredepeel 2003-2005

In het proefveld te Vredepeel zijn verschillen in grondwaterstand gecreëerd door in het slootgedeelte langs perceel 38 (hoog peil) het slootpeil op te zetten tot boven de drains (Fig. 2.1), hierdoor kan infiltratie van slootwater in het perceel plaatsvinden. In het slootgedeelte langs perceel 39 (normaal peil)(Fig. 2.4) wordt het slootwaterpeil onder de drains gehouden. In beide percelen zijn de drains aan de noordzijde afgedopt en aan de zuidzijde van een bemonsteringssysteem voorzien om waterfluxen en nutriëntenconcentraties te kunnen bepalen.



Figuur 2.4 Overzicht proefboerderij Vredepeel met de genummerde percelen. Op perceel 38 (normaal peil) en perceel 39 (hoog peil) vond ons onderzoek plaats

2.2.1 Gewasopbrengsten en nutriëntenopname

Er zijn relatief kleine verschillen gevonden in gewasopbrengsten tussen perceel 38 (hoog peil) en perceel 39 (normaal peil) (Tabel 2.5).

Tabel 2.5 Gewasopbrengsten en N- en P-afvoer in 2003 (aardappel) en 2004 (snijmaïs) voor perceel 39 (normaal peil) en perceel 38 (hoog peil)

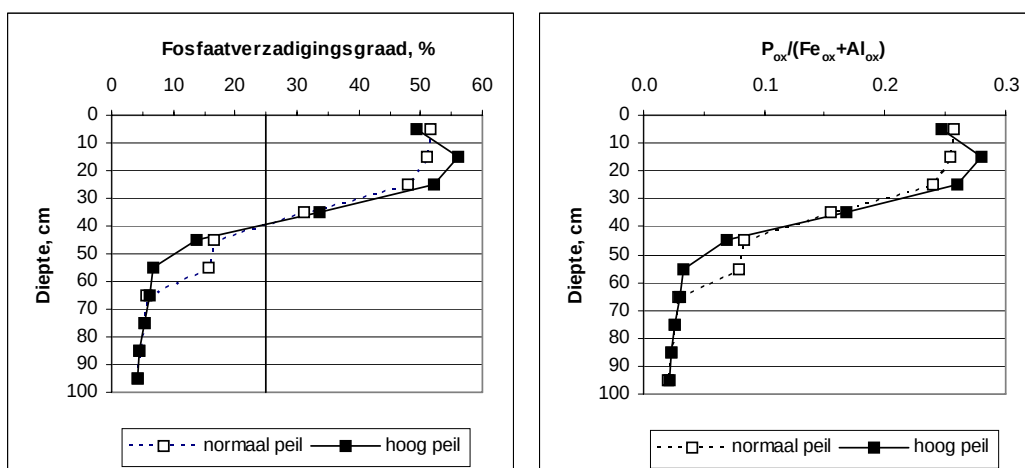
Gewas	Netto opbrengst (ton/ha)		Nutriëntenopname (kg/ha)			
			N		P	
	<i>normaal</i>	<i>hoog</i>	<i>normaal</i>	<i>hoog</i>	<i>normaal</i>	<i>hoog</i>
Aardappel	79	81	244	212	29	32
Snijmaïs	62	62	238	242	48	48

De kleine verschillen in aardappelopbrengst in 2003, met een droog groeiseizoen, worden vooral verklaard door de grotere hoeveelheid beregening van 150 mm op perceel 39 (normaal peil) ten opzicht van 75 mm op perceel 38 (hoog peil). Dit beregeningwater wordt toegediend in de droge wortelzone en komt zodoende direct ten goede aan het gewas.

De N-opname door het gewas is in 2003 bij aardappel hoger op perceel 39 (normaal peil), terwijl de P-opname op perceel 38 (hoog peil) hoger is. Door te beregenen kan in droge jaren de N-beschikbaarheid in de bovengrond toenemen. P-opname is vooral vroeg in het groeiseizoen voor de wortelgroei van belang, voordat met beregenen gestart wordt. Door een hoger vochtgehalte in de bodem neemt de mobiliteit van P toe, waardoor P beter opneembaar wordt voor het gewas. In 2004 zijn bij snijmaïs geen verschillen in gewasopbrengst en nutriëntenopname gevonden. In dat jaar was vocht niet beperkend voor de N- en P-beschikbaarheid en traden er slecht kleine verschillen in grondwaterstand op gedurende het groeiseizoen (Fig. 2.7).

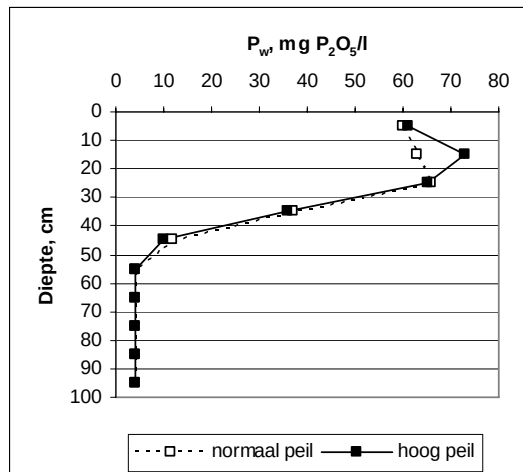
2.2.2 P-toestand van de bodem

Figuur 2.5 laat zien dat de bouwvoor (0-30 cm-mv) fosfaatverzadigd is (fosfaatverzadigingsgraad > 25%), maar de bodemlagen daaronder niet. Als bovenin het profiel P gemobiliseerd wordt, bijvoorbeeld door vernatting of beregenen, dan kan deze P bij verticaal transport onderin weer worden vastgelegd. Dit beeld komt overeen met de lage P-concentraties in het drainwater van perceel 39 (normaal peil). Aangezien de ondergrond van de percelen nog niet fosfaatverzadigd is, zal de P-uitspoeling op korte termijn bij de huidige oppervlaktewaterkwaliteitsnorm van 0,15 mg P/l geen probleem zijn op deze percelen. Op langer termijn kan door netto P-toevoer P-uitspoeling wel een probleem worden. Ook kan de definitie van de fosfaatverzadigingsgraad veranderen (bijvoorbeeld van 25% naar 10% verzadiging) bij aanscherping van de oppervlaktewaternormen. De percelen zullen dan eerder als P-lekkend beschouwd worden.



Figuur 2.5 De fosfaatverzadigingsgraad en de hoeveelheid P, Fe en Al middels oxalaat-extractie in de bodem voor perceel 39 (normaal peil) en perceel 38 (hoog peil)

Fosfaat dat in water oplost wordt beschouwd als de meest labiele fractie in de bodem. Het P_w -getal wordt in de akkerbouw gebruikt als maat voor de beschikbaarheid van P voor gewassen. Het P_w -getal in de laag 0-40 cm is hoog (60-70); en zeer laag in de diepere lagen (5-10) (Fig. 2.6). Opvallend is het hogere P_w -getal van 70 in de bodemlaag 10-20 cm van perceel 38 (hoog peil) ten opzichte van 61 van perceel 39 (normaal peil).



Figuur 2.6 De beschikbare hoeveelheid P (P_w ; mg P₂O₅/l) in de bodem voor perceel 39 (normaal peil) en perceel 38 (hoog peil)

2.2.3 Grondwaterstanden, drainage en infiltratie

In deze paragraaf worden de meetgegevens gepresenteerd voor de perioden waarin geautomatiseerde metingen plaatsvonden. Door veldwerkzaamheden, aanleg van nieuwe drainagesystemen, etc. zijn niet altijd complete meetreeksen beschikbaar (de



WAGENINGEN UR

For quality of life

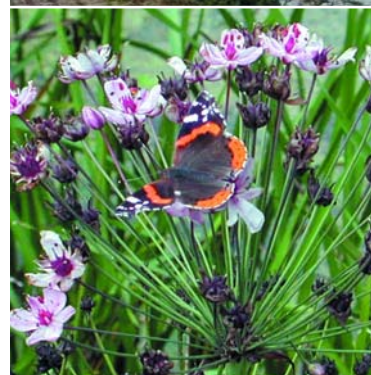
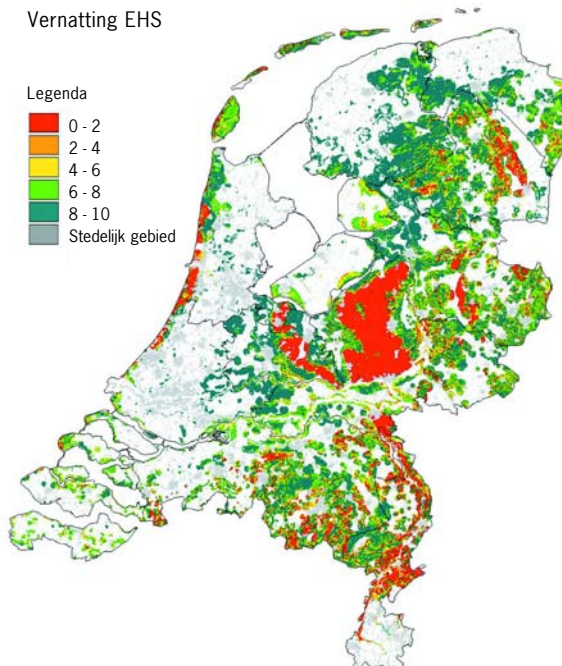
Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden

Syntheserapport

J.A. de Vos
O.A. Clevering
F.P. Sival

Vernatting EHS

Legenda



Alterra-rapport 1393, ISSN 1566-7197

Vos *et al.*, 2006). Voor de drainagegegevens is op basis van eenvoudige waterbalansberekeningen (de Vos en Assinck, 2004) toch getracht een zo volledig mogelijk beeld te creëren. Voor de N- en P-concentraties in drainagewater en infiltratiewater worden alleen de data voor de meetperiode 2004 gepresenteerd, aangezien alleen voor deze periode kwalitatief goede data beschikbaar zijn.

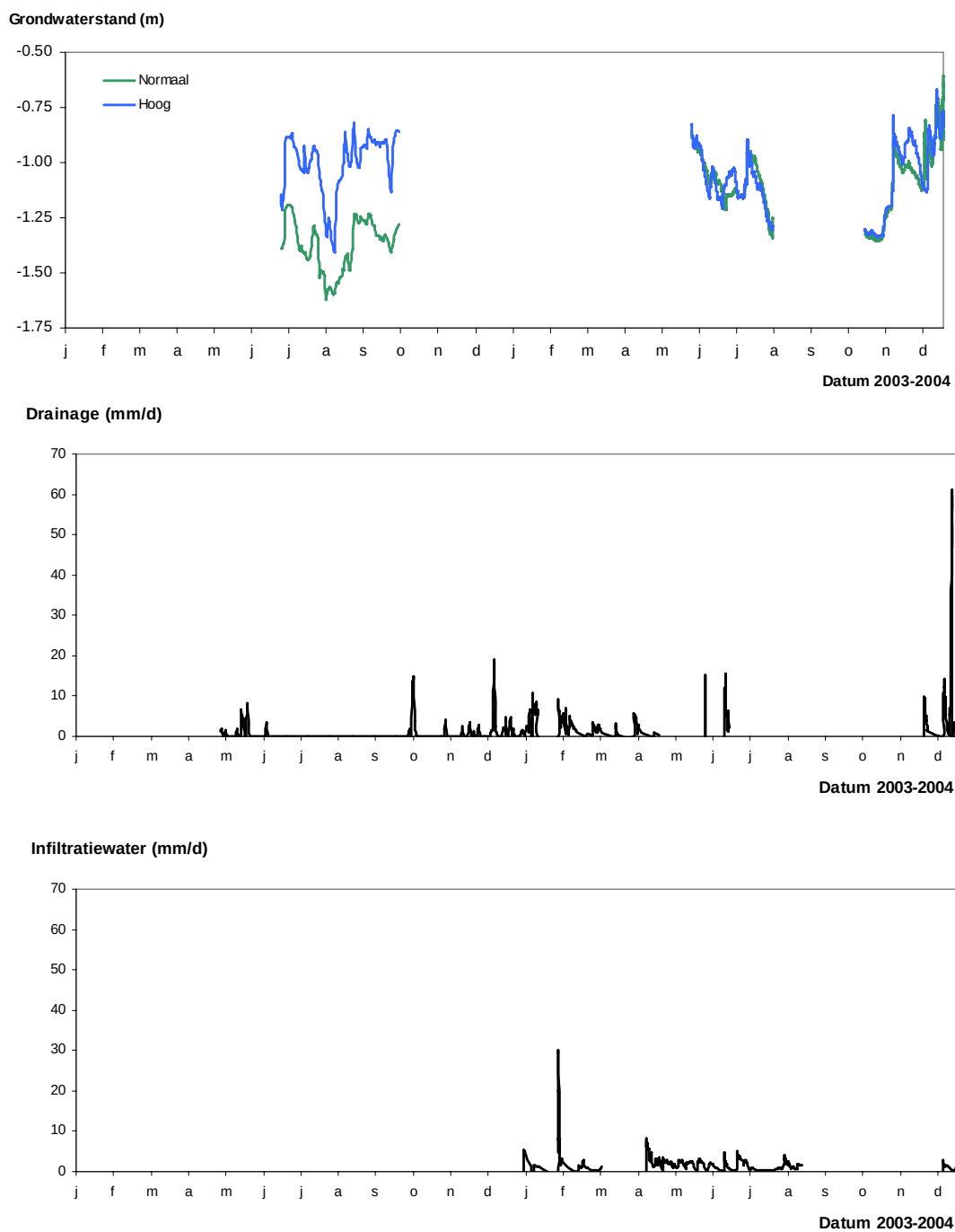
Grondwaterstanden

De grondwaterstanden zijn op 2,50 m vanaf de drain gemeten in het midden van de percelen 38 en 39. De verschillen in grondwaterstanden tussen beide percelen zijn gedurende de meetperiode van juli t/m oktober 2003 gemiddeld 37 cm en zijn vrij constant (Fig. 2.7). De grondwaterstanden zakken in het droge jaar 2003 ook bij het hoge peil vrij diep weg ($< -1,0$ m). Het is daarom de vraag of vernatting grote gevolgen heeft gehad op de gewasgroei. In 2004 zijn de verschillen in grondwaterstanden met het perceel met normaal peil gering, daarnaast ontbreken meetgegevens gedurende de periode augustus t/m oktober 2004. In het groeiseizoen van mei t/m augustus 2004 zien we dat de grondwaterstanden vrij diep zijn ($< -1,0$ m) en dat in beide percelen in juli een scherpe daling van de grondwaterstanden optreedt. Dit wijst er op dat in deze periode er weinig wateraanvoer via de drain heeft plaatsgevonden.

Drainage en infiltratie

Drainage heeft in de meetperiode mei-december 2003 alleen plaatsgevonden in perceel 39 (normaal peil). Infiltratie heeft in dezelfde periode alleen plaatsgevonden in perceel 38 (hoog peil). Voor 2003 is via een eenvoudige waterbalans ("Tipping bucket"-principe; de Vos en Assinck, 2004) op dagbasis de waterafvoer via de drains berekend (Fig. 2.7) en we hebben deze data vergeleken met de grondwaterstanden in de percelen. Uit deze analyse bleek dat gemiddeld 60% van het neerslagoverschot via de drain wordt afgevoerd en 40% via verticaal en/of lateraal transport via het grondwater.

De meetgegevens van de drain in 2004 (Figuur 2.7) laten zien dat er vooral in de periode van 1 mei t/m half augustus 2004 infiltratie van slootwater in perceel 38 (hoog peil) heeft plaatsgevonden. Na half augustus 2004 heeft geen wateraanvoer meer plaatsgevonden via de drain op perceel 38 (hoog peil), dit komt overeen met de lagere grondwaterstanden. Ook de afvoer van water via drains in perceel 39 (normaal peil) stopt in deze periode, wat kan worden verklaard uit de lage grondwaterstanden op dit perceel in deze periode. Een eventueel neerslagoverschot zal dan niet via de drains worden afgevoerd, maar via drainage naar de ondergrond.



Figuur 2.7 Grondwaterstanden, drainage (perceel met normaal peil) en infiltratie (perceel met verhoogd peil) in de periode 2003-2004; zie tekst voor de beschrijving van de herkomst van de diverse gegevens

2.2.4 N- en P-concentraties in drainage- en infiltratiewater

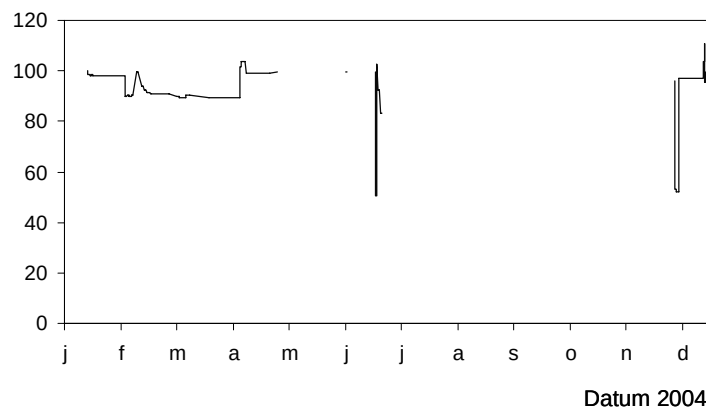
Drainagewater afkomstig uit perceel 39 (normaal peil)

De gemeten NO_3 -concentraties in het drainagewater liggen op perceel 39 (normaal peil) rond de 100 mg/l (Fig. 2.8). Deze NO_3 -concentraties corresponderen redelijk met grondwaterconcentraties die in de percelen zijn gemeten (de Vos *et al.*, 2006; Fig. 4.6). De NO_3 -concentraties van 100 mg/l (23 mg $\text{NO}_3\text{-N/l}$) in het drainwater zijn relatief hoog, en een factor 10 boven de oppervlaktewaternorm van 2,2 mg N/l. De P-concentraties in het drainwater zijn erg laag (data niet getoond) en liggen meestal onder de detectielimiet van 0,05 mg/l, en dus ruim onder de oppervlaktewaternorm van 0,15 mg P/l. De lage P-concentraties komen overeen met de hoge P-absorptiecapaciteit (lage fosfaatverzadigingsgraad) in de ondergrond (Fig 2.5).

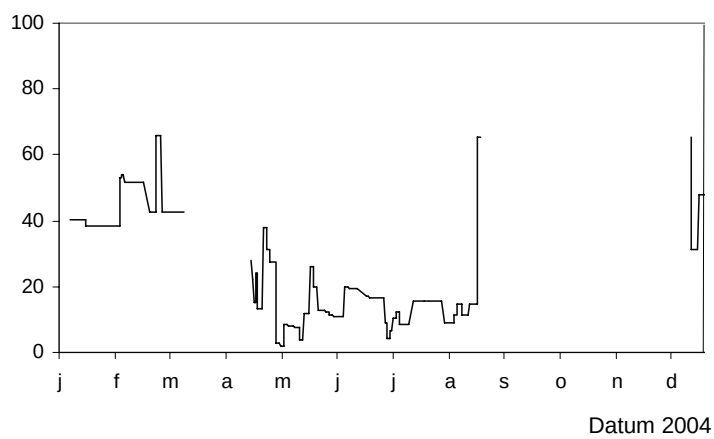
Infiltratiewater instromend in perceel 38 (hoog peil)

Bij het hoge peil vindt alleen infiltratie van slootwater plaats en geen drainage. Dit betekent dus dat de grondwaterstand op dit goeddoorlatende perceel altijd lager is gebleven dan de slootwaterstand. Gedurende droge periodes infiltreert veel slootwater met daarin N en P in het perceel. De concentraties in het instromende slootwater liggen in de orde van grootte van 20 mg $\text{NO}_3\text{/l}$ en 0,4 mg $\text{PO}_4\text{-P/l}$ (Figuur 2.8). Dit betekent dat wat NO_3 betreft relatief schoon slootwater infiltreert en dat dit water wordt gemengd met het relatief NO_3 -rijke water afkomstig uit het perceel. Met het slootwater worden hoge concentraties PO_4 aangevoerd wat tot een toename van de concentraties in het grondwater zal leiden, aangezien uit de resultaten van perceel 39 (normaal peil) blijkt dat er nauwelijks PO_4 uitspoelt. Het infiltrerende PO_4 zal echter weer relatief snel in de ondergrond vastgelegd worden.

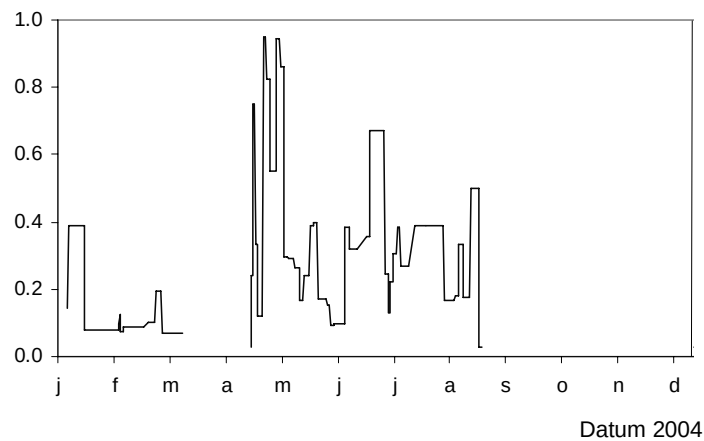
NO₃-concentratie in drainagewater (mg l⁻¹)



NO₃-concentratie instromend slootwater (mg l⁻¹)



PO₄-P-concentratie instromend slootwater (mg l⁻¹)



Figuur 2.8 NO₃- en PO₄-P concentraties in drainage- en infiltratiewater (instromend slootwater) in 2004

2.2.5 Water- en nutriëntenbalansen

Water- en nutriëntenbalans 2003-2004

We beschouwen voor de **waterbalans 2003-2004** de periode van 1 mei 2003 t/m 30 april 2004. We beginnen dus bij de start van het groeiseizoen en eindigen bij de start van het volgende groeiseizoen, zodat we het gehele uitspoelingseizoen van het gewas aardappel meenemen. Wij veronderstellen dat de waterinhoud in het bodemprofiel aan het begin en eind van de beschouwde periode gelijk is en dat er dus geen verandering in waterberging optreedt. In Tabel 2.6 zien we dat er 80 mm minder beregend is op het vernatte perceel 39, maar dat daarvoor een extra hoeveelheid van 330 mm infiltratiewater is aangevoerd gedurende het gehele jaar. Een groot deel van dit infiltratiewater is weer via lateraal en verticaal transport in de ondergrond afgevoerd. Als al dit water (“Aanvulling grondwater” in Tabel 5.1) tot aanvulling leidt van het grondwater, dan wordt bij het hoge peil (perceel 38) ca. 5x zoveel water naar het grondwater afgevoerd als bij het normale peil (perceel 39).

Tabel 2.6 Waterbalansen (mm) voor de percelen 38 (hoog) en 39 (normaal) voor de periode 1 mei 2003 t/m 30 april 2004 (aardappel) en de periode 1 april 2004 t/m 31 maart 2005 (maïs)

	2003-2004		2004-2005	
	Perceel 38 (hoog peil)	Perceel 39 (normaal peil)	Perceel 38 (hoog peil)	Perceel 39 (normaal peil)
Neerslag (A)	773	773	859	859
Berekening (B)	75	155	0	0
Evapotranspiratie (C)	501	501	565	565
Drainage (D)	0	292	0	201
Infiltratie (E)	330	0	250	0
Aanvulling grondwater (lateraal en vertikaal in ondergrond) (F = A+B-C-D+E)	677	135	544	93
Totale waterafvoer (drain + ondergrond) (G = F+D)	677	427	544	294

Voor de **nutriëntenbalansen 2003-2004** beschouwen wij dezelfde periode als voor de hierboven beschreven waterbalans. We gaan er in de balans vanuit dat er netto geen N vrijkomt of verdwijnt uit de organische stofpool van de bodem. De ammoniakemissie is berekend als 5% van de aangevoerde minerale stikstof in varkensdrijfmest (PPO, 2003). De mineralisatie is geschat op 100 kg N/ha/jaar, mede op basis van de gegevens van het project “Telen met Toekomst” (Smit en Zwart, 2003). Denitrificatie wordt op Vredepeel geschat op ca. 15 kg N/ha/jaar (Zwart, 2003). We gaan uit van dezelfde lage denitrificatie bij beide peilen. We zien (Tabel 2.7) dat de totale emissie van stikstof naar het grondwater op perceel 38 (hoog peil) met 141 kg N/ha aanzienlijk hoger is dan de 105 kg N/ha naar het grond- en oppervlaktewater op perceel 39 (normaal peil). De verschillen worden veroorzaakt door een lagere gewasopname op perceel 38 (hoog peil) en de extra inlaat van N via het inlaatwater. Echter door de grote afvoer van water van 677 mm bij het hoge peil (Tabel 2.6) zien we dat de hoeveelheid water waarin deze hoeveelheid stikstof kan

worden getransporteerd bij het hoge peil bijna 1,5x groter is dan bij het normale peil met een waterafvoer van 427 mm (zie Tabel 2.6). We hebben op perceel 38 (hoog peil) te maken met een grotere N-vracht, maar verdund met een nog grotere hoeveelheid inlaatwater. Op basis van deze nutriënten- en waterbalansen schatten we de NO₃-concentraties in het diepere grondwater op 92 mg/l voor perceel 38 (hoog peil) en 109 mg/l voor perceel 39 (normaal peil). De gemeten gemiddelde concentratie in het drainwater is circa 100 mg NO₃/l voor perceel 39 (normaal peil) (zie Figuur 2.8). De geschatte NO₃-concentratie op basis van de water- en N-balans ligt in de buurt van de gemeten NO₃-concentraties in het drainagewater.

Tabel 2.7 Nutriëntenbalansen voor N (kg/ha) voor de percelen 38 (hoog peil) en 39 (normaal peil) voor de periode 1 mei 2003 t/m 30 april 2004 (aardappel) en de periode 1 april 2004 t/m 31 maart 2005 (maïs)

	2003-2004		2004-2005	
	Perceel 38 (hoog peil)	Perceel 39 (normaal peil)	Perceel 38 (hoog peil)	Perceel 39 (normaal peil)
Bemesting (direct werkzaam) (A)	225	225	142	142
Ammoniakemissie (B)	6	6	6	6
Mineralisatie (C)	100	100	100	100
Depositie (D)	45	45	45	45
Afvoer met gewas (E)	219	244	242	238
Uitspoeling drain (NO ₃ -N) (F)	0	61	0	43
Inspoeling drain (NO ₃ -N) (G)	11	0	10	0
Denitrificatie (H)	15	15	15	15
Transport naar grondwater (I = A-B+C+D-E-F+G-H)	141	44	34	-15
Totale emissie naar grond- en oppervlaktewater (J = I+F)	141	105	34	28

Er wordt in de periode 1 mei 2003 t/m 30 april 2004 meer P toegediend dan dat er wordt opgenomen (Tabel 2.8). Uit de zeer lage P-concentraties in het drainagewater blijkt dat er geen P-uitspoeling plaatsvindt. Het overschot aan P wordt dus vastgelegd in de bodem.

Tabel 2.8 P-balansen (kg P/ha) voor de percelen 38 (hoog peil) en 39 (normaal peil) voor de periode 1 mei 2003 t/m 30 april 2004 (aardappel) en de periode 1 april 2004 t/m 31 maart 2005 (maïs)

	2003-2004		2004-2005	
	Perceel 38 (hoog peil)	Perceel 39 (normaal peil)	Perceel 38 (hoog peil)	Perceel 39 (normaal peil)
Bemesting (P ₂ O ₅ -P) (A)	50	50	29	29
Afvoer met gewas (P) (B)	32	30	48	48
Uitspoeling drain (PO ₄ -P) (C)	0	0	0	0
Inspoeling drain (PO ₄ -P) (D)	1	0	1	0
P-vastlegging (E = A-B-C+D)	19	20	-18	-19

Water- en nutriëntenbalans 2004-2005

We beschouwen voor de **waterbalans 2004-2005** de periode van 1 april 2004 t/m 31 maart 2005 (Tabel 2.6). We gebruiken dezelfde benadering als hierboven beschreven. We zien dat bij het hoge peil een grote hoeveelheid van 250 mm water infiltreert, wat samen met het neerslagoverschot door waterstroming in de ondergrond (richting Peelkanaal) naar de diepere ondergrond verdwijnt.

Voor de **nutriëntenbalans 2004-2005** beschouwen we dezelfde periode als voor de boven beschreven waterbalans. Verder gaan wij uit van dezelfde aannames als voor 2003-2004. We zien (Tabel 2.7) dat de totale emissie van stikstof naar grond- en oppervlaktewater voor beide percelen haast gelijk is 28 en 34 kg N/ha. Echter door de grote aanvoer van inlaatwater bij het hoge peil (Tabel 2.6) zien we dat de hoeveelheid water ("totale wateraanvoer"; Tabel 2.6) waarin deze hoeveelheid stikstof kan worden getransporteerd bij het hoge peil bijna 2x groter is dan bij het normale peil. We hebben hier dus te maken met een gelijke N-vracht, maar verdund met een grote hoeveelheid inlaatwater. Op basis van deze nutriënten- en waterbalansen schatten we de NO₃-concentraties in het diepere grondwater op 28 mg/l voor perceel 38 (hoog peil) en 42 mg/l voor perceel 39 (normaal peil).

De gemeten gemiddelde concentratie in het drainagewater is ca. 100 mg NO₃/l voor perceel 39 (normaal peil) (Fig. 2.8). De geschatte NO₃-concentratie op basis van de water- en N-balans komt niet overeen met de gemeten NO₃-concentraties in het drainagewater. In deze N-balans lijkt het er op dat er door de doorwerking van fouten de laterale transportterm te laag wordt berekend. Voor perceel 39 (normaal peil) lijkt het er zelfs op dat er 15 kg N wordt aangevoerd, wat niet waarschijnlijk is als er tegelijkertijd 43 kg N door drainage verdwijnt. Deze 43 kg N beschouwen we als ondergrens voor de werkelijke verliezen van dit perceel. Gezien de circa 2x hogere NO₃-concentraties in het drainagewater, lijkt het er op dat we met deze balansbenadering de totale emissie naar grond- en oppervlaktewater ongeveer een factor 2 onderschatten.

Uit de zeer lage P-concentraties in het drainagewater blijkt dat er geen P-uitspoeling plaatsvindt (Tabel 2.8). De berekende afname in de bodemvoorraad P is haast gelijk aan het overschot in het voorgaande jaar (zie Tabel 2.8).

Evaluatie balansen

De water- en stoffenbalansen laten op jaarbasis grote onzekerheden zien (de Vos *et al.*, 2006). De maximale fout van de waterbalans ligt in de orde van grootte van 130 mm. Voor de stikstofbalans is de maximale fout in de orde van grootte van 80 kg N/ha en voor de fosforbalans in de orde van grootte van 4 kg P/ha. Dit betekent dat uit de sluitposten van de balans geen verschillen tussen de percelen ten gevolge van vernatting afgeleid kunnen worden. Wel geven de balansen goed inzicht in de orde van grootte en het belang van de verschillende posten. Vooral de onduidelijkheid in denitrificatiesnelheid maakt het onzeker of lagere NO₃-concentraties op grotere diepte in het grondwater het gevolg hiervan zijn of dat er door grondwaterstroming verdunning optreedt. Ook specifiek onderzoek naar denitrificatie op Vredepeel (Zwart, 2003; en van Groeningen *et al.*, 2006) heeft hier nog geen sluitend antwoord op kunnen geven. Wel is het duidelijk dat voor het begrijpen van de nutriëntenbalansen een nauwkeurige waterbalans noodzakelijk is.

2.2.6 Milieukundige gevolgen vernatting

Vernatten door het opzetten van slootwaterpeilen van een akkerbouwperceel te Vredepeel resulteert in infiltratie van een grote hoeveelheid water van 250-330 mm/jaar in de goed doorlatende bodem. Het grootste gedeelte van dit water wordt via verticale en laterale grondwaterstroming afgevoerd en komt dus niet direct ten goede aan gewasgroei. De hoeveelheid infiltratiewater is van dezelfde orde van grootte als het gemiddelde neerslagoverschot. Dit betekent dat op het vernatte perceel de kwaliteit van het grondwater sterk beïnvloed wordt door de hoeveelheid en kwaliteit van het infiltrerende water. Het infiltratiewater had een gemiddelde concentratie van circa 20 mg NO₃/l en 0,4 mg PO₄-P/l. Dit betekent wat NO₃ betreft dat relatief schoon slootwater infiltreert en dit water wordt gemengd met het relatief NO₃-rijke water afkomstig uit het perceel. Dit leidt tot een lage NO₃-concentratie in het diepere grondwater door verdunning. Met het slootwater worden relatief hoge concentraties PO₄ aangevoerd, wat tot een toename van de PO₄-concentraties in het grondwater leidt, aangezien uit de resultaten van perceel 39 (normaal peil) blijkt dat er nauwelijks PO₄ uit het bodemprofiel uitspoelt. Het infiltrerende PO₄ zal echter weer relatief snel in de ondergrond vastgelegd worden.

De percelen 38 (hoog peil) en 39 (normaal peil) zijn in de bouwvoor (0-30 cm diepte) fosfaatverzadigd, maar op grotere diepte (nog) niet. Fosfaat dat uit de bovengrond naar grotere diepten wordt getransporteerd, wordt daar weer vastgelegd. Dit is consistent met de lage PO₄-P-concentraties die in het drainagewater van perceel 39 (normaal peil) zijn gemeten. Het infiltrerende slootwater in perceel 38 (hoog peil) zorgt er wel voor dat daar PO₄-P-concentraties in het grondwater hoger worden, maar de verwachting is dat deze P vervolgens weer wordt vastgelegd. De bewortelingsdiepte van beide gewassen is op perceel 39 (normaal) peil groter dan op

perceel 38 (hoog peil). Dit wijst op een betere vocht- en P-beschikbaarheid op perceel 38 (hoog peil), waardoor de wortels zich minder diep ontwikkelen.

De geschatte stikstofverliezen naar grond- en oppervlaktewater zijn aanzienlijk en variëren voor aardappel in 2003 van 105 kg N/ha voor perceel 39 (normaal peil) tot 141 kg N/ha voor perceel 38 (hoog peil). Voor maïs in 2004 tussen 28 kg N/ha voor perceel 38 (hoog peil) tot 43 kg N/ha voor perceel 38 (normaal peil). Deze schattingen zijn echter erg onzeker, gezien de grote onzekerheden in de stikstofbalansberekeningen. Op perceel 39 (normaal peil) liggen gemeten NO_3 -concentraties in grond- en drainagewater rond de 100 mg NO_3/l ; een factor 2 boven de EU-norm van 50 mg NO_3/l . Op perceel 38 (hoog peil) wordt het stikstofoverschot sterk verdund met relatief schoon infiltratiewater waardoor de geschatte NO_3 -concentraties variëren tussen de 50-100 mg NO_3/l , de enkele grondwatermetingen geven echter concentraties rond de 100 mg NO_3/l aan.

3 Vernattingsinstrumentarium

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van een aantal modellen die in aanmerking komen om als basis te dienen voor het vernattingsinstrumentarium om de effecten van een veranderend grondwaterregime op de nutriëntenemissie naar grond- en oppervlaktewater te berekenen. We zullen kort een samenvatting geven van de uitgebreide analyse van Vreman (2005), de keuze voor een model maken en vervolgens het model toepasbaar maken voor vernattingssituaties. We laten enkele voorbeelden zien van grondwaterstandsverhoging (vernatting) op de nutriëntenemissie voor een zand-, veen- en kleigrond bij een gegeven stikstof- en fosfaatoverschot. De resultaten van het instrumentarium worden vergeleken met meetgegevens van Vredepeel. De algemene toepasbaarheid van het instrumentarium wordt vervolgens kritisch beschouwd.

3.1 Evaluatie bestaande modellen nutriëntenverliezen

STONE (Schoumans *et al.*, 2002); INITIATOR (Kros *et al.*, 2002); de module “Waterkwaliteit in Waternood” (Aalderink *et al.*, 2003); en het “Metamodel landbouwgronden” (Mol-Dijkstra *et al.*, 1999) zijn modellen waarmee de nutriëntenverliezen naar grond- en/of oppervlaktewater kunnen worden berekend. De modellen zijn ontwikkeld met een verschillend doel. STONE berekent de uitspoeling van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater op regionale schaal. INITIATOR berekent de aan- en afvoer van stikstof in landbouwgronden op jaarbasis. De module Waterkwaliteit in Waternood berekent de grond- en oppervlaktewaterkwaliteit bij verandering op basis van de hydrologie en het landgebruik, bij één stikstof- en fosfaatoverschot. Het “Metamodel landbouwgronden” van Mol-Dijkstra *et al.* (1999) gebruikt regressievergelijkingen op basis van regionale modeluitkomsten om nutriëntenconcentraties te voorspellen, en gebruikt daarbij grondwatertrappen en stikstof- en fosfaatoverschot als invoer. De modellen hebben verschillende ruimtelijke en temporele schalen, gebruiken verschillende invoergegevens en zijn in meer of mindere mate geschikt voor het berekenen van de nutriëntenbelasting van grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden. In Tabel 3.1 zijn per model de temporele en ruimtelijke schaal, de in- en uitvoer en de toepasbaarheid bij vernatting aangegeven.

Tabel 3.1 De ruimtelijke en temporele schaal, de in- en uitvoer en de toepasbaarheid om de nutriëntenbelasting van landbouwgronden bij vernatting te berekenen voor de modellen STONE, INITIATOR, “Waterkwaliteit in Waternood (W in W)” en “Metamodel landbouwgronden”

Model	Temporele schaal	Ruimtelijke schaal (ha)	Invoer-data	Uitvoer	Toepasbaarheid bij vernatting	Beoordeling
STONE	Jaar (of minder)	>25	Veel	In-, uit- en afspoeling van N en P naar grond- en oppervlaktewater	Redelijk toepasbaar, het model is complex door de grote hoeveelheid invoer, dit veroorzaakt bijvoorbeeld lange rekentijden	++
INITIATOR	Jaar	>25	Matig	Concentratie N in oppervlaktewater	Slecht toepasbaar om vernattingsvarianten mee door te rekenen	+
Waterkwaliteit in Waternood	Kwartaal	>6,25	Matig	Concentraties/ vrachten N en P in en naar oppervlaktewater	Goed toepasbaar om vernattingvarianten mee door te rekenen voor concentraties in oppervlaktewater. Berekend geen concentraties voor grondwater	++
Metamodel landbouwgronden	Jaar	>6,25	Beperkt	Nitraatconcentraties grondwater en N- en P-vrachten naar oppervlaktewater	Een goed instrument om bemestingsvarianten mee door te rekenen, kan toepasbaar worden gemaakt voor vernattingsvarianten	+++

De doelstelling van ons project is een eenvoudig instrumentarium te ontwikkelen waarmee de nutriëntenverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden bepaald kan worden. Uit Tabel 3.1 blijkt dat INITIATOR slecht toepasbaar is om vernattingsvarianten met betrekking tot de nutriëntenbelasting van landbouwgronden door te rekenen. De ruimtelijke schaal is te groot, waardoor het niet geschikt is om voor een perceel toe te passen. Het ANIMO-gedeelte uit STONE is wel toepasbaar op perceelschaal, maar voor het gebruik zijn veel invoergegevens nodig en is de hulp van een expert nodig. STONE is te complex om als eenvoudig instrumentarium te gebruiken. De module Waterkwaliteit in Waternood is wel goed toepasbaar voor vernattingsvarianten, maar kent maar één bemestingsscenario. In het STOWA-rapport (Aalderink *et al.*, 2003) worden N- en P-concentraties in het oppervlaktewater berekend. De grondwaterkwaliteit wordt daarentegen niet beschreven. Het “Metamodel landbouwgronden” van Mol-Dijkstra *et al.* (1999) is geschikt om bemestingsvarianten door te rekenen. Door het variëren van de grondwatertrappen kan het model toepasbaar worden gemaakt voor het berekenen van verschillende vernattingsvarianten. Wij hebben daarom besloten om het bestaande instrumentarium “Metamodellen landbouwgronden” (Mol-Dijkstra *et al.*, 1999) toepasbaar te maken.

3.2 Waterkwaliteitsinstrumentarium vernatting landbouwgronden

De basis van “Metamodellen landbouwgronden” zijn regressievergelijkingen, die zijn afgeleid van simulatieberekeningen met complexe waterstromings- en nutriëntendynamiek- en gewasgroeimodellen. De regressievergelijkingen geven een gemiddeld resultaat voor een simulatieperiode van 15 jaren. Vreman (2005) heeft deze regressievergelijkingen verwerkt in een Excel-spreadsheet waarmee snel en eenvoudig de effecten van vernatting te berekenen en zichtbaar te maken zijn. Een uitgebreide beschrijving van de in- en uitvoer van het model geeft Vreman (2005). Eerst dient een keuze gemaakt te worden uit 21 bodemtypen en 4 vormen van landgebruik: gras, akkerbouw, maïs of natuur. De (variabele) invoer voor het model “Waterkwaliteitsinstrumentarium vernatting landbouwgronden” is samengevat in Tabel 4.3, en karakteriseert de hydrologische, meteorologische en nutriëntenstatus van bodem en diep grondwater. Vernatting wordt ingevoerd als een toename in de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG).

Tabel 3.2 Invoervariabelen en eenheden voor het model “Metamodellen landbouwgronden” (Mol-Dijkstra et al., 1999) en “Waterkwaliteitsinstrumentarium vernatting landbouwgronden” (Vreman, 2005)

Invoer	Eenheid
GHG	m-mv
Neerslag overschot	mm/j
N-Overschot	kg/ha/j
Netto kwel	mm/j
N-Kwelflux	kg/ha/j
P-Kwelflux	kg/ha/j
P-Overschot	kg/ha/j
Kwel op 7 m-mv	mm/j
Wegzijging op 7 m-mv	mm/j
P-Voorraad tot 1 m-mv	ton/ha

Het invoerscherm van Vreman (2005) (Fig. 3.1) heeft de mogelijkheid om de GHG van de huidige hydrologische toestand (GHG-huidig) en in de nieuwe toekomstige vernatte situatie (GHG-nieuw) in te vullen. Het instrumentarium geeft dan, na het invullen van alle andere velden, de verschillen in nitraatconcentratie in het grondwater, en de stikstof- en fosfaatbelasting van het oppervlaktewater.

Invoerscherm

Keuze invoer

Bodentype: Podzolgrond/zwak lemig, fijn zand/op keileem of leem

Landgebruik: Mais

Variabele invoer

GHG-huidig	0,6	m -mv	P-kwelflux	0,81	kg/ha/j
GHG-nieuw	0,4	m -mv	P-overschot	8,31	kg/ha/j
Neerslag overschot	275	mm/j	Kwel	150	mm/j
N-overschot	60	kg/ha/j	Wegzijging	77,5	mm/j
Netto kwel	73,3	mm/j	P-voorraad	5,5	ton/ha/j
N-kwelflux	7,51	kg/ha/j			

Ok Annuleren

Copyright Alterra Wageningen 2005

Figuur 3.1 Invoerscherm “Waterkwaliteitsinstrumentarium landbouwgronden” (Vreman, 2005)

3.3 Nutriëntenverliezen bij vernatting van zand-, veen- en kleigrond

We laten nu enkele illustratieve voorbeelden zien van de toepassing van het instrumentarium op een veen-, zand- en kleigrond. Er is gekozen voor enkele veel voorkomende gronden in Nederland: veengrond met een veraarde bovengrond en

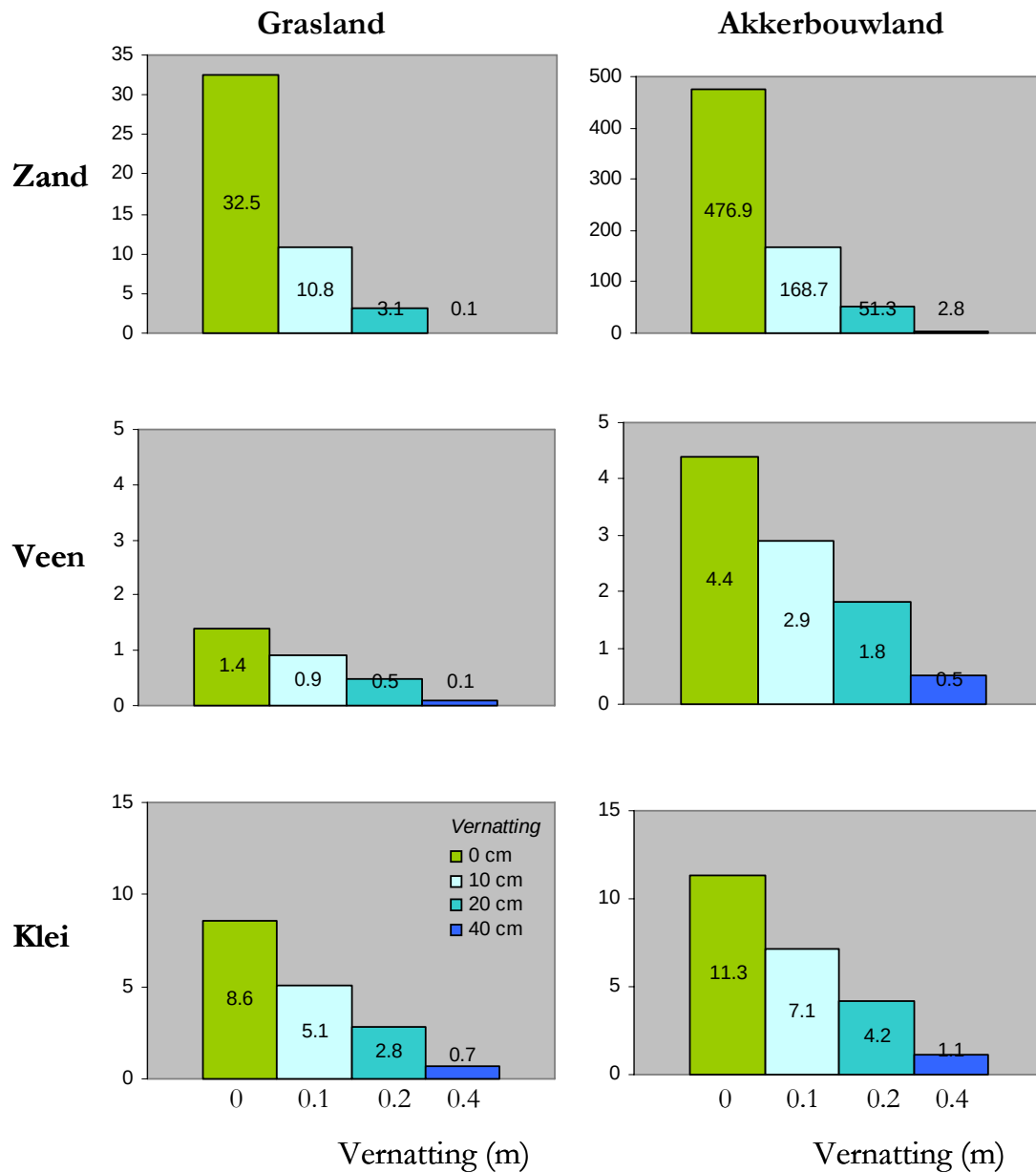
een zand ondergrond (bodemtype 2); podzolgrond in grof zand (bodemtype 14); en kleigrond met zware tussenlaag of ondergrond (bodemtype 17). Om de voorbeelden goed onderling te kunnen vergelijken wordt voor de variabele invoer (Fig. 3.1) dezelfde waarden voor alle grondsoorten gekozen, waarbij de invoer veelal gebaseerd is op de gemiddelde waarden die Mol-Dijkstra *et al.* (1999) voor Nederland hebben berekend (Tabel 3.3).

Tabel 3.3 Invoer voor de vergelijking tussen veen-, zand- en kleigrond, veelal gebaseerd op gemiddelden berekend door Mol-Dijkstra et al. (1999) voor Nederland

Invoer		
GHG-huidig	0,4	m-mv
GHG-nieuw	0,6	m-mv
Neerslag overschot	275	mm/j
N-Overschot	100	kg/ha/j
Netto kwel	73	mm/j
N-Kwelflux	7,5	kg/ha/j
P-Kwelflux	0,8	kg/ha/j
P-Overschot	8,5	kg/ha/j
Kwel op 7 m -mv	70	mm/j
Wegzijing op 7 m mv	0	mm/j
P-Voorraad tot 1 m -mv	5,5	ton/ha

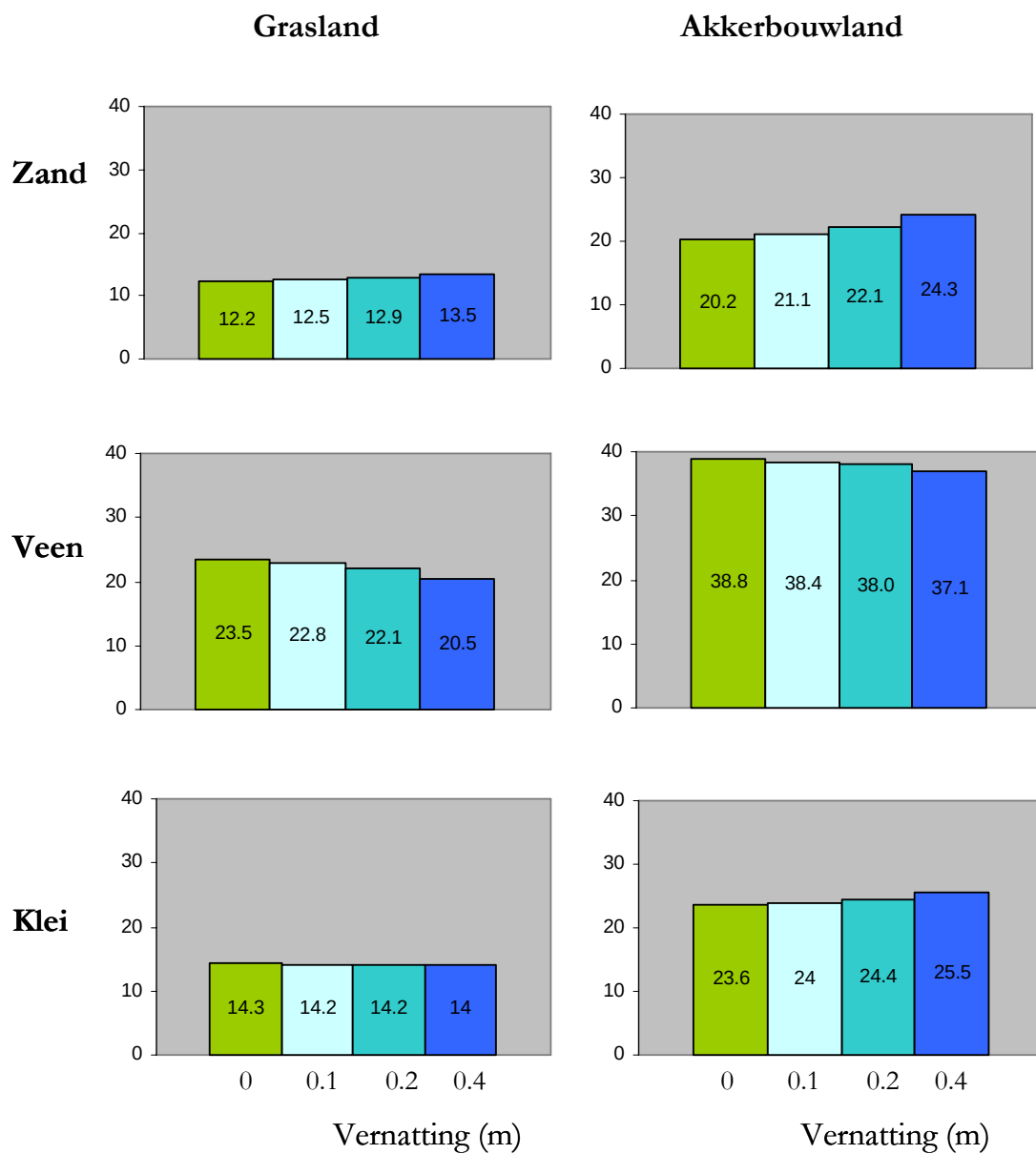
De gevolgen van vernatting zijn berekend via een verhoging van de GHG van 0; 0,10; 0,20 en 0,40 m ten opzichte van de huidige GHG van 0,4 m-mv voor respectievelijk de nitraatconcentratie in het grondwater (Figuur 3.2), de stikstofbelasting van het oppervlaktewater (Figuur 3.3) en de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater (Figuur 3.4). Er is onderscheid gemaakt tussen grasland en akkerbouwland. In de onderliggende modellen is een standaard landgebruik (grasland, akkerbouw) en één bemestingsregime verondersteld, waarbij uiteindelijk alleen de netto bodembelasting met nutriënten wordt gebruikt.

Nitraatconcentratie grondwater (mg/l)



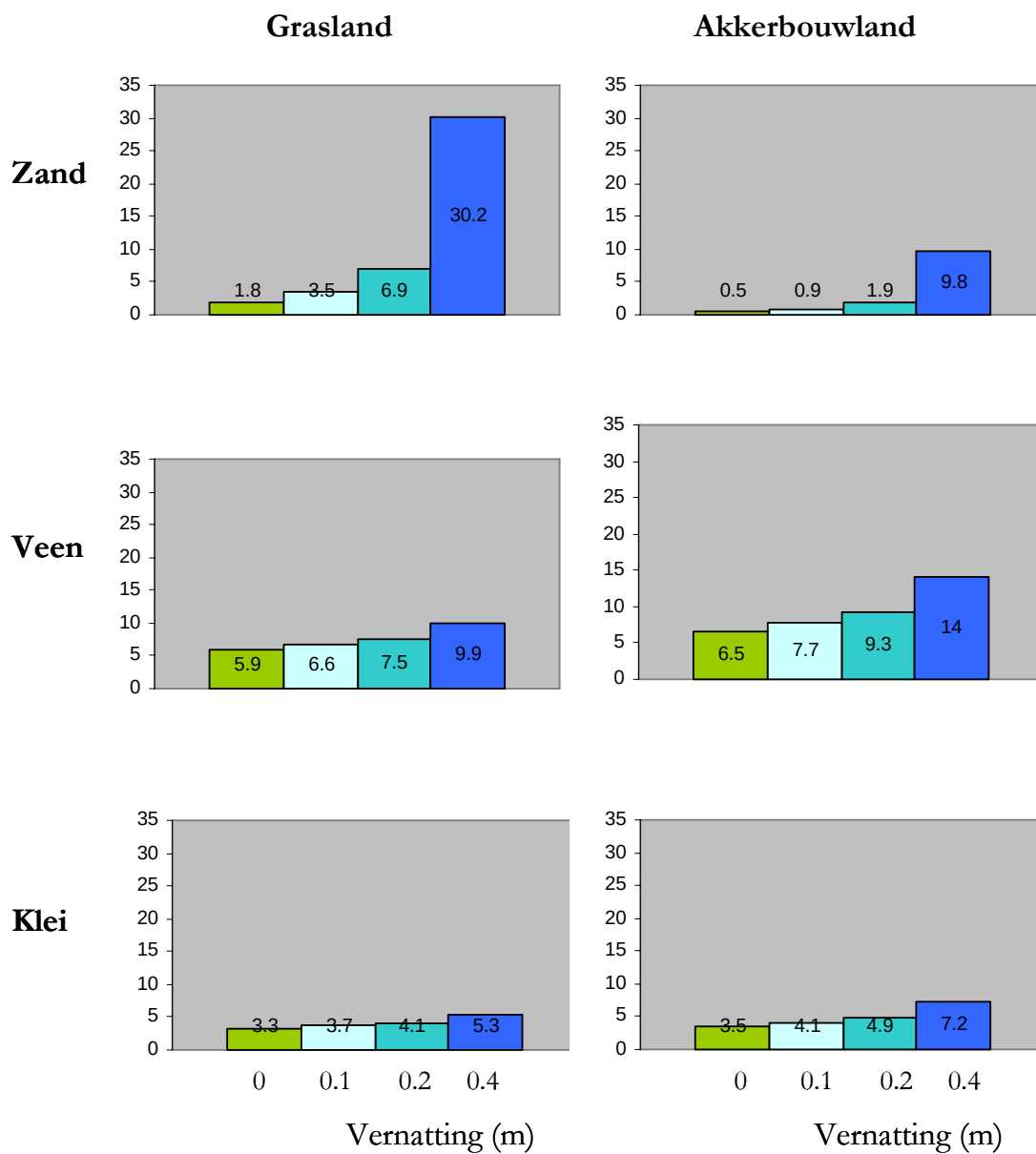
Figuur 3.2 Nitraatconcentraties in het grondwater (mg NO₃/l) voor grasland en akkerbouwland op een zand-, veen-, en kleigrond voor 4 vernattingsvarianten bij een GHG van 0,4 m-mv en een N-overschot van 100 kg N/ha/j berekend met het "Waterkwaliteitsinstrumentarium vernatting landbouwgronden". Let op: de verticale schaalverdeling verschilt tussen de grafieken

Stikstofbelasting oppervlaktewater (kg N/ha/jaar)



Figuur 3.3 Stikstofbelasting van het oppervlaktewater voor grasland en (akker)bouwland op een veen-, zand- en kleigrond voor 4 vernattingsvarianten bij een GHG van 0,4 m-mv en een N-overschot van 100 kg N/ha/j berekend met het "Waterkwaliteitsinstrumentarium vernatting landbouwgronden"

Fosfaatbelasting oppervlaktewater (kg P/ha/jaar)



Figuur 3.4 Fosfaatbelasting van het oppervlaktewater voor grasland en (akker)bouwland op een veen-, zand- en kleigrond voor 4 vernattingsvarianten bij een GHG van 0,4 m-mv en een P-overschot van 8,5 kg P/ha/j berekend met het "Waterkwaliteitsinstrumentarium vernatting landbouwgronden"

Nitraatconcentraties in het grondwater nemen voor alle grondsoorten en bij grasland en akkerbouw af bij vernatting (Figuur 3.3), wat verklaard wordt door de toename van denitrificatie. De afname is het grootst voor zandgrond. Stikstofbelasting van het oppervlaktewater wordt maar weinig beïnvloed door vernatting (Figuur 3.4). De toename van N-afvoer door verandering van transportroutes van het water en opgeloste stoffen via ondiepere stroombanen en een afname van de nitraatconcentratie door denitrificatie heffen elkaar op. De fosfaatbelasting van het oppervlaktewater neemt sterk toe bij vernatting (Figuur 3.5). Vooral op zandgronden die een beperkte fosfaatadsorptie hebben, gaat bij een forse vernatting fosfaat in oplossing en neemt de uitspoeling naar het oppervlaktewater toe.

Bij de interpretatie van bovenstaande resultaten moet wel opgemerkt worden dat de hier beschreven vernattingsvarianten, bijvoorbeeld 0,4 m vernatting bij GHG van 0,6 m-mv, geen reële landbouwkundige situaties beschrijven. Dit betekent ook dat de gebruikte regressievergelijkingen (Mol-Dijkstra *et al.*, 1999) buiten het bereik komen waarvoor zij zijn afgeleid. Er vindt extrapolatie plaats naar gebieden waarvoor de oorspronkelijke modeluitkomsten niet zijn berekend. Tevens is bij dergelijke natte condities geen akkerbouw meer mogelijk. De resultaten in het natte gebied moeten daarom worden geïnterpreteerd als trend in plaats van waarde te hechten aan de absolute uitkomsten.

3.4 Toepasbaarheid vernattingsinstrumentarium

Het vernattingsinstrumentarium is afgeleid op basis van regionale berekeningen door Mol-Dijkstra *et al.* (1999) met de toentertijd beschikbare hydrologische en agronomische gegevens. Het instrumentarium kan worden toegepast om snel een indruk te krijgen wat de regionale gevolgen van een verhoging van de gemiddeld hoogste grondwaterstand betekent. De resultaten geven gemiddelden weer voor een periode van 15 jaar. Vooral onder nattere omstandigheden met de GHG dicht bij het maaiveld, zullen echter de enkele extreme waarden belangrijk worden en kunnen er naast milieukundige problemen ook agronomische problemen ontstaan. Zo wordt de berijdbaarheid en bewerkbaarheid van de bodem een probleem onder natte omstandigheden. Vooral de natte kant van het regressiemodel en dus het vernattingsinstrumentarium kan snel buiten het gebied komen waarvoor het is afgeleid. In de Excel-versie van het vernattingsinstrumentarium wordt hiervoor een waarschuwing gegeven.

Vreman (2005) heeft getracht ook de situatie op Vredepeel (veldschaal) door te rekenen met het vernattingsinstrumentarium. Het lastige is om voor de korte proefperiode een goede schatting te maken van de GHG. Tevens is er in onze experimenten berekening (normaal en hoog peil) en subirrigatie (hoog peil) toegepast, wat niet vertaald kan worden naar invoer voor het vernattingsinstrumentarium. De conclusie is dan ook dat het vernattingsinstrumentarium niet geschikt is om voor individuele percelen de effecten van vernatting te schatten. Het instrumentarium kan alleen met de nodige voorzichtigheid op regionale schaal worden ingezet om de trends in

nutriëntenbelasting in te schatten. Het verdient aanbeveling om de regressievergelijkingen die in het verleden door Mol-Dijkstra *et al.* (1999) zijn afgeleid te actualiseren met de recentste hydrologische en agronomische gegevens. Het STOWA-instrumentarium waterkwaliteit (Aalderink *et al.*, 2003) is daarvan een voorbeeld, echter met slechts één bemestingsniveau.

4 Conclusies

4.1 Vernatting in en rond de Ecologische Hoofdstructuur

In 1985 is de omvang van verdroogde natuur (Ecologische Hoofdstructuur) geschat op 600.000 hectare. In 2000 was dit nog circa 492.000 hectare. Het totale oppervlakte netto-EHS dat op dit moment in aanmerking komt voor vernatting is berekend op ruim 1,5 miljoen hectare. Aan de hand van de vernattingskaart is berekend dat circa 675.000 ha van de netto-EHS goede mogelijkheden biedt om vernat te worden. Daarnaast ligt ongeveer 529.000 hectare landbouwgrond binnen de te vernatten netto-EHS en komt daardoor in aanmerking voor vernatting.

4.2 Veulen en Vredepeel 2000-2004

In de akkerbouwexperimenten op Veulen en Vredepeel in 2000-2004 is een vernatting gerealiseerd die resulteerde in een gemiddelde grondwaterstandsverhoging in het groeiseizoen van circa 110 naar 75 cm-mv. Bij stikstofbemesting volgens advies heeft deze vernatting geen effect op de opbrengsten en productkwaliteit.

Deze vernatting leidt bij stikstofbemesting volgens advies gemiddeld tot 6 kg/ha lagere N-afvoer en 0,5 kg/ha hogere P-afvoer met het gewas. Er is daarbij 7 kg/ha minder minerale N in de bodemlaag 0-90 cm teruggevonden, evenredig verdeeld over de bodemlagen. Bij het hoge peil wordt een gemiddelde (Vredepeel en Veulen, 2000-2004) NO_3 -concentratie in het bovenste grondwater gevonden van 124 mg NO_3 /l en bij hoog peil van 66 mg NO_3 /l. Bij normaal laag peil is de gemiddelde (Vredepeel en Veulen, 2000-2004) totaal-P concentraties bij 0,12 mg P/l en bij hoog peil 0,18 mg P/l.

4.3 Vredepeel 2003-2005

Vernatten van een akkerbouwperceel te Vredepeel, door het opzetten van slootwaterpeilen, resulteert in infiltratie van een grote hoeveelheid water van 250-330 mm/jaar in de goed doorlatende bodem. Het grootste gedeelte van dit water wordt via verticale en laterale grondwaterstroming afgevoerd en komt dus niet direct ten goede aan gewasgroei. Bij vernatting op een groter ruimtelijk schaalniveau of bij een minder waterdoorlatende bodem zullen de laterale waterverliezen sterk afnemen. De hoeveelheid infiltratiewater is van dezelfde orde van grootte als het gemiddelde neerslagoverschot. Dit betekent dat op het vernatte perceel de kwaliteit van het grondwater sterk beïnvloed wordt door de hoeveelheid en kwaliteit van het infiltrerende water. Het infiltratiewater had een gemiddelde concentratie van circa 20 mg NO_3 /l en 0,4 mg PO_4 -P/l. Dit betekent wat NO_3 betreft dat relatief schoon slootwater infiltreert en dit water wordt gemengd met het relatief NO_3 -rijke water afkomstig uit het perceel. Dit leidt tot een lage NO_3 -concentratie in het diepere

grondwater door verdunning. Met het slootwater worden relatief hoge concentraties PO_4 aangevoerd, wat tot een verhoging van de PO_4 -concentraties in het grondwater leidt, aangezien uit de resultaten van perceel 39 (normaal peil) blijkt dat er nauwelijks PO_4 uit het bodemprofiel uitspoelt. Het infiltrerende PO_4 zal echter weer relatief snel in de ondergrond vastgelegd worden. Toch kan het infiltrerende water een belangrijke reden zijn voor de verhoogde PO_4 -concentraties zoals die in het grondwater zijn gemeten door Alblas *et al.* (2003). Het moment van bemonstering en de positie ten opzichte van de drain waaruit het water infiltreert kunnen in dit geval sterk bepalend zijn voor de gevonden concentraties.

Berekening

Vernatting heeft in het droge groeiseizoen 2003 geleid tot 80 mm minder berekening op perceel 39 (hoog peil) (75 mm) ten opzichte van perceel 39 (normaal peil) (155 mm). De netto aardappelopbrengst met 80 ton/ha was voor beide percelen gelijk, maar perceel 39 (normaal peil) had een 13% hogere N-gewasopname en perceel 38 (hoog peil) een 9% hogere P-gewasopname. Dit wijst er op dat door periodieke berekening vooral de N-beschikbaarheid in de bovengrond wordt verhoogd, en dat door permanente vernatting de beschikbaarheid van het weinig mobiele P ook al in het begin van de groeiperiode wordt verhoogd. Een hoge P-beschikbaarheid in het begin van het groeiseizoen bevordert de wortelgroei en daarmee uiteindelijk ook weer de nutriëntenopname. In 2004 zijn deze verschillen niet gevonden, maar het verschil in grondwaterstand tussen beide percelen was toen gering.

Water- en stoffenbalansen

De water- en stoffenbalansen laten op jaarbasis grote onzekerheden zien. De maximale fout van de waterbalans ligt in de orde van grootte van 130 mm. Voor de stikstofbalans is de maximale fout in de orde van grootte van 80 kg N/ha en voor de fosforbalans in de orde van grootte van 4 kg P/ha. Dit betekent dat uit de sluitposten van de balans geen verschillen tussen de percelen ten gevolge van vernatting afgeleid kunnen worden. Wel geven de balansen goed inzicht in de grootte en het belang van de verschillende posten. Vooral de onduidelijkheid in het optreden van denitrificatie maakt het onzeker of lagere NO_3 -concentraties op grotere diepte in het grondwater het gevolg hiervan zijn of dat er door grondwaterstroming verdunning optreedt. Ook specifiek onderzoek naar denitrificatie op Vredepeel (Zwart, 2003; en van Groeningen *et al.*, 2006) heeft hier nog geen sluitend antwoord op kunnen geven. Wel is het duidelijk dat voor het begrijpen van de nutriëntenbalansen een nauwkeurige waterbalans noodzakelijk is.

Fosfaatuitspoeling

De percelen 38 (hoog peil) en 39 (normaal peil) zijn in de bouwvoor (0-30 cm diepte) fosfaatverzadigd, maar op grotere diepte (nog) niet. Fosfaat dat uit de bovengrond naar grotere diepten wordt getransporteerd, wordt daar weer vastgelegd. Dit is consistent met de lage PO_4 -P-concentraties die in het drainagewater van perceel 39 (normaal peil) zijn gemeten. Het infiltrerende slootwater in perceel 38 (hoog peil) zorgt er wel voor dat daar PO_4 -P-concentraties in het grondwater hoger worden, maar de verwachting is dat deze P vervolgens weer wordt vastgelegd.

Nitraatuitspoeling

De geschatte stikstofverliezen naar grond- en oppervlaktewater zijn aanzienlijk en variëren voor aardappel in 2003 van 105 kg N/ha voor perceel 39 (normaal peil) tot 141 kg N/ha voor perceel 38 (hoog peil). Voor maïs in 2004 tussen 28 kg N/ha voor perceel 38 (hoog peil) tot 43 kg N/ha voor perceel 38 (normaal peil). Deze schattingen zijn echter erg onzeker, gezien de grote onzekerheden in de stikstofbalansberekeningen. Op perceel 39 (normaal peil) liggen de gemeten NO₃-concentraties in grond- en drainagewater rond de 100 mg NO₃/l; een factor 2 boven de EU-norm van 50 mg NO₃/l. Op perceel 38 (hoog peil) wordt het stikstofoverschot sterk verdund met relatief schoon infiltratiewater waardoor de geschatte NO₃-concentraties variëren tussen de 50-100 mg NO₃/l, de grondwatermetingen geven echter concentraties rond de 100 mg NO₃/l aan.

4.4 Vernattingsinstrumentarium

Het waterkwaliteitsinstrumentarium “Vernatting landbouwgronden” kan op basis van metamodellen gemiddelde nitraatconcentraties in het grondwater, de N- en P-afvoer en de N- en P-concentraties naar het oppervlaktewater voorspellen. Dit kan op regionale schaal bij een bepaalde nutriëntenbelasting en bij verschillende grondwaterstanden. Het is belangrijk dat de toepassing binnen het bereik van de oorspronkelijke metamodellen blijft waarop de relaties (Mol-Dijkstra *et al.*, 1999) zijn gebaseerd.

Voor het zoete water in Nederland zijn momenteel de P- en N-concentraties in het grond- en oppervlaktewater veelal te hoog. Door vernatting zullen in het algemeen P-concentraties in het grond- en oppervlaktewater toenemen door het in oplossing gaan van P. Tevens zal door vernatting in verhouding meer nitraat naar het oppervlaktewater dan naar het grondwater uitspoelen, door een verandering van de transportroutes in de bodem naar het oppervlaktewater. Door hogere denitrificatie kunnen bij vernatting nitraatconcentraties in het grondwater afnemen.

Literatuur

- Aalderink, R.H., P.J.T. van Bakel, M.A. Bastiaanssen, C. Drost, P. Goedhart, R.A. Nieuwenhuis, O. Oenema, M.R.L. Ouboter, O. Schoumans, 2003. STOWA, Waterkwaliteit in Waternood.
- Ablas, J., H.A.G. Verstegen en G. Weijers, 2003. Verslag Peilverhoging, PPO-rapport nr. 5123216, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Lelystad.
- Bolt, F.J.E. van der, H. van den Bosch, Th.C.M. Brock, P.J.G.J. Hellegers, C. Kwakernaak, T.P. Leenders, O.F. Schoumans en P.F.M. Verdonschot, 2003. AQUAREIN; Gevolgen van de Europese Kaderrichtlijn Water voor landbouw, natuur, recreatie en visserij. Alterra-rapport 835.
- Clevering, O.A., J. Alblas, G. Weijers, H.A.G. Verstegen en M.M. van der Werff, 2006. Agronomische gevolgen van peilverhoging. Resultaten van vijf jaar praktijkonderzoek (2000-2004) naar de gevolgen van peilverhoging voor beregenen, nutriëntenbeschikbaarheid en gewasopbrengsten in de akkerbouw. PPO-rapport 510183, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Lelystad.
- EU, 1980. Richtlijn van de raad van 15 juli 1980 betreffende de kwaliteit van het voor menselijke consumptie bestemd water. Richtlijn 80/778/EEG. Brussel: Europese Gemeenschap.
- EU, 2000. Richtlijn van de raad tot vaststelling van een kader voor de communautaire maatregelen betreffende het waterbeleid. Brussel: Europese Gemeenschap.
- Gaast J.W.J. van der, P.J.T. van Bakel en H.Th.L. Massop, 2003. Waterkansen in het SGR2. Evaluatie van de wateropgaven in relatie tot de Netto-EHS, Alterra-rapport 558.1.
- Groenigen, J.W. van, C. van Kessel, C., K.B. Zwart, J.A. de Vos, and G.L. Velthof, 2006. Two-year recovery and nitrate leaching of 15N labeled fertilizer on a sandy potato field. Nutr. Cycl. Agroecosyst. (in prep.).
- IPO/RIZA, 1994. Inventarisatie van verdroogde gebieden 1994. Interprovinciaal Overleg/Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, Den Haag.
- IPO/RIZA, 1996. Inventarisatie van verdroogde gebieden 1996. Interprovinciaal Overleg/Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, Den Haag.
- IPO/RIZA, 1998. Inventarisatie van verdroogde gebieden 1998. Interprovinciaal Overleg/Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, IPO publicatie nr 117, Den Haag.
- IPO/RIZA, 2000. Inventarisatie van verdroogde gebieden 2000. Interprovinciaal Overleg/Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, IPO publicatie nr 145, Den Haag.
- Kros, J., W. de Vries en O. Oenema, 2002. Bepaling van provinciale stikstofplafonds; integrale afweging van effecten van het mest- en ammoniakbeleid. Alterra-rapport 417.
- LNV, 1990. Natuurbeleidsplan. Regeringsbeslissing. Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Den Haag.

- LVN, 2002. Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit, Structuurschema Groene Ruimte 2. Samen werken aan groen Nederland. Ministerie van LVN, Den Haag.
- Meijer, H.J., 1968. Enkele resultaten van het grondwaterstandsproefveld Pr 657 op perceel 7. Verslag over de jaren 1961 t/m 1965. Vereniging tot exploitatie van proefbedrijven in de klei- en zavelstreken van de provincie Groningen.
- Mol-Dijkstra, J.P., W. Akkermans, C.W.J. Roest en M.J.W. Jansen, 1999. Metamodellen voor effecten van N- en P-belasting op de grond- en oppervlaktewaterkwaliteit. DLO-Staring Centrum, Wageningen, technisch document 61.
- NMP 4, 2001. Nationaal Milieubeleidsplan 4. SDU Den Haag
- OSPAR, 2001. The Common Procedure for the Identification of the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area; OSPAR EUC 01/2/1.
- PPO, 2003. Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen. PPO 307. Lelystad
- Rijn, van B.W.F., 2004. Hydrologische en milieukundige gevolgen bij vernatting van landbouwgronden. Afstudeerscriptie Hogeschool INHOLLAND Alkmaar.
- RIVM, 2002. MINAS en milieu; balans en verkenning. RIVM, Bilthoven
- RIVM, 2005. Milieubalans 2005. Milieu- en Natuurplanbureau. RIVM, Bilthoven
- RIZA, 2005. Aard, ernst en omvang van watertekorten in Nederland. RIZA-rapport 2005-016. Lelystad.
- Schoumans, O.F., J. Roelsma, H.P. Oosterom, P. Groenendijk, J. Wolf, H. van Zeijts, G.J. van den Born, S. van Tol, A.H.W. Beusen, H.F.M. ten Berge, H.G. van de Meer en F.K. van Evert, 2002. Nutriëntenemissie vanuit landbouwgronden naar het grondwater en oppervlaktewater bij varianten van verliesnormen. Modelberekeningen met STONE 2.0. Clusterrapport 4: Deel 1. Alterra-rapport 552.
- Smit, A. en K.B. Zwart, 2003. Stikstofstromen op de kernbedrijven Meterik en Vredepeel; mineralisatie van bodem en gewasresten. Plant Research International, Telen met toekomst-rapport OV 0304.
- Vos, J.A. de, O.A. Clevering, F.P. Sival, J. Alblas, N. Reijers en H. van Reuler, 2003. De invloed van de waterhuishouding op stikstof- en fosfaatverliezen in open teelten, Alterra-rapport 596.
- Vos, J.A. de en F.B.T. Assinck, 2004. Nitraatuitspoeling Vredepeel 2002-2003. Telen met Toekomst-rapport OV 0406, 2004. Plant Research International, Wageningen.
- Vos, J.A. de, F.P. Sival, O.A. Clevering en J. van Kleef, 2006. Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden. Veldexperimenten Vredepeel 2003-2005. Alterra-rapport, Wageningen (in voorbereiding).
- Vreman, B.J.A.F., 2005. Nutriëntenbelasting van grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden. Afstudeerrapport Hogeschool Larenstein, Velp.
- VROM, 1997 3e Nationaal Milieubeleidsplan. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag.
- Walle, F.B. and J. Sevenster, 1998. Agriculture and the Environment: minerals, manure and measures. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Zwart, K.B., 2003. Denitrificatie in de bouwvoor en de ondergrond; resultaten van metingen in 13 profielen tot 2 m diep. Alterra-rapport 724.