

Bepaling van de hoeveelheid minerale stikstof in de bodem als beleidsinstrument (besteknr 2000/1)

N-(eco)²

SAMENVATTING

aangeboden door het consortium bestaande uit

- **Bodemkundige Dienst van België**
- **Instituut voor Land- en Waterbeheer (K.U.Leuven)**
- **Laboratorium voor Bodemvruchtbaarheid en -biologie (K.U.Leuven)**
- **Bodemkunde en fertiliteit (R.U.Gent)**
- **SADL (K.U.Leuven)**

**Studie uitgevoerd in opdracht van de
Vlaamse Landmaatschappij**

De volgende personen en onderzoeksinstellingen hebben aan dit project hun medewerking verleend:

- Bodemkundige Dienst van België: projectcoördinatie
E. Herelixka, N. Vogels, L. Vanongeval Promotor: Prof. M. Geypens

- Instituut voor Land- en waterbeheer, K.U.Leuven
K. Oorts, S. Rombauts, L. Sammels, Promotor: Prof. J. Feyen
W. W. Verstraeten, A. El-Sadek

- Laboratorium van Bodemvruchtbaarheid en –biologie, K.U.Leuven
F. Coppens Promotor: Prof. R. Merckx

- Bodemkunde en fertiliteit, R.U.Gent
K. D’Haene, E. Moreels, S. De Neve Promotor: Prof. G. Hofman,
J. Salomez, P. Boeckx Prof. O. Van Cleemput

- SADL, K.U.Leuven
I. Librecht, J. Wellens Promotor: Prof. J. Van Orshoven

Het projectconsortium werd bijgestaan door de Stuurgroep bestaande uit:

- J. Decrop (VLM, Mestbank)
- A. Dobbelaere (VLM, Mestbank)
- S. Ducheyne (VLM, Mestbank)
- P. Gabriëls (ALT)
- J. Lermytte (AMINAL)
- H. Neven (AMINAL, Afd. Land)
- S. Overloop (VMM, MIRA)
- F. Stuyckens (VLM, Mestbank)
- L. Van Craen (AMINAL, Afd. Water)
- H. Vandendriessche (Kabinet van de Vlaamse Minister van Leefmilieu en Landbouw, Adviseur)
- D. Van Gijseghem (ALT-VOLT)
- K. Van Hoof (VMM)

Inhoud

1	DOELSTELLINGEN VAN HET PROJECT	5
2	ALGEMENE WERKWIJZE.....	5
3	PROEFVELDGEGEVENS	6
3.1	DOELSTELLING	6
3.2	STAALNAMETECHNIEK EN ANALYSE	6
3.3	BESLUIT	7
4	WAVE.....	8
4.1	DOELSTELLING	8
4.2	HET MODEL.....	8
4.3	INVOER EN UITVOER VAN HET WAVE-MODEL: OPBOUW VAN HET N-(ECO) ² -GIS	9
4.3.1	<i>Doelstelling</i>	9
4.3.2	<i>Bodem eigenschappen</i>	9
4.3.3	<i>Klimaatgegevens</i>	10
4.3.4	<i>Grondwaterstandsreeksen</i>	10
4.3.5	<i>Teeltinformatie</i>	10
4.3.6	<i>Output van de simulaties</i>	10
4.3.7	<i>Procedures</i>	11
4.4	BESLUIT	11
5	VERFIJNING VAN HET WAVE-MODEL.....	11
5.1	N-TRANSFORMATIEPROCESSEN	11
5.1.1	<i>Doelstelling</i>	11
5.1.2	<i>Mineralisatieproces</i>	11
5.1.2.1	<i>Mineralisatie uit bodem-organische stof: resultaten van de incubatieproef</i>	11
5.1.2.2	<i>Mineralisatie uit recent toegediend organisch materiaal</i>	12
5.1.3	<i>Het denitrificatieproces</i>	13
5.2	KALIBRATIE EN VALIDATIE	13
5.2.1	<i>Doelstelling</i>	13
5.2.2	<i>Werkwijze</i>	14
5.2.2.1	<i>Kalibratie van de waterbalans</i>	14
5.2.2.2	<i>Kalibratie van de stikstofbalans</i>	14
5.3	PROCESFACTOR	15
5.3.1	<i>Probleemstelling</i>	15
5.3.2	<i>MAP-meetnet en nitraatstikstofresidumetingen</i>	15
5.3.3	<i>Doctoraat Alaa El-Sadek</i>	15
5.3.4	<i>N-(eco)²-project</i>	16
5.3.5	<i>Besluit procesfactor</i>	16
5.4	BESLUIT	16
6	SCENARIOANALYSES.....	17
6.1	SCENARIOANALYSE TER BEPALING VAN HET MAXIMAAL TOELAATBAAR NITRAATSTIKSTOFRESIDU	17
6.1.1	<i>Doelstelling</i>	17
6.1.2	<i>Werkwijze</i>	17
6.1.3	<i>Interpretatie van de modelresultaten</i>	18
6.1.4	<i>Resultaten</i>	19
6.1.5	<i>Afleiding van de nitraatstikstofresidunormen</i>	20
6.1.6	<i>Ruimtelijke analyse</i>	21
6.1.7	<i>Besluit</i>	22

6.2	GEVOELIGHEIDS- EN ONZEKERHEIDSANALYSE.....	22
6.2.1	<i>Doelstelling</i>	22
6.2.2	<i>Werkwijze</i>	22
6.2.3	<i>Resultaten</i>	23
6.2.3.1	Gevoeligheidsanalyse.....	23
6.2.3.2	Onzekerheidsanalyse.....	23
6.2.4	<i>Besluit</i>	23
6.3	SCENARIOANALYSE TER BEPALING VAN HET PERCEELSMANAGEMENT.....	23
6.3.1	<i>Doelstelling</i>	23
6.3.2	<i>Werkwijze</i>	24
6.3.3	<i>Interpretatie van de modelresultaten</i>	25
6.3.4	<i>Resultaten</i>	25
6.3.5	<i>Ruimtelijke analyse</i>	26
6.3.6	<i>Besluit</i>	26
7	AANBEVELINGEN VOOR DE BEPERKING VAN HET NITRAATSTIKSTOFRESIDU.....	27
7.1	DOELSTELLING.....	27
7.2	BEREDENEERDE BEMESTING.....	27
7.3	AANBEVELINGEN PER GEWAS(GROEP).....	28
7.3.1	<i>Maïs</i>	28
7.3.2	<i>Graangewassen</i>	28
7.3.3	<i>Suikerbieten</i>	29
7.3.4	<i>Aardappelen</i>	29
7.3.5	<i>Grasland</i>	29
7.3.6	<i>Groenten</i>	30
7.4	BESLUIT.....	32
8	BEMONSTERING, ANALYSE EN TEMPORELE VARIABILITEIT VAN HET NITRAATSTIKSTOFRESIDU.....	32
8.1	DOELSTELLING.....	32
8.2	KARAKTERISERING VAN DE RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN NITRAATSTIKSTOF IN DE BODEM.....	33
8.2.1	<i>Literatuuronderzoek</i>	33
8.2.2	<i>Proefveldonderzoek</i>	33
8.2.3	<i>Bepaling van het aantal boorsteken</i>	33
8.3	INVLOED VAN STAALNAMEPROCEDURE, BEWAAR- EN ANALYSEMETHODE OP DE BEPALING VAN AMMONIUM-EN NITRAATSTIKSTOF VAN BODEMSTALEN.....	34
8.4	OPVANGEN VAN DE TEMPORELE VARIABILITEIT VAN NITRAATSTIKSTOF IN DE BODEM.....	35
8.4.1	<i>Doelstelling</i>	35
8.4.2	<i>Werkwijze</i>	36
8.4.3	<i>Resultaat</i>	36
8.5	BESLUIT.....	37
9	ALGEMEEN BESLUIT.....	37
10	LITERATUUR.....	38

1 Doelstellingen van het project

De hoofddoelstelling van het onderzoek is meer inzicht verwerven in de stikstofcyclus en de bewegingen van stikstof in de bodem en het ondiepe grondwater onder landbouwgronden, en dit voor de meest voorkomende ‘bodem-gewas’ situaties in Vlaanderen. Dit inzicht moet leiden tot een technische vertaling van de grenswaarde van de Europese nitraatrichtlijn, zijnde $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ of $11.3 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$ in grond- en oppervlaktewater, in een perceelsgewijze controleerbare nitraatstikstofresidunorm voor cultuurgronden.

Tot hiertoe ging men ervan uit dat er voldaan was aan de grenswaarde van de nitraatrichtlijn indien het nitraatstikstofresidu, uitgedrukt in $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ in de bodem tot op een diepte van 90 cm in de periode van 1 oktober tot 15 november, niet hoger was dan $90 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$. De hoofddoelstelling van het N-(eco)²-project was om deze nitraatstikstofresidunorm wetenschappelijk te evalueren en te differentiëren naargelang bodemtextuur en gewas. Een bijkomende doelstelling was om na te gaan met welk perceelsmanagement deze nitraatstikstofresidunormen kunnen gerespecteerd worden.

2 Algemene werkwijze

De opzet van dit onderzoeksproject is zodanig dat het eindresultaat van het project, nl. de aanlevering van de nitraatstikstofresidunormen in het bodemprofiel, in de laag 0 tot 90 cm, in de periode van 1 oktober tot 15 november, evenwichtig gebaseerd is op terreingegevens, simulatieresultaten en expertkennis.

Voor de terreingegevens werd beroep gedaan op gegevens van 20 proefvelden die op basis van een oppervlakte-analyse werden geselecteerd en representatief waren voor de meest voorkomende ‘bodem-gewas-hydrologie’ combinaties in Vlaanderen. Aangezien de proefveldgegevens beperkt waren (slechts 20 situaties en 2 winterperiodes) was het onmogelijk om op basis van enkel deze proefveldmetingen algemene conclusies en normen af te leiden. Daarom werd eveneens beroep gedaan op modelresultaten.

Eerst werd het WAVE-model uitgebreid gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen op de 20 proefvelden en op basis van bijkomend experimenteel onderzoek naar het stikstofmineralisatie- en denitrificatieproces. Nadat het WAVE-model op basis van de metingen verfijnd en uitgebreid getest was, werd het aangewend in scenarioanalyses om voor een zeer groot aantal verschillende ‘bodem-gewas-hydrologie’ situaties in Vlaanderen de nitraatuitspoeling te voorspellen voor een tijdreeks van 30 jaren.

De resultaten van de scenarioanalyse, samen met de informatie van de proefvelden en de aanwezige expertkennis binnen het consortium, vormden de basis waarop de nitraatstikstofresidunormen en het exploitatieschema dat resulteert in deze nitraatstikstofresidunormen, werden afgeleid.

3 Proefveldgegevens

3.1 Doelstelling

Er werden 20 proefvelden geselecteerd die representatief werden geacht voor de in Vlaanderen meest voorkomende 'bodem-gewas-hydrologie' combinaties. Op deze 20 velden werden er gedurende 2 winterperiodes (1 oktober - 31 maart) bodemstalen genomen en werden tevens analyses uitgevoerd op grond-, bodem- en drainagewater. Het doel van de proefveldmetingen was om enerzijds de nitraatuitspoeling onder veldomstandigheden te begroten en om anderzijds het WAVE-model te kalibreren en valideren.

3.2 Staalnametechniek en analyse

De uitspoeling van nutriënten met het percolerend water wordt in grote mate bepaald door de bodemkenmerken. Daartoe werden voor de 20 proefvlakken (20 m x 20 m) verschillende parameters onderzocht. Per horizont werd een textuurbepaling uitgevoerd en werd het schijnbaar soortelijk gewicht bepaald. Daarnaast werden ook het percentage koolstof en stikstof en de pH_{KCl} bepaald en werd een pF-curve opgesteld.

Op de 20 geselecteerde sites werden tijdens beide winterperiodes, met name tussen 1 oktober 2000 en 31 maart 2001 en tussen 1 oktober 2001 en 31 maart 2002, de minerale stikstof in de bodem en de nitraatstikstof in het bodem-, grond- en drainagewater driewekelijks opgevolgd. De periode 1 oktober-31 maart werd gekozen omwille van het feit dat in deze periode de N-opname door een gewas zeer gering is en het neerslagoverschot hoog is (lage evapotranspiratie), zodat het risico op nitraatuitspoeling groot is in de bestudeerde periode. Op enkele velden werd gedurende de zomer de evolutie van de minerale stikstof verder opgevolgd.

Het nitraat- en ammoniumstikstofgehalte en vochtgehalte werden gemeten in bodemlagen van 30 cm tot op een diepte van 90 cm.

Voor de bemonstering van het bodemvocht werden op ieder veld drie poreuze cups verticaal geplaatst op een diepte van 90 cm onder het maaiveld. Bij de bemonstering werd in de poreuze cups een onderdruk van ± 600 mbar aangelegd met behulp van een vacuümpomp voorzien van een manometer. Het water werd opgepompt en opgevangen in een monsterflesje en werd geanalyseerd op nitraatstikstof.

Om de nitraatstikstofconcentratie in het grondwater te bepalen werden op de proefvelden met ondiep grondwater één of meerdere peilbuizen tot 2 meter onder het maaiveld geplaatst. De bovenste halve meter van het grondwater in de peilbuizen werd bemonsterd en op nitraatstikstof geanalyseerd. De stand van de grondwatertafel werd ook in de peilbuizen opgemeten aangezien deze gegevens noodzakelijk waren voor de kalibratie van de waterbalans van het simulatiemodel.

Op de 5 gedraineerde percelen werd driewekelijks een staal genomen van het water aan het einde van het drainageselsel.

3.3 Besluit

In het algemeen kon vastgesteld worden dat in de winterperiode het gehalte aan nitraatstikstof in het bodemprofiel afneemt, omwille van een migratie van $\text{NO}_3\text{-N}$ naar diepere bodemlagen met het percolerende water. Afhankelijk van factoren als het initieel gehalte aan nitraatstikstof en initieel vochtgehalte van het bodemprofiel, de neerslaghoeveelheid, de begroeiing, ... vond er een N-aanrijking plaats van de bodemlagen 30-60 cm, 60-90 cm of >90 cm.

De grote moeilijkheid in het voorspellen van nitraatverliezen door uitspoeling is dat er simultaan verschillende N-transformatieprocessen optreden. Tot deze processen behoren nitrificatie, denitrificatie, mineralisatie (uit bodem-organische stof, organische meststoffen en oogstresten) en immobilisatie. Tevens kan stikstof opgenomen worden in het najaar wanneer een groenbemester is ingezaaid.

Stikstofinput, groeicondities, weerscondities en bodemtype hebben een groot effect op N-transformatieprocessen en beïnvloeden bijgevolg de hoeveelheden nitraatstikstof die uiteindelijk worden uitgespoeld. Naast weerscondities, voorgeschiedenis van het perceel en bodemkarakteristieken, worden N-verliezen beïnvloed door de hoeveelheid en distributie van minerale stikstof in het bodemprofiel. Zelfs met een optimale bemesting, zal het minerale N-residu verschillen naargelang het gewas. Dit is te wijten aan een variabele bewortelingsdiepte en worteldistributie en verschillen in N-opname gedurende de teeltduur.

Het effect van een groenbemester was positief indien deze tijdig werd gezaaid en goed tot ontwikkeling kon komen. Er moet rekening gehouden worden met de vrijstelling van stikstof door mineralisatie van groenbemesters na het inploegen en mineralisatie van eventuele stikstofrijke oogstresten (zoals suikerbietenloof en groente-oogstresten).

In het algemeen kan gesteld worden dat hoge nitraatstikstofresidu's in de bodem zich vertalen in hoge nitraatconcentraties in het bodemwater (metingen suction cups) en het bovenste grondwater (peilbuizen). Deze relatie was evenwel niet steeds even duidelijk: op een aantal velden werden ondanks lage nitraatstikstofresiduuwaarden in de bodem relatief hoge nitraatconcentraties in het bodem- en grondwater gemeten en omgekeerd. Dit leidde tot significante maar toch relatief lage correlatiecoëfficiënten tussen residuele $\text{NO}_3\text{-N}$ in het bodemprofiel en nitraatconcentraties in het bodem-, grond en drainwater.

Tussen de nitraatconcentratie in het bodemwater en het drainagewater bestond geen significant verband aangezien het drainagewater van verschillende percelen afkomstig kan zijn.

Op basis van deze proefveldresultaten (metingen op 20 proefvelden gedurende twee winterperiodes) was het wetenschappelijk gezien onmogelijk om algemene nitraatstikstofresidunormen af te leiden in functie van textuur en gewas. Daarom werd beroep gedaan op modelberekeningen om voor zeer veel uiteenlopende 'bodem-gewas' situaties in Vlaanderen de nitraatuitspoeling te voorspellen. Deze proefveldresultaten waren evenwel onontbeerlijk om de modellen te verfijnen en uitvoerig te testen alvorens ze aangewend konden worden in scenarioanalyses voor de afleiding van nitraatstikstofresidunormen.

4 WAVE

4.1 Doelstelling

Vermits het onmogelijk was voor elke combinatie ‘bodem-gewas-hydro-geologie’ experimenten op te zetten en gezien de beperkte duur van het project (2 jaar), diende voor het onderzoek gebruik te worden gemaakt van een wiskundig model om de doelstellingen te realiseren.

Modellen hebben het belangrijk voordeel dat de kennis kan worden toegepast op andere ‘bodem-gewas’ combinaties dan deze waarvoor de modellen werden ontwikkeld, resp. getoetst. Voorspellingen kunnen worden gemaakt van het effect van ingrepen en bemestingsschema’s zonder dat deze worden geïmplementeerd. Modellen zijn daardoor belangrijke instrumenten geworden ter aanvulling op het klassiek proefveldonderzoek en ter ondersteuning van het beheer en het beleid.

4.2 Het model

Het WAVE-model (Water and Agrochemicals in the soil and the Vadose Environment, Vanclooster *et al.*, 1994 en 1996) is een wiskundig model dat toelaat de stroming van water, het transport en de transformaties van agrochemicaliën en het warmtetransport in het bodem-gewassysteem te beschrijven. Het WAVE-model is een puntmodel dat de verticale water- en nutriëntenstroming en -uitspoeling in begroeide bodems op dagbasis berekent. Enkele belangrijke kenmerken van het model zijn:

- ✓ Mechanistisch: gebaseerd op proceskennis;
- ✓ Deterministisch: één set van modelinvoer genereert één eenduidige set van modeluitvoer;
- ✓ Numerisch: eindige verschillen oplossingstechniek voor differentiaalvergelijkingen;
- ✓ Holistisch: integratie van de verschillende deelprocessen in het bodem-gewassysteem;
- ✓ Eéndimensionaal: modellering van stroming en transport in louter verticale richting.

Het WAVE-model bestaat uit verschillende modules, namelijk voor het beschrijven van de waterbalans, het transport van in water opgeloste stoffen, de warmtebalans, de stikstofbalans en een module voor het beschrijven van de gewasgroei in respons tot de water- en stikstofbeschikbaarheid in het bodemprofiel. De volgende gewassen kunnen gemodelleerd worden: wintertarwe, aardappelen, suikerbieten, maïs, gras en gele mosterd. De modulaire opbouw laat toe om enkel deze modules te hanteren die voor het gestelde probleem van toepassing zijn.

De stikstofmodule in het WAVE-model gaat uit van de aanwezigheid van een minerale en een organische stikstofcomponent. De organische component wordt onderverdeeld in 3 ‘sub-pools’, namelijk een stabiele humus pool en twee sneller afbreekbare pools: een manure pool (drijfmest of andere organische bemesting) en een litter pool (oogstresten en andere restmaterialen) en de transfer tussen deze sub-pools wordt gecontroleerd door eerste orde snelheidsconstanten. De snelheidsconstanten worden gecorrigeerd voor de temperatuur en de vochtinhoud van de bodem via een ingebouwde vocht- en temperatuursreductiefunctie.

Het voordeel van deze uitgebreide beschrijving van de stikstofprocessen is dat meer inzicht verkregen wordt in de deelprocessen (mineralisatie, denitrificatie,...) van de stikstofcyclus en dat verbanden in de gehele cyclus duidelijk worden. Het nadeel is echter dat een groot aantal stikstoftransformatieparameters gekend moeten zijn of afgeleid moeten worden uit metingen.

Naast kennis over de stikstoftransformatieparameters zijn de volgende inputgegevens essentieel: de verticale opbouw van het bodemprofiel in termen van de opeenvolging, diepteligging en dikte van de horizonten, de vochtretentiekarakteristiek, de hydraulische conductiviteitscurve, de initiële

bodemcondities zoals het totale koolstofgehalte, het minerale en organische stikstofgehalte van elk horizont, dagwaarden voor neerslag, potentiële evapotranspiratie en grondwaterstand, en management (bemestingsdosis en -type). De vochtretentiekarakteristiek en hydraulische conductiviteitscurve kunnen afgeleid worden van andere bodemfysische eigenschappen zoals de granulometrie, de dichtheid en het organische koolstofgehalte van de bodem door het gebruik van pedotransferfuncties van Vereecken (1988).

Het WAVE-model genereert tijdreeksen van drogestofopbrengsten en N-opname door de plant, het vochtgehalte in het bodemprofiel, de percolatieflux en nitraatflux op een ingestelde diepte en het minerale stikstofgehalte in het bodemprofiel.

4.3 Invoer en uitvoer van het WAVE-model: opbouw van het N-(eco)²-GIS

4.3.1 Doelstelling

De op ‘modellen, proefvelden en expertkennis’ gebaseerde methodologie voor het afleiden van nitraatstikstofresidunormen in de bodem, moet toepasbaar zijn op een zo groot mogelijk areaal in Vlaanderen. Vandaar dat een juiste vaststelling van de meest voorkomende ‘bodem-gewas(rotatie)-hydrologie’ combinaties in Vlaanderen belangrijk was. Voor deze combinaties dienden modelvoorspellingen gedaan te worden inzake nitraatuitspoeling voor een tijdsreeks van 30 jaar. Om deze simulaties mogelijk te maken dienden de weerhouden ‘bodem-gewas’ combinaties gekarakteriseerd te worden met alle inputgegevens die het model in staat stellen de beoogde modeloutput te genereren. Hiertoe werd een databank, het N-(eco)²-GIS, opgebouwd waardoor de voor het model vereiste inputgegevens automatisch opvraagbaar zijn voor het uitvoeren van scenarioanalyses.

Het N-(eco)²-GIS is een informatiesysteem dat vooreerst toelaat alle bij de Mestbank aangegeven percelen, gekenmerkt door een teelt(opeenvolging 1998-1999-2000), toe te wijzen aan groepen, bepaald door bodem en hydrologische eigenschappen afgeleid uit de bodemkaart enerzijds, én door de ligging in de nabijheid van één van de drie gebruikte meteostations anderzijds. Alle percelen in één dergelijke groep of klasse worden verder aangeduid als een simulatieëenheid.

Het N-(eco)²-GIS laat toe deze simulatieëenheden te karakteriseren met (1) bodemeigenschappen, (2) klimaatsgegevens, (3) grondwaterstanden en (4) teelthistoriek.

4.3.2 Bodemeigenschappen

Binnen een GIS-omgeving werd een koppeling gemaakt tussen (een uitgebreide versie van) de digitale bodemkaart (OC-GIS-Vlaanderen) en de Aardewerk-BIS-tabellen (Van Orshoven *et al.*, 1991). Het resultaat, Aardewerk-gBis, is een onderdeel van het N-(eco)²-GIS en laat toe:

- ✓ bodemkaarteenheden grafisch te selecteren op de digitale bodemkaart;
- ✓ de geselecteerde bodemkaarteenheden te beschrijven met de meest waarschijnlijke horizontopeenvolging (sequentie);
- ✓ de kenmerken van de horizonten in de geselecteerde sequentie op te vragen (horizontcode, diepteligging, dikte, textuurkenmerken, koolstofgehalte, parameters van de pF-curve en van de K(h)-curve);
- ✓ de kenmerken van de horizonten weg te schrijven in een bestand dat als invoer kan dienen voor batchverwerking met bv. WAVE.

4.3.3 Klimaatgegevens

Het N-(eco)²-GIS bevat 40-jarige tijdsreeksen met dagelijkse neerslag- en ET₀-waarden voor de weerstations Ukkel, Kleine Brogel en Koksijde (bron: KMI). Deze stations worden als representatief gesteld voor één of meerdere landbouwstreken: Koksijde voor Duinen en Polders, Kleine Brogel voor de Kempen en Ukkel voor de overige landbouwstreken op Vlaams grondgebied: Zand-, Zandleem-, Leem- en Weidestreek.

4.3.4 Grondwaterstandsreeksen

Het dynamisch gedrag van de grondwaterstand wordt op de bodemkaart vereenvoudigd voorgesteld a.h.v. een drainageklasse, die werd toegekend op basis van de diepte waarop morfologisch gley- en reductieverschijnselen voorkomen in de bodem. De drainageklasse wordt geacht een indicatie te geven van de historische gemiddeld hoogste en gemiddeld laagste grondwaterstand. Voor de simulaties met het WAVE-model is een gemiddelde grondwaterstand echter niet voldoende als input; er zijn grondwaterstandsgegevens op dagbasis nodig voor een lange periode (30 jaar).

Aangezien dergelijke uitgebreide meetreeksen in Vlaanderen schaars tot onbestaande zijn, werd zo'n datareeks 'geschat' door gebruik te maken van het ARX (autoregressive exogenous variable)-tijdsreeksmodel van Bierkens *et al.* (1999). Met een dergelijk tijdsreeksmodel kan, op basis van een beperkt aantal grondwaterstandsmetingen, een dagelijkse stijghoogte gegenereerd worden voor een langere tijdperiode. Basisgegevens hiervoor zijn een (beperkte) reeks met waarnemingen van de grondwaterstand én dagwaarden van het neerslagoverschot.

De reële grondwaterstandsmetingen worden gebruikt om de parameters van het tijdsreeksmodel te kalibreren. Hiervoor werd gebruik gemaakt van het Kalmanfilter-algoritme (Bierkens, 1998), waarmee het deterministische gedeelte van het ARX-model voorspeld kan worden.

Op basis van beschikbare grondwaterstandsmeetreeksen (meetnet AMINAL en proefveldgegevens) en gegevens over het dagelijks neerslagoverschot, afgeleid van de beschikbare neerslag en berekende referentie-evapotranspiratiegegevens voor de drie weerstations, opgenomen in het N-(eco)²-GIS, kon, na een ruimtelijke generalisatie, voor de verschillende simulatieëenheden een grondwaterstandsverloop op dagbasis gegenereerd worden voor een periode van 30 jaar.

4.3.5 Teeltinformatie

Het N-(eco)²-GIS bevat eveneens de ruimtelijke afbakening en de teeltidentificatie van de bij de Mestbank geregistreerde landbouwgebruikspercelen 1997, 1998, 1999 en 2000. Een procedure werd uitgewerkt om de landbouwgebruikspercelen van 2000 te kenmerken door de teelt op dat perceel in de voorgaande jaren, zodat voor de in 2000 geregistreerde percelen ook teeltinformatie (1997-1998-1999-2000) beschikbaar is.

4.3.6 Output van de simulaties

Ook de uitvoer van de simulaties wordt in het N-(eco)²-GIS opgeslagen op het niveau van de simulatieëenheid. Dit laat toe om de resultaten van de modelberekeningen ruimtelijk voor te stellen en te analyseren (welk N-residu is waar toegelaten?, waar wordt de norm overschreden?, over welke oppervlakte gaat het?, ...).

4.3.7 Procedures

Het N-(eco)²-GIS bevat naast de vermelde datalagen en het Aardewerk-gBIS als subsysteem, ook bijkomende procedures die de dataselectie, -analyse, -uitvoer en -presentatie automatiseren en vereenvoudigen.

4.4 Besluit

Om de simulaties met het WAVE-model mogelijk te maken dienden de in Vlaanderen meest voorkomende ‘bodem-gewas’ combinaties gekarakteriseerd te worden met alle inputgegevens die het model in staat stellen de beoogde modeloutput te genereren. De databank N-(eco)²-GIS laat toe de simulatieëenheden te karakteriseren met (1) bodemeigenschappen die relevant zijn voor de simulatie van water- en stikstoftransport en –transformatie in de bodem, (2) klimaatsgegevens, (3) grondwaterstandsverloop en (4) teelthistoriek.

5 Verfijning van het WAVE-model

5.1 N-transformatieprocessen

5.1.1 Doelstelling

In de bodem treden tegelijkertijd verschillende stikstoftransformatieprocessen op met snelheden die afhankelijk zijn van bodemkarakteristieken, weersomstandigheden en microbiële activiteit in de bodem. Opdat het WAVE-model betrouwbare resultaten inzake nitraatuitspoeling zou opleveren, was het zeer belangrijk dat de processen van de N-cyclus in de bodem voldoende nauwkeurig beschreven werden door het model. In een eerste fase van dit project werd daarom een kritische analyse van de beschikbare literatuurgegevens uitgevoerd om de bestaande kennis omtrent deze processen te inventariseren.

Aangezien de literatuurgegevens onvoldoende waren om de mineralisatie- en denitrificatieparameters van WAVE te kalibreren werden de mineralisatiecapaciteit en denitrificatiepotentiaal van de verschillende bodemhorizonten van de 20 proefvelden experimenteel bepaald onder optimale omstandigheden. De resultaten werden vervolgens vertaald naar veldomstandigheden gebruikmakend van een vocht- en temperatuursreductiefactor die ingebouwd zijn in het WAVE-model.

Daarnaast werd een pedotransferfunctie afgeleid om aan de hand van eenvoudig te bepalen bodemparameters de N-mineralisatie- en denitrificatiesnelheid te schatten.

5.1.2 Mineralisatieproces

5.1.2.1 Mineralisatie uit bodem-organische stof: resultaten van de incubatieproef

Er werd een incubatieproef opgezet met als doel de N-mineralisatiesnelheid k uit bodem-organische stof te bepalen van de verschillende bodemhorizonten van de 20 geselecteerde proefvelden. De mineralisatiesnelheid k in de bodem varieerde tussen 0,11 en 0,97 mg N kg⁻¹ dg dag⁻¹ in de bovenste horizont. Als in de diepere bodemlagen voldoende C en N aanwezig is, kan een niet te verwaarlozen extra mineralisatie optreden (tot 20 %).

Wanneer de resultaten per textuurklasse bekeken worden, valt in de klei-, leem- en zandleembodems een duidelijke relatie waar te nemen tussen de mineralisatiesnelheid en het organisch stofgehalte van de bodem: k neemt af met dalende % C en % N. Dit hangt samen met de bemestingsgeschiedenis van de velden: rijke gronden hebben de hoogste k , de bodems met een armer bemestingsverleden mineraliseren het traagst. In de zandgronden is deze relatie niet terug te vinden en spelen naast de hoeveelheid C en N in de bodem nog andere factoren een rol (zoals bijvoorbeeld een jarenlange drijfmesttoediening).

De tweede doelstelling van het mineralisatieonderzoek was het opstellen van een pedotransferfunctie zodat de mineralisatiesnelheid k geschat kan worden uit gemakkelijk meetbare bodemparameters. Uit de regressieanalyse bleek dat de N-mineralisatiesnelheid k van een bodem hoofdzakelijk bepaald wordt door de hoeveelheid totale stikstof in de grond. Deze relatie komt het duidelijkst tot uiting in de klei-, leem- en zandleembodems. Om k te voorspellen met één enkele pedotransferfunctie geldig voor alle bodems, zal een breed predictie-interval in acht genomen moeten worden. Voor een gemiddelde hoeveelheid N van $1500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dg}$ bedraagt k $(0,33 \pm 0,20) \text{ mg N kg}^{-1} \text{ dg dag}^{-1}$, d.w.z. een predictie-interval van $k \pm 60 \%$. Vertaald naar N-mineralisatie op het veld (0-30 cm; dichtheid $1,4 \text{ g cm}^{-3}$) in de winterperiode (3 maanden met een gemiddelde temperatuur van 5°C) geeft dit $14 \pm 8,7 \text{ kg N}_{\text{min}} \text{ ha}^{-1}$. Zonder de zandgronden op te nemen in het model verkleint het predictie-interval tot $k \pm 40 \%$, d.i. een mineralisatie van $14 \pm 5,9 \text{ kg N}_{\text{min}} \text{ ha}^{-1}$.

De resultaten van de incubatieproef werden gebruikt om de afbraakconstante k_{hum} van de humus pool in WAVE te berekenen door gebruik te maken van een vocht- en temperatuursreductiefactor zodanig dat de gemeten mineralisatie onder optimale labo-omstandigheden vertaald kon worden naar veldomstandigheden.

5.12.2 Mineralisatie uit recent toegediend organisch materiaal

Naast de mineralisatie van stikstof uit bodem-organische stof, komt er ook een belangrijke hoeveelheid minerale stikstof vrij uit recent ingebracht organisch materiaal. Belangrijk in dit verband zijn oogst- en rooiresten ('litter pool' in WAVE) en toediening van organische meststoffen ('manure pool' in WAVE). Naast de minerale stikstof die in deze stoffen reeds aanwezig is, kan, afhankelijk van het moment van inwerken, de bodem en de weersomstandigheden, een belangrijk deel van de stikstof die in de organische fractie van deze stoffen gebonden is, vrijkomen door mineralisatie.

Bij de oogst blijven, afhankelijk van het gewas, vaak aanzienlijke hoeveelheden oogstresten op het veld. De vrijzetting van stikstof door mineralisatie van oogstresten is afhankelijk van de aard en samenstelling van de oogstresten en van de temperatuur. Op basis van literatuurgegevens werd een databank opgesteld die voor een groot aantal oogstresten informatie bevat omtrent de hoeveelheid oogstrest die achterblijft op het veld, C/N-verhouding van de oogstrest, organische N en organische C. Voor een aantal gewassen zijn ook gegevens in verband met mineralisatie en chemische samenstelling van de oogstrest aanwezig. De databank is gebaseerd op artikels uit België en de ons omringende landen waar de klimaatsomstandigheden en bemestingsstrategieën gelijklopend zijn.

Wat betreft de N-mineralisatie van organische mest werden ook de nodige inputgegevens voor WAVE verzameld. In de bemestingspool van WAVE wordt enkel de recente toediening van organische mest (minder dan 12 maanden) beschouwd. Mesttoedieningen in voorgaande jaren worden niet in rekening gebracht in de bemestingspool.

5.1.3 Het denitrificatieproces

Om de nitraatuitspoeling correct te kunnen inschatten is het niet enkel belangrijk om de N-vrijzetting door mineralisatie juist te kunnen kwantificeren, maar is het eveneens van belang om de gasvormige N-verliezen door denitrificatie realistisch te kunnen inschatten.

Uit een uitgebreide literatuurstudie bleek dat denitrificatieverliezen in de gematigde gebieden onder normale omstandigheden meestal beperkt zijn tot maximaal 20 tot 30 kg N/ha/jaar. Enkel in uitzonderlijke situaties (hoge N-bemesting, bodems met een hoog kleipercentage, hoog koolstofpercentage en ondiepe grondwatertafel) kunnen de denitrificatieverliezen hoog oplopen. Denitrificatieverliezen onder veldomstandigheden worden immers bepaald door het klimaat (bodemvocht en temperatuur) en door bodemparameters (textuur, nitraatgehalte en koolstofgehalte).

WAVE werd gekalibreerd aan de hand van het proefveld Hélécine, waar in het verleden metingen van denitrificatieverliezen onder veldomstandigheden werden uitgevoerd. Op basis hiervan werd een potentiële denitrificatiesnelheid in WAVE, $k_{\text{denit,pot}}$, afgeleid van 0.0015 dag^{-1} voor leembodems. Met deze waarde van $k_{\text{denit,pot}}$ werd een jaarlijkse denitrificatie bekomen die realistisch werd geacht op basis van het literatuuronderzoek.

In het kader van dit project werd de denitrificatiepotentiaal bepaald van de verschillende bodemhorizonten van de 20 geselecteerde proefvelden onder optimale labo-omstandigheden. Er werden drie verschillende meetprocedures gevolgd: verzadiging op dag 7 met of zonder toediening van een koolstofbron en verzadiging op dag 4 met toediening van een koolstofbron. Uit de resultaten bleek dat de denitrificatiepotentiaal van de ondergrond te verwaarlozen was ten opzichte van de A-horizont. De denitrificatiepotentiaal van de A-horizonten van de zware kleigronden is significant groter dan van de A-horizonten van de andere proefvelden. Verschillen in denitrificatiepotentiaal tussen sommige A-horizonten van de proefvelden zijn te verklaren door een verschil in koolstofpercentage. Er kon geen duidelijke invloed van de pH vastgesteld worden. Verzadiging van de gronden op dag 4 in plaats van op dag 7 net voor de meting verhoogde over het algemeen de denitrificatie. Het verhoogde vochtgehalte over een langere periode zorgde voor een lage zuurstofconcentratie in de grond en de ontwikkeling van anaërobe micro-organismen zodat bij de toevoeging van een C- en N-bron de denitrificatie meer gestimuleerd werd.

Er werd een pedotransferfunctie opgesteld in functie van het kleigehalte om bij de scenarioanalyses de potentiële denitrificatie van andere bodems te schatten.

De vertaling van de gemeten denitrificatiepotentiaal naar denitrificatie onder veldomstandigheden gebeurde aan de hand van een vocht- en temperatuursreductiefunctie in WAVE en op basis van de gekalibreerde $k_{\text{denit,pot}}$.

5.2 Kalibratie en validatie

5.2.1 Doelstelling

Het is essentieel dat modellen, alvorens ze in een voorspellende context worden gebruikt, uitvoerig aan een kalibratie en validatie worden onderworpen. Tijdens de kalibratie tracht men door het toetsen van de modelresultaten aan veldwaarnemingen de parameters van het model te optimaliseren, d.w.z. deze set van parameters afleiden die resulteert in de beste overeenkomst

tussen metingen op het terrein en modelvoorspelling. Na de kalibratiefase van een model volgt een validatiefase waarin het model met een geoptimaliseerde set van parameters getoetst wordt aan een totaal andere situatie dan deze gebruikt in de kalibratiefase. Na validatie, indien het model bewijst de situatie met voldoende nauwkeurigheid te kunnen beschrijven, stelt men dat het model klaar is voor scenarioanalyse en ondersteuning van beleid en beheer.

Een uitgebreide kalibratie en validatie van WAVE gebeurde op basis van de proefvelden en aan de hand van de resultaten van het mineralisatie- en denitrificatieonderzoek. De meeste bodemparameters werden gemeten, het nitraatgehalte in de bodem en de nitraatconcentraties in het bodem-, grond- en drainagewater werden driewekelijks opgevolgd, gegevens in verband met het perceelsmanagement (bemesting, plant/zaai- en oogstdatum, ...) werden opgevraagd bij de landbouwer en de mineralisatie- en denitrificatiesnelheid werden experimenteel bepaald. Doordat al deze gegevens beschikbaar waren, verhoogt de betrouwbaarheid van de simulatieresultaten.

5.2.2 Werkwijze

5.2.2.1 Kalibratie van de waterbalans

Een eerste stap in de kalibratie is de kalibratie van de waterbalans. De waarden voor de parameters van de van Genuchten functie die de vochtretentiekarakteristiek beschrijft, werden invers geoptimaliseerd met behulp van gemeten vochtgehalten bij verschillende drukspanningen. Driewekelijks werden voor elk proefveld door middel van grondwaterstandsbuizen de grondwaterstanden opgemeten. Met behulp van het empirisch tijdreeksmodel van Bierkens *et al.* (1998) werd vervolgens voor elk proefveld met een grondwaterstand binnen 2 meter beneden maaiveld een tijdreeks voor grondwaterstanden gegenereerd die als invoer in WAVE diende. Wanneer de grondwaterstand onder 2 meter beneden maaiveld lag, werd een bodemprofiel met vrije drainage verondersteld. De initiële conditie voor het vochtgehalte voor de bodemlagen 0-30, 30-60 en 60-90 cm werd opgemeten in het veld. De verzadigde conductiviteiten (K_{sat}) voor de verschillende bodemhorizonten werden bepaald in het labo. De modelkalibratie bestond uit het vergelijken van de gesimuleerde en opgemeten tijdsreeksen van vochtgehalten op een aantal verschillende dieptes (bodemlagen 0-30, 30-60, 60-90 cm) en het aanpassen van de hydraulische parameters tot aanvaardbare vergelijkbaarheid.

5.2.2.2 Kalibratie van de stikstofbalans

De stikstofbalans bestaat uit verschillende deelprocessen waaronder mineralisatie, nitrificatie, denitrificatie, ammoniakvervluchtiging, plantopname en uitspoeling naar diepere bodemlagen. Er werd getracht om elk deelproces zo goed mogelijk te onderbouwen.

De onderbouwing van mineralisatie en denitrificatie gebeurde op basis van literatuur- en laboanalyses. De opname van stikstof door planten werd onderbouwd op basis van literatuurgegevens. Enkel de gewassen gras, wintertarwe en de groenbemesters raaigras en gele mosterd werden beschouwd omdat de kalibratie enkel gebaseerd was op de periode tussen 1 oktober en 31 maart.

De stikstofbalans werd gekalibreerd op basis van twee tijdreeksen. Een eerste tijdreeks bestaat uit metingen van nitraat- en ammoniumgehalten in de bodemlagen 0-30, 30-60 en 60-90 cm. De andere tijdreeks wordt gevormd door bepalingen van de nitraatconcentratie van de waterflux op 90 cm beneden maaiveld volgens verschillende benaderingen.

De winterperiode 2000-2001 werd gebruikt voor de kalibratie van de modellen, terwijl de winterperiode 2001-2002 diende voor de validatie. Per proefveld werden klimaatgegevens van het dichtsbijgelegen weerstation gebruikt.

Voor elk proefveld werden per winterperiode N-balansen opgesteld. Voor de verschillende bodemprocessen van de N-cyclus werd onderzocht of de gesimuleerde waarden realistisch waren.

5.3 Procesfactor

5.3.1 Probleemstelling

In tegenstelling tot de overeenkomst tussen de door WAVE gesimuleerde en de op de proefvelden gemeten $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie in de waterflux op 90 cm onder maaiveld, bleek er een discrepantie te bestaan tussen de door WAVE gesimuleerde nitraatconcentratie en de gemeten $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentraties in het oppervlaktewater. Op basis van de simulaties met het WAVE-model zou zelfs een nitraatstikstofresidu van $40 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ op 1 oktober aanleiding geven tot het overschrijden van de grenswaarde in het oppervlaktewater, opgelegd door de nitraatrichtlijn ($11.3 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$ of $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$), hetgeen door verschillende bronnen tegengesproken kan worden.

5.3.2 MAP-meetnet en nitraatstikstofresidumetingen

Er werd in Vlaanderen een oppervlaktewatermeetnet geïnstalleerd waarbij de meeste meetpunten een 12-tal keer per jaar bemonsterd en geanalyseerd worden. Vanaf 1 juli 1999 werd het oppervlaktewatermeetnet met voor de landbouw specifieke meetpunten uitgebreid (266 MAP-meetpunten).

Uit de resultaten van het MAP-meetnet oppervlaktewater blijkt dat er een gevoelige vooruitgang geboekt werd door de landbouwsector: waar in de winter '99 - '00 nog 60 % van de MAP-punten slecht scoorden (minstens één meting boven de 50 mg nitraat per liter), is dit percentage gezakt tot 38,5 % in de winter '01 - '02.

Het feit dat meer dan de helft van de MAP-meetpunten voldeed aan de nitraatrichtlijn ondanks dat het nitraatstikstofresidu in de praktijk vaak duidelijk hoger was dan $40 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$, doet vermoeden dat de door WAVE gesimuleerde $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie in het bodemwater op 90 cm niet rechtstreeks kan overgenomen worden voor concentraties in het oppervlaktewater. Deze stelling wordt ondersteund door de nitraatstikstofresidumetingen in de bodem in het najaar (1 oktober – 15 november 2001): op de percelen die in de kwetsbare zones 'water' gelegen zijn en waarvoor een beheersovereenkomst werd afgesloten tussen de landbouwer en de overheid moet jaarlijks verplicht een nitraatstikstofresidumeting uitgevoerd worden door een hiervoor erkend laboratorium. Deze uitgebreide dataset van analyseresultaten toont aan dat de nitraatstikstofresidumetingen in de bodem over het algemeen aanzienlijk hoger zijn dan het door WAVE gesimuleerde maximaal toelaatbare nitraatstikstofresidu van $40 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$.

5.3.3 Doctoraat Alaa El-Sadek

Een studie van El Sadek (2002) op drie Vlaamse stroombekkens, heeft aangetoond dat er een afname optreedt van de $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie tijdens het transport van de onderkant van het bodemprofiel naar het oppervlaktewater. De verhouding tussen de met het DRAINMOD-model (Brevé *et al.*, 1997) gemiddelde gesimuleerde $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie in het drainwater (C_g) en de geobserveerde $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie in het oppervlaktewater (C_s) kan beschouwd worden als maat voor de afname van de $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie tussen het drain- en het oppervlaktewater. De verhouding van beide concentraties wordt de "procesfactor" genoemd.

De analyse toonde aan dat:

- de procesfactor geen constante is maar fluctueert: de procesfactor voor de Witte Nete varieerde tussen 2.34 ± 1.34 , voor de Mark tussen 2.25 ± 1.83 en de Molenbeek tussen 2.68 ± 1.10 ;
- voor de drie geanalyseerde bekkens werd via optimalisatie een gemiddelde waarde voor de procesfactor afgeleid van 2.40.

5.3.4 N-(eco)²-project

In het kader van dit onderzoeksproject werd de procesfactor berekend voor het stroomgebied van de Wijlegemse beek. De simulaties werden uitgevoerd met het Burns_α-model (Burns, 1974; Mary *et al.*, 1999).

De gemiddelde gesimuleerde NO₃-N-concentratie C_g wordt berekend als de verhouding van de cumulatieve hoeveelheid nitraatstikstof en de cumulatieve hoeveelheid water die het profiel verlaat gedurende de uitspoelingsperiode van 1 oktober tot 31 maart. Deze aanpak werd ook gevolgd in de scenarioanalyses met het WAVE-model. De gemiddelde gemeten NO₃-N-concentratie C_s wordt berekend als het gemiddelde van de metingen van de NO₃-N-concentratie aan de monding van de Wijlegemse beek. Enkel de metingen tussen 1 oktober en 31 maart worden in beschouwing genomen.

De gemiddelde procesfactor over de 4 beschouwde winterperiodes (1997-2001) bedroeg 2.4.

5.3.5 Besluit procesfactor

Uit voorgaande bronnen kan afgeleid worden dat er een factor dient in rekening gebracht te worden om de nitraatconcentratie die de wortelzone verlaat (zoals gesimuleerd wordt door het WAVE-model) te relateren aan de nitraatconcentratie in het oppervlaktewater. Deze factor brengt transformatie- en verdunningsprocessen in rekening die plaatsvinden tijdens de laterale beweging van het water dat vanuit de wortelzone (op 90 cm) naar het oppervlaktewater stroomt.

In deze studie werd de procesfactor voor het oppervlaktewater gekalibreerd en gevalideerd voor vier verschillende stroombekkens in verschillende regio's, voor verschillende jaren en met twee verschillende modellen (DRAINMOD en Burns_α model). De resultaten geven aan dat de procesfactor niet constant is over de jaren. Gemiddeld over de verschillende jaren werd een waarde van de procesfactor van 2.4 bekomen, zowel met het Burns_α-model als met het DRAINMOD-model.

Deze procesfactor 2.4 werd gehanteerd voor de interpretatie van de modeluitvoer en bij de afleiding van de nitraatstikstofresidunormen.

Voor het grondwater doen zich gelijkaardige fenomenen voor, maar een voldoende onderbouwde procesfactor voor het diepe grondwater kon binnen dit project op basis van de bestaande schaarse gegevens niet afgeleid worden.

5.4 Besluit

Op basis van de metingen op 20 proefvelden en aan de hand van literatuuronderzoek en bepalingen van de mineralisatiecapaciteit en van de denitrificatiepotentiaal van 20 bodems in het labo, werd het WAVE-model uitvoerig getest en verfijnd vooraleer het aangewend werd in scenarioanalyses. Tevens bleek tijdens het onderzoek de noodzaak van een procesfactor die de door WAVE gesimuleerde nitraatconcentratie in de waterflux op 90 cm vertaalt naar een nitraatconcentratie in het oppervlaktewater.

6 Scenarioanalyses

6.1 Scenarioanalyse ter bepaling van het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu

6.1.1 Doelstelling

Nadat het WAVE-model gekalibreerd en gevalideerd werd aan de hand van de metingen op de 20 geselecteerde proefvelden, werd het aangewend in scenarioanalyses zodat voor de belangrijkste 'bodem-gewas(rotatie)-hydrologie' combinaties in Vlaanderen voorspellingen inzake nitraatuitspoeling konden gedaan worden voor een tijdsreeks van 30 jaar. De resultaten van de scenarioanalyses, samen met expertkennis, moeten leiden tot een technische vertaling van de Europese grenswaarde van 50 mg NO₃ l⁻¹ of 11.3 mg NO₃-N l⁻¹ in grond- en oppervlaktewater in een perceelsgewijze controleerbare nitraatstikstofresidunorm in de bodem. Anderzijds werd ook de nodige aandacht besteed aan de vertaling van de Europese richtwaarde van 25 mg NO₃ l⁻¹ of 5.65 mg NO₃-N l⁻¹ in een richtwaarde voor het nitraatstikstofresidu.

De scenarioanalyse ter bepaling van de relatie tussen nitraatstikstofresidu en nitraatuitspoeling heeft dus tot doel om het maximaal toelaatbare nitraatstikstofresidu op 1 oktober te bepalen waarbij voldaan wordt aan de nitraatrichtlijn.

Voor deze scenarioanalyses werd enkel de periode van 1 oktober tot 31 maart beschouwd aangezien in deze periode het risico op nitraatuitspoeling reëel is. In de zomer nemen de gewassen meer stikstof op en is er minder neerslagoverschot (hogere temperaturen, meer evapotranspiratie). In de winter is de nitraatconcentratie vaak hoog. Dit is toe te schrijven aan de soms hoge nitraatstikstofresidu's, het grote neerslagoverschot en geen of zeer weinig opname van stikstof door een gewas.

6.1.2 Werkwijze

Er werden 2 groepen scenarioanalyses uitgevoerd voor het bepalen van de relatie tussen nitraatstikstofresidu en nitraatuitspoeling.

De eerste groep scenarioanalyses (SA1a) is gebaseerd op de proefvelden die zijn gebruikt voor kalibratie en validatie van de modellen. Elk geselecteerd proefveld werd vervolgens gecombineerd met bepaalde oogstresten en/of gewassen, zodat 29 'bodem-gewas-hydrologie' combinaties ontstonden. Als gewas (tijdens de winter) werden enkel wintertarwe, gras en groenbemesters (onderscheid tussen grasachtige en bladrijke groenbemesters) in beschouwing genomen. De invoerparameters voor WAVE werden overgenomen van de kalibratie- en validatiefase.

De tweede groep (SA1b) is uitgevoerd voor de 20 meest voorkomende 'bodem-gewas' combinaties per landbouwstreek. Om deze simulaties mogelijk te maken dienden de meest voorkomende 'bodem-gewas' combinaties geselecteerd én gekarakteriseerd te worden met alle inputgegevens (bodemparameters, klimaatgegevens, grondwaterstandsverloop) die het WAVE – model in staat stelt de beoogde modeloutput te genereren. Voor het bepalen en karakteriseren van de 20 meest voorkomende 'bodem-gewas' combinaties per landbouwstreek, werd gebruik gemaakt van het N-(eco)²-GIS. Combinaties waarin de gewassen wintergerst, vlas of fruitbomen voorkwamen werden niet in rekening gebracht bij de 20 meest voorkomende combinaties omdat voor deze gewassen geen gewasspecifieke modelinvoergegevens beschikbaar zijn.

Elk van de 29 weerhouden combinaties voor SA1a werd doorgerekend met 8 verschillende nitraatstikstofresiduniveaus (20, 30, 40, 50, 70, 90, 120 en 150 kg N ha⁻¹) die op drie verschillende manieren in het 0-90 cm bodemprofiel kunnen zijn verdeeld, zodat in totaal 696 scenario's ontstonden. De verdelingen van het nitraatstikstofresidu over het bodemprofiel (0-90 cm) die werden beschouwd zijn:

- een gelijke verdeling van het nitraatstikstofresidu over de drie bodemlagen (1:1:1-verhouding);
- een verdeling waarbij het nitraatstikstofresidu zich voornamelijk bevindt in de onderste bodemlaag (1:1:2-verhouding);
- een verdeling waarbij het nitraatstikstofresidu zich voornamelijk bevindt in de bodemlaag 0-30 cm (2:1:1-verhouding).

Voor SA1b zijn analoog aan SA1a per landbouwstreek de 20 weerhouden 'bodem-gewas' combinaties (voor de Duinen maar 15 combinaties) verbonden met dezelfde 8 verschillende nitraatstikstofresidu's die ook op drie verschillende manieren in het profiel verdeeld kunnen zijn zodat 3240 scenario's ontstonden. Naast de klimaatsgegevens van Ukkel zijn ook de gegevens van Koksijde (voor Duinen en Polders) en Kleine Brogel (voor Kempen) gebruikt. Wintertarwe en groenbemesters werden in tegenstelling tot SA1a niet opgenomen in SA1b.

Teneinde een representatieve gemiddelde nitraatuitspoeling op jaarbasis te berekenen, diende het WAVE-model voor een lange tijdsreeks doorgerekend te worden. Om de invloed van de tijdsvariabiliteit in rekening te brengen, werd het model voor een periode van 30 jaar doorgerekend. In elk van deze 30 jaren werd op 1 oktober het nitraatstikstof- en ammoniumstikstofresidu geherinitialiseerd en werd dezelfde oogstrest 'toegediend' op 1 oktober. In de scenarioanalyse bepaalde de teelt van 1998 de in het begin van elke winterperiode ingegeven oogstrest. Wegens de latere oogst van suikerbieten werden de oogstresten van suikerbieten pas op 1 november 'toegediend'. Vermits wintertarwe reeds voor 1 oktober wordt geoogst, dus voor het begin van de winterperiode, werd enkel de fractie N en C die gemiddeld overblijft op 1 oktober in rekening gebracht bij het begin van elke simulatie met oogstresten van wintertarwe. Ieder jaar werd enkel die fractie van de in het voorjaar toegediende organische N in drijfmest in rekening gebracht die op 1 oktober (begin simulatieperiode) nog werkzaam is.

Per winterperiode (oktober – maart) werd een gemiddelde nitraatconcentratie in de waterflux op 90 cm beneden maaiveld berekend door op 90 cm beneden maaiveld de cumulatieve nitraatflux over de winterperiode te delen door de cumulatieve waterflux over de hele winterperiode.

6.1.3 Interpretatie van de modelresultaten

Om te voldoen aan de grenswaarde van 11.3 mg NO₃-N l⁻¹, werd aangenomen dat in 95 % van de 30 gesimuleerde jaren (= 29 jaar) de per winterperiode gesimuleerde gemiddelde nitraatstikstofconcentratie niet hoger mag zijn dan 11.3 mg NO₃-N l⁻¹ en dat in de resterende 5 % van de jaren de nitraatstikstofconcentratie met niet meer dan 50 % de norm van 11.3 mg NO₃-N l⁻¹ mag overschrijden. Wat betreft de richtwaarde van 5.65 mg NO₃-N l⁻¹, moet in 95 % van de jaren deze gesimuleerde gemiddelde nitraatstikstofconcentratie onder 5.65 mg NO₃-N l⁻¹ liggen en in de resterende 5 % van de jaren mag de concentratie niet meer dan 50 % hoger zijn dan 5.65 mg NO₃-N l⁻¹.

6.14 Resultaten

Er werden tabellen opgesteld die per 'bodem-gewas' combinatie de gesimuleerde maximaal toelaatbare nitraatstikstofresidu's op 1 oktober weergeven opdat voldaan wordt aan de grenswaarde van 11.3 mg NO₃-N l⁻¹, resp. de richtwaarde van 5.65 mg NO₃-N l⁻¹ en dit met en zonder het in rekening brengen van de procesfactor van 2.4.

De gemiddelde hoogst toelaatbare residu's op basis van de twee verschillende scenarioanalyses zijn over het algemeen vergelijkbaar. De resultaten van SA1b zijn weliswaar representatiever aangezien het hier gewogen gemiddelden betreft waar de verhouding van de oppervlakte van elk doorgerkende perceel ten opzichte van de totale oppervlakte van de 'textuur-oogstrest-combinatie' in rekening wordt gebracht, terwijl voor SA1a telkens maar 1 tot 2 proefvelden zijn doorgerkend per 'bodem-gewas' combinatie.

Uit de scenarioanalyse blijkt dat bij onbegroeide percelen, in tegenstelling tot begroeide percelen, in de late herfst en winter relatief meer NO₃-N door uitspoeling verloren gaat. Zonder gewas treedt er immers geen vochtopname en transpiratie op, waardoor de hoeveelheid effectieve neerslag groter is. Nitraten worden niet opgenomen (ontbreken van een gewas) en zullen dus, wegens hun goede wateroplosbaarheid, sneller naar diepere grondlagen meegevoerd worden. Daar komen ze terecht in het ondiepe grondwater en vandaar in het grond- en oppervlaktewater. Het effect van een groenbemester op het toelaatbaar nitraatstikstofresidu is zeer duidelijk. De combinaties met groenbemesters zijn steeds de combinaties met de hoogste toelaatbare nitraatstikstofresidu's. Wintertarwe is meestal nog onvoldoende ontwikkeld en heeft dus weinig effect op de nitraatconcentratie in de waterfluxen op 90 cm beneden maaiveld in de periode van 1 oktober tot en met 31 maart.

De braakvelden met oogstresten van bloemkool geven de laagst toelaatbare nitraatstikstofresidu's wat te wijten is aan de grote vrijzetting van stikstof uit de oogstresten.

Het maximaal toelaatbaar residu is het hoogst op de percelen met een ondiepe grondwaterstand (drainageklasse e of natter) wat te verklaren is door een verhoogde denitrificatie en grotere waterfluxen (verdunding) waardoor de nitraatconcentratie verlaagd wordt.

Bij gelijkaardige grondwaterstanden kon de invloed van de teelt op de nitraatuitspoeling nagegaan worden. In de Kempen en de Zandstreek geven percelen met gras in het algemeen een hoger toelaatbaar nitraatstikstofresidu dan braakpercelen met oogstresten van maïs. In de Leemstreek en Zandleemstreek daalt het hoogst toelaatbare nitraatstikstofresidu van graslanden naar braakpercelen met oogstresten van tarwe, maïs of aardappelen en verder naar oogstresten van suikerbieten. Voor de zware kleibodems in de Polders en de Duinen is het effect van denitrificatie en van de bodemvochtkarakteristieken duidelijk en kunnen over het algemeen iets hogere nitraatstikstofresidu's getolereerd worden.

Het effect van de textuur op de denitrificatieverliezen is uitgesproken: op zandbodems treedt vrijwel geen denitrificatie op in tegenstelling tot de fijnere texturen. Bodemprocessen blijken ook sterk jaarsafhankelijk zijn en variëren naargelang de hoeveelheid neerslag en de temperatuur in de periode 1 oktober-31 maart. De temperatuur heeft een grote invloed op microbiële processen zoals mineralisatie en denitrificatie. De neerslag beïnvloedt het vochtgehalte van de bodem dat bepalend is voor denitrificatie en uitspoeling.

Enkel voor de oogstresten met hoge C/N-verhouding (wintertarwe, maïs) werd er een netto-immobilisatie gesimuleerd. Bij suikerbieten werd in vergelijking met de andere teelten een verhoogde mineralisatie gesimuleerd. Suikerbieten benutten tijdens het groeiseizoen zeer efficiënt de beschikbare minerale stikstof. Bij een hoog stikstofaanbod aan de suikerbieten zal bij de oogst

echter veel stikstof aanwezig zijn in het loof dat tijdens de herfst en winterperiode kan vrijgezet worden door mineralisatie.

6.15 Afleiding van de nitraatstikstofresidunormen

Uit de resultaten van de scenarioanalyse bleek dat de verdeling van het nitraatstikstofresidu op 1 oktober een belangrijke rol speelt in de bepaling van het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu. Bij de verdeling waarbij het nitraatstikstofresidu zich voor 50 % in de laag 0-30 cm bevindt en voor telkens 25 % in de lagen 30-60 cm en 60-90 cm (2:1:1-verhouding), is de kans op overschrijding van de grenswaarde van de nitraatrichtlijn het kleinst en kan er een iets hoger residu getolereerd worden.

Om na te gaan welke verdeling van het nitraatstikstofresidu onder normale omstandigheden het meest voorkomt in de periode 1 oktober-15 november, werd beroep gedaan op metingen van het nitraatstikstofresidu in deze periode. Voor groenten werd de 1:1:1-verdeling van het nitraatstikstofresidu (gelijke verdeling over de 3 bodemlagen van 30 cm) representatief bevonden, terwijl voor de andere gewassen geopteerd werd voor een 2:1:1-verdeling.

Op basis van de resultaten van de scenarioanalyses, kan een vereenvoudigde overzichtstabel worden opgesteld. In Tabel 1 wordt zowel voor de grenswaarde (11.3 mg NO₃-N l⁻¹) als voor de richtwaarde (5.65 mg NO₃-N l⁻¹) een interval gegeven voor het maximaal toelaatbare nitraatstikstofresidu, al dan niet rekening houdend met de procesfactor.

Tabel 1: Maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu in functie van de beschouwde norm en met of zonder het in rekening brengen van de procesfactor op 1 oktober

Maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu (kg NO ₃ -N ha ⁻¹)				
grenswaarde (11.3 mg NO ₃ -N l ⁻¹)			richtwaarde (5.65 mg NO ₃ -N l ⁻¹)	
oppervlakkig grondwater	oppervlaktewater		oppervlaktewater	
zonder procesfactor	zonder procesfactor	met procesfactor	zonder procesfactor	met procesfactor
20-50	20-40	40-110	<20	20-50

In de eerste kolom van Tabel 1 ('grondwater'), wordt het interval voor het maximaal toelaatbare nitraatstikstofresidu weergegeven opdat voldaan zou zijn aan de grenswaarde in het oppervlakkige grondwater. Enkel de proefvelden met een oppervlakkige grondwaterstand (minder dan 90 cm onder maaiveld) (voor SA1a) en de situaties met ondiepe grondwaterstandsreeksen (voor SA1b) werden gebruikt voor de berekening van dit interval. Aangezien het hier gaat over de nitraatconcentratie in het ondiepe grondwater, werd de procesfactor niet in rekening gebracht.

Voor alle doorgerkende situaties samen variëren de toelaatbare nitraatstikstofresidu's tussen 20 en 40 kg NO₃-N ha⁻¹ indien de procesfactor niet in rekening wordt gebracht en indien voldaan moet zijn aan de grenswaarde van 11.3 mg NO₃-N l⁻¹.

Indien voldaan moet zijn aan de richtwaarde van 5.65 mg NO₃-N l⁻¹, moet het nitraatstikstofresidu zonder gebruik van de procesfactor kleiner zijn dan 20 kg NO₃-N ha⁻¹.

Mét procesfactor varieert het toelaatbaar nitraatstikstofresidu tussen 40 en 110 kg NO₃-N ha⁻¹ in het geval van de grenswaarde en tussen 20 en 50 kg NO₃-N ha⁻¹ in het geval van de richtwaarde.

Het maximaal toegelaten nitraatstikstofresidu opdat voldaan is aan de grenswaarde van de nitraatrichtlijn (mét procesfactor) werd, op basis van de simulatieresultaten en expertkennis, verder opgesplitst in functie van de grondsoort en gewas(groep) (Tabel 2).

Uit de simulaties bleek dat er onderscheid gemaakt diende te worden tussen twee bodemtypes, namelijk de zand (Z en S texturen) en de niet-zand bodems (zandleem, leem, klei). De simulaties leverden per ‘bodem-gewas’ combinatie een interval op voor het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu op 1 oktober. De uiteindelijke nitraatstikstofresidunormen werden echter gebaseerd op gemiddelde waarden en houden dus geen rekening met perceelsspecifieke kenmerken zoals de grondwaterstand aangezien dit in de praktijk moeilijk controleerbaar is. Daardoor kunnen de voorgestelde nitraatstikstofresidunormen in sommige gevallen te streng zijn, en soms niet streng genoeg om te voldoen aan de nitraatrichtlijn.

Tabel 2: Nitraatstikstofresidunormen (kg NO₃-N ha⁻¹) in functie van teelt en textuur

Teelt/teeltcombinatie	Textuur	
	Zand	Niet-zand
Maïs	60	90
Bieten	50	70
Groenten zonder afvoer van oogstresten	40	50
Gras	70	100
Graangewassen + groenbemester	70	100
Andere gewassen	50	80

Op de zandgronden varieert het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu op 1 oktober tussen 40 en 70 kg NO₃-N ha⁻¹ en op de niet-zandbodems varieert het tussen 50 en 100 kg NO₃-N ha⁻¹ (0-90 cm). De gewassen kunnen ingedeeld worden in 6 groepen: maïs, suiker- en voederbieten, gras, groenten zonder afvoer van oogstresten, graangewassen gevolgd door een groenbemester en alle andere gewassen (waaronder aardappelen, graangewassen zonder groenbemester, groenten met afvoer van gewasresten, groenten gevolgd door een groenbemester,...). Indien de gewasresten van groenten (en van bieten) na de oogst niet verwijderd worden van het veld, kan nog een grote hoeveelheid stikstof vrijkomen. Deze minerale stikstof is onderhevig aan uitspoeling, zodat bij afleiding van het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu terecht onderscheid wordt gemaakt tussen percelen waar de oogstresten wel of niet verwijderd worden. In het geval van een tijdig ingezaaide (voor 1 september) groenbemester of gras zal er nog stikstof kunnen worden opgenomen wat resulteert in hogere toegelaten nitraatstikstofresidu's in deze situaties.

6.1.6 Ruimtelijke analyse

De relatie tussen het nitraatstikstofresidu en de nitraatuitspoeling kan ook ruimtelijk geanalyseerd en voorgesteld worden. De output van het eerste type scenarioanalyses laat tal van (ruimtelijke) bevragingen toe.

Zo kan perceelsgewijs het maximaal toegelaten nitraatstikstofresidu (zoals gesimuleerd met WAVE) geconfronteerd worden met het volgens de voorgestelde normen toegelaten nitraatstikstofresidu. Een vergelijking van beide waarden geeft aan of bij navolging van de voorgestelde norm, al dan niet aan de Europese nitraatrichtlijn voldaan wordt. Uit de ruimtelijke analyse van de resultaten blijkt dat het oppervlaktaandeel waarvoor de voorgestelde nitraatstikstofresidunorm hetzelfde is als het maximaal toelaatbaar residu, beperkt is. Dit is het gevolg van het feit dat de normen afgeleid werden op basis van gemiddeld toelaatbare residu's per bodemtextuurgroep en per gewasgroep.

Het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu (output van WAVE), bij de 3 verschillende verdelingen van het NO₃-N-residu in de bodem, werd cartografisch voorgesteld, op perceelsniveau, in de verschillende regio's van Vlaanderen, op basis van de in 1998 bij de Mestbank aangegeven teelt per perceel en rekening houdend met een procesfactor van 2.4. Naast

de cartografische voorstelling van het maximaal toegelaten residu onder verschillende randvoorwaarden, laat de output van SA1b nog veel andere ruimtelijke analyses toe. Hier zijn zeer veel interessante vraagstellingen mogelijk, waarop op basis van de resultaten van SA1b een antwoord kan geformuleerd worden. Enkele voorbeelden van vragen zijn:

- Bij welke behandeling zijn welke simulatieëenheden conform de grenswaarde van 11.3 mg NO₃-N l⁻¹ en bovendien in meer dan 50 % van de jaren conform de richtwaarde van 5.65 mg NO₃-N l⁻¹?
- Welke gemiddelde NO₃-N-concentratie resulteert uit de verschillende doorgerekende behandelingen voor een Zdg-bodem in de Zandstreek en de Kempen ?

Uiteraard zijn nog zeer veel andere vraagstellingen mogelijk.

6.1.7 Besluit

Op basis van de resultaten van de scenarioanalyse en expertkennis werden nitraatstikstofresidunormen, geldig op 1 oktober, afgeleid in functie van textuur (zand of niet-zand) en gewasgroep (6 categorieën), rekening houdend met de verdeling van het nitraatstikstofresidu over het bodemprofiel. De simulatieresultaten werden cartografisch voorgesteld en aangewend voor ruimtelijke analyses.

6.2 Gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse

6.2.1 Doelstelling

Om na te gaan hoe betrouwbaar de modelresultaten zijn, werd een gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse uitgevoerd met WAVE.

Aan de hand van een foutenanalyse kan het verband tussen de onzekerheid op de modelinvoer en de onzekerheid op de modeluitvoer bepaald worden. Bovendien kan de grootte van de onzekerheid op de modeluitvoer bekomen worden en kunnen die parameters die een significante bijdrage leveren tot de onzekerheid op de modeluitvoer geselecteerd worden.

6.2.2 Werkwijze

Een foutenanalyse wordt doorgaans opgesplitst in een gevoeligheidsanalyse en een onzekerheidsanalyse. In een gevoeligheidsanalyse wordt bepaald welke parameters de meeste invloed hebben op de modeluitvoer. Hierbij wordt voor elke parameter enkel een bereik opgesteld waarbinnen deze kan variëren, zonder dat er aan dit bereik een kansverdeling wordt gekoppeld. Het resultaat is een beperktere parameterset die echter wel het grootste deel van de onzekerheid op de modeluitvoer verklaart. Daarna wordt een onzekerheidsanalyse uitgevoerd met de kleinere parameterset. Om uitspraak te kunnen doen over de waarschijnlijk van de verschillende modeluitvoeren en dus over de onzekerheid op de modeluitvoer, wordt hiervoor wel aan elke parameter een kansverdeling toegekend.

Zowel de gevoeligheids- als de onzekerheidsanalyse werd uitgevoerd met behulp van het softwarepakket UNCSAM 1.1 (Janssen *et al.*, 1993), dat gebruik maakt van een Monte Carlo sampling methode om voor de geselecteerde modelinvoer random parameterwaarden te genereren en waarmee een statistische analyse kan uitgevoerd worden, die het verband legt tussen de onzekerheid op de modelinvoer en de onzekerheid op de modeluitvoer, zijnde de nitraatstikstofconcentratie in de waterflux op 90 cm beneden maaiveld.

6.2.3 Resultaten

6.2.3.1 Gevoeligheidsanalyse

Wegens de beperkte beschikbaarheid van gegevens over de onzekerheid of variatie op de modelinvoer, werd de gevoeligheidsanalyse beperkt tot de onzekerheid op (1) het nitraatstikstofresidu, (2) stikstofgehalte en C/N-verhouding van de oogstresten en (3) de bodemparameters beschikbaar in Aardewerk. Uit de analyse bleek dat de onzekerheid op het nitraatstikstofresidu de belangrijkste bijdrage leverde tot de onzekerheid op de modeluitvoer. Er werd vanuit gegaan dat het nitraatstikstofresidu lognormaal verdeeld is en bepaald wordt met een precisiegraad van 20 % (met in rekening brengen van onzekerheden bij de staalname en analyse).

6.2.3.2 Onzekerheidsanalyse

Om de onzekerheid te karakteriseren is de breedte van het 90 % betrouwbaarheidsinterval op de nitraatstikstofconcentratie in de waterflux op 90 cm beneden maaiveld gekozen. Dit betrouwbaarheidsinterval geeft de grenzen aan waarbinnen de nitraatstikstofconcentratie met 90 procent zekerheid ligt. Uit de onzekerheidsanalyse bleek dat de verhouding tussen het nitraatstikstofresidu (in kg N ha⁻¹) en de onzekerheid op de nitraatstikstofconcentratie in de waterflux (in mg NO₃-N l⁻¹) afhangt van de bodem (textuur en hydrologie), het gewas en de verdeling van het nitraatstikstofresidu in het profiel.

6.2.4 Besluit

De onzekerheidsanalyse heeft uiteraard implicaties voor de interpretatie van de scenarioanalyse, omdat één deterministische waarde vervangen wordt door een betrouwbaarheidsinterval.

De vrij grote onzekerheid op de nitraatstikstofconcentratie in de waterflux (bij een nitraatstikstofresidu van 70 kg NO₃-N ha⁻¹ tussen 1.99 en 3.62 mg NO₃-N l⁻¹ met procesfactor) leidt tot verschillen in hoogst toelaatbare nitraatstikstofresidu naargelang het standpunt men inneemt en dus naargelang men opteert voor de boven- of ondergrens van het betrouwbaarheidsinterval. Voor de bepaling van het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu op basis van de modelresultaten, werd steeds rekening gehouden met de gemiddelde gesimuleerde waarde omwille van de praktische werkbaarheid. Vanuit wetenschappelijk oogpunt dient echter rekening te worden gehouden met een zekere foutenmarge op de modelresultaten. Het hoogst toelaatbare residu bekomen in de scenarioanalyses geeft het hoogst toelaatbare nitraatstikstofresidu dat gemiddeld niet tot een overschrijding van de norm leidt.

6.3 Scenarioanalyse ter bepaling van het perceelsmanagement

6.3.1 Doelstelling

In het tweede type scenarioanalyse werd voor alle geïdentificeerde én via het N-(eco)²-GIS karakteriseerbare combinaties bodemserie – gewasrotatie 1998-1999-2000 in 6 kleine stroombekkens, met het WAVE-model de water- en stikstofdynamiek gesimuleerd over een periode van 30 volledige jaren voor een aantal bemestingsscenario's. Dit betekent dat verondersteld wordt dat de teeltrotatie van 1998-1999-2000 en het bemestingsscenario aangehouden blijven over de 30 jaren en dat de gesimuleerde bodemtoestand op de dag vóór een nieuw teeltseizoen gebruikt wordt als startpunt voor dat teeltseizoen. Op deze wijze werden per bemestingsscenario 30 waarden bekomen van het nitraatstikstofresidu op 1 oktober en zijn

verdeling in de diepte. Deze kunnen vergeleken worden met de in Tabel 2 voorgestelde bodemtextuur- en teeltspecifieke nitraatstikstofresidunormen die voorgesteld werden op basis van het eerste type scenarioanalyse. Vermits ook de nitraatconcentratie die het bodemprofiel verlaat op 90 cm gesimuleerd werd, kon nagegaan worden of met de voorgestelde nitraatstikstofresidunormen de grenswaarde $11.3 \text{ mg l}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$, opgelegd door de Europese nitraatrichtlijn, gerespecteerd werd.

6.3.2 Werkwijze

Voor 6 kleine stroombekkens in Vlaanderen werden scenarioanalyses uitgevoerd ter bepaling van het perceelsmanagement (teeltrotatie en bemestingsstrategie) waarmee de voorgestelde nitraatstikstofresidunormen gerespecteerd worden. In deze 6 gebieden werd per perceel de gewasrotatie doorgerekend die in 1998/1999/2000 op het perceel werd toegepast. De simulatieperiode verloopt van 1 oktober 1970 tot 30 september 2001. Op 1 oktober 1970 wordt een nitraatstikstofresidu in het model ingegeven van $70 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$. In tegenstelling tot de eerste scenarioanalyse wordt het nitraatstikstofresidu niet elk jaar op een bepaalde waarde geherinitialiseerd.

De gewassen die in de simulaties aan bod komen zijn: wintertarwe, gras (graas- en maaiweiden), maïs, suikerbieten en aardappelen.

Er werden 4 bemestingsstrategieën geëvalueerd (uitgezonderd grasland):

- volledige invulling van de algemene forfaitaire bemestingsnormen die volgens het MAP gelden vanaf 1/1/2003 met een maximale toegelaten dosis dierlijke mest aangevuld met chemische mest (uitgezonderd tarwe);
- volledige invulling van de algemene forfaitaire bemestingsnormen die volgens het MAP gelden vanaf 1/1/2003 met een maximale toegelaten dosis chemische meststoffen, aangevuld met dierlijke meststof;
- een verlaagde bemesting t.o.v. de forfaitaire norm, die enerzijds wordt ingevuld met dierlijke mest, anderzijds met chemische meststoffen, zodanig dat de hoeveelheid werkzame stikstof voor suikerbieten, wintertarwe en aardappelen 150 kg N ha^{-1} en voor maïs 120 kg N ha^{-1} bedroeg.

Voor maaiweiden werd uit gegaan van 6 maaisneden en van een maximale invulling van de algemene normen ($450 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$) met runderdrijfmest (240 kg N ha^{-1}) en chemische meststoffen (210 kg N ha^{-1}).

Voor permanent grasland werd uitgegaan van een omweidesysteem met twee maaibeurten en zes begrazingsbeurten. Tijdens de begrazing wordt in het model een dagelijks constante hoeveelheid dierlijke mest toegediend, bepaald door het aantal dieren en de forfaitaire uitscheidingsnormen. De norm ($450 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$) werd maximaal opgevuld met runderdrijfmest aangevuld met chemische meststoffen. Naast de maximale opvulling van de normen werd voor permanent grasland op zandbodems ook een scenario met een verlaagde bemesting van $350 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$ doorgerekend (210 kg N ha^{-1} uit dierlijke mest, 140 kg N ha^{-1} uit chemische meststof).

6.3.3 Interpretatie van de modelresultaten

Voor de nitraatconcentratie in de waterflux geldt dat in 95 % van de jaren (= 29 van de 30 gesimuleerde jaren) voldaan moet zijn aan de grenswaarde van 11.3 mg NO₃-N l⁻¹ en dat in de resterende 5 % van de jaren de nitraatstikstofconcentratie niet meer dan 50 % de norm van 11.3 mg NO₃-N l⁻¹ mag overschrijden. Op deze wijze werden de resultaten van de eerste scenarioanalyse geïnterpreteerd en werden per gewas(groep) en textuur nitraatstikstofresidunormen afgeleid (Tabel 2).

In de scenarioanalyse ter bepaling van het perceelsmanagement werd vervolgens nagegaan bij welk bemestingsscenario in minstens 90 % van de jaren (dus in 27 van de 30 jaren) het op 1 oktober gesimuleerde nitraatstikstofresidu niet hoger was dan de voor die specifieke 'bodem-gewas' combinatie afgeleide nitraatstikstofresidunorm.

6.3.4 Resultaten

Voor permanent grasland en monocultuur maïs werden per bemestingsscenario tabellen opgesteld met de gemiddelde (over 30 jaren) gesimuleerde waterflux, de cumulatieve nitraat- en ammoniumuitspoeling, de gemiddelde NO₃-N- en NH₄-N-gehalten in de bodem (0-90 cm) op 1 oktober en de gemiddelde NO₃-N-concentraties in het water met en zonder procesfactor. Tevens werd het percentage scenario's aangegeven die voldoen aan de grenswaarde van de nitraatrichtlijn en aan de in Tabel 2 voorgestelde nitraatstikstofresidunormen. Ter controle werden ook tabellen opgesteld met de gesimuleerde gemiddelde waarden voor de verschillende deelprocessen (N-opname, mineralisatie, denitrificatie, nitrificatie en immobilisatie).

Voor permanent grasland met een bemesting van 450 kg totale N ha⁻¹ j⁻¹ werd een gemiddelde nitraatstikstofresidu van 84 kg NO₃-N ha⁻¹ gesimuleerd op niet-zand bodems. Ongeveer 90 % van de doorgerekende percelen hebben een gemiddelde gesimuleerde nitraatstikstofresidu (over 30 jaren) dat lager is dan de in Tabel 2 voorgestelde nitraatstikstofresidunorm. Wanneer men echter de resultaten interpreteert volgens §6.3.3, blijkt dat slechts voor 51 % van de situaties het nitraatstikstofresidu in 90 % van de jaren niet hoger is dan de voorgestelde residunorm. Voor 64 % van de scenario's geldt dat voldaan is aan de grenswaarde van de nitraatrichtlijn.

Op de zandgronden voldeden slechts een gering percentage van de doorgerekende situaties bij een bemesting van 450 kg totale N ha⁻¹ j⁻¹. Bij een bemestingsdosis van 350 kg totale N ha⁻¹ was het gemiddelde nitraatstikstofresidu (over 30 jaren) in ongeveer 90 % van de situaties niet hoger dan de voorgestelde norm van 70 kg NO₃-N ha⁻¹. In dit geval voldeden 68 % van de scenario's aan de nitraatstikstofresidunorm en 73 % aan de grenswaarde van de nitraatrichtlijn.

Voor monocultuur maïs werd met de verlaagde bemesting 120 kg werkzame N ha⁻¹ toegediend, enerzijds onder chemische en anderzijds onder dierlijke vorm. In bijna alle gevallen wordt zowel aan de nitraatrichtlijn als aan de nitraatstikstofresidunorm voldaan volgens de interpretatie van §6.3.3, en dit zowel op de zand als op de niet-zand bodems, bij een maximale invulling van de forfaitaire normen was dit percentage lager.

Ook in het geval van rotaties werden tabellen opgesteld met het gemiddelde NH₄-N en NO₃-N-gehalte (kg ha⁻¹) op 1 oktober en met het percentage van de scenario's die voldoen aan de voorgestelde nitraatstikstofresidunorm en aan de grenswaarde van de nitraatrichtlijn.

In het algemeen voldoen in elke 'rotatie-textuur' scenariogroep minstens 90 % van de scenario's met verlaagde bemesting aan de grenswaarde van de nitraatrichtlijn. De scenariogroepen met bemestingen volgens de forfaitaire normen voldoen daarentegen in minder dan 90 % van de scenario's. Voornamelijk bij rotaties met suikerbieten worden gemiddeld hogere

nitraatstikstofresidu's gesimuleerd wegens de vrijstelling van stikstof uit het suikerbietenloof, wat erop wijst dat hiermee rekening moet worden gehouden bij de bemesting van de volgteelt om het nitraatstikstofresidu te beperken. In de simulaties is hiermee geen rekening gehouden en werd steeds dezelfde bemesting toegediend (bemesting volgens de forfaitaire norm of verlaagde bemesting), onafhankelijk van de voorsteelt.

6.3.5 Ruimtelijke analyse

De output van SA2 laat toe om voor elk perceel in een afgebakend gebied (gekenmerkt door een bodem, een teeltrotatie en een klimaat) te bepalen of een bepaald bemestingsscenario al dan niet leidt tot het respecteren van de nitraatrichtlijn en het respecteren van de voorgestelde nitraatstikstofresidunormen (Tabel 2). De relatie tussen perceelsmanagement, het nitraatstikstofresidu en de nitraatuitspoeling kan ook ruimtelijk voorgesteld en geanalyseerd worden. Verschillende aspecten van de output kunnen cartografisch (op perceelsniveau) voorgesteld worden:

- Voldoet het perceel (gekenmerkt door een bodemserie en een teeltrotatie) bij het gegeven bemestingsscenario aan de nitraatrichtlijn (minstens 29 van de 30 (volledige) jaren de $[\text{NO}_3\text{-N}] < 11.3 \text{ mg l}^{-1}$)?
- Voldoet het perceel (gekenmerkt door een bodemserie en een teeltrotatie) bij het gegeven bemestingsscenario aan de nitraatstikstofresidunormen in Tabel 2?
- Tot welke gemiddelde $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie in de winterperiode leidt elk bemestingsscenario?
- Tot welke gemiddelde $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie (over het volledige jaar) leidt elk bemestingsscenario?
- Hoeveel jaren blijft de $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie onder de grenswaarde van 11.3 mg l^{-1} ?
- Hoeveel jaren blijft het nitraatstikstofresidu onder de norm afgeleid in Tabel 2?

6.3.6 Besluit

De forfaitaire bemestingsnormen 2003 die werden doorgerekend in de tweede scenarioanalyse (SA2), werden destijds door deskundigen zo vastgesteld dat, globaal genomen, de voorgestelde normen voldoende waren om landbouw (productie) en milieu in grote mate te verzoenen, rekening houdend met de nitraatrichtlijn en de op dat ogenblik beschikbare kennis. De huidige simulaties tonen aan dat deze normen aanvaardbaar zijn vanuit milieu-oogpunt en dat zij tot een beperkt nitraatstikstofresidu, en dus tot een beperkte nitraatuitspoeling, kunnen leiden, mits de nodige voorzorgsmaatregelen in acht worden genomen en mits rekening gehouden wordt met perceelsspecifieke kenmerken.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de bemestingsnormen geen bemestingsadviezen zijn! Een belangrijk aspect hierbij is dat de normen geen rekening houden met de reële bodemvoorraad. Er werd duidelijk aangetoond dat bemesten volgens de bestaande forfaitaire normen geen garantie inhoudt dat de voorgestelde nitraatstikstofresidunormen worden gerespecteerd.

Of voldaan wordt aan de nitraatstikstofresidunormen bij een maximale invulling van de forfaitaire bemestingsnormen is afhankelijk van perceelsspecifieke kenmerken. Bij een oordeelkundige bemesting moet steeds rekening worden gehouden met de stikstofvoorraad in de bodem, met de stikstofbehoefte van de teelt, met de stikstofvrijstelling uit oogstresten en groenbemesters én met het stikstofleverend vermogen van de bodem om het nitraatstikstofresidu op een aanvaardbaar niveau te kunnen houden.

Een oordeelkundige bemesting zal in de meeste gevallen leiden tot het respecteren van de residunormen, al bleek dit niet rechtstreeks uit de simulatieresultaten. In de simulatieresultaten werden immers steeds dezelfde bemestingsscenario's doorgerekend (maximale en verlaagde

bemesting) en werd de bemesting niet aangepast aan perceelsspecifieke kenmerken. Wel bleek duidelijk uit de simulatieresultaten dat bij een verlaagde bemesting in bijna alle gevallen voldaan werd aan de voorgestelde nitraatstikstofresidunormen, in tegenstelling tot de scenario's met een maximale invulling van de forfaitaire normen.

De analyse van de output van SA2 leerde tevens dat de voorgestelde nitraatstikstofresidunormen geen sluitende garantie bieden wat betreft het respecteren van de grenswaarde van de nitraatrichtlijn. De voorstelde nitraatstikstofresidunormen blijken in sommige gevallen te streng, en soms niet streng genoeg om te voldoen aan de nitraatrichtlijn. Deze schijnbare tegenstelling kan verklaard worden door het feit dat de scenarioanalyse ter bepaling van de nitraatstikstofresidunormen (SA1) als resultaat intervallen aangaf voor het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu per 'gewas-textuur' combinatie. De uiteindelijke nitraatstikstofresidunormen (Tabel 2) werden echter gebaseerd op gemiddelde waarden omwille van de praktische haalbaarheid en controleerbaarheid. Hierdoor kan het zijn dat op sommige percelen wel aan de nitraatstikstofresidunorm is voldaan maar niet aan de grenswaarde van de nitraatrichtlijn, en omgekeerd.

De output van SA2 kan cartografisch voorgesteld worden en laat toe om zeer uiteenlopende vragen te beantwoorden.

7 Aanbevelingen voor de beperking van het nitraatstikstofresidu

7.1 Doelstelling

Er werden door het consortium voor de belangrijkste teelten aanbevelingen voor de landbouwers geformuleerd die ervoor kunnen zorgen dat het nitraatstikstofresidu op een aanvaardbaar niveau blijft.

Indien geen hinderlijke lagen aanwezig zijn in het bodemprofiel, zal de N-uitputting van de bodem voornamelijk afhankelijk zijn van de diepte en de intensiteit van de beworteling, de tussen-rij afstand van de teelt, de rijpheidstoestand van het gewas bij de oogst en de ruimtelijke spreiding van de minerale stikstof in het bodemprofiel. Er werd voor graas- en maaiweiden en voor de belangrijkste akkerbouwgewassen (maïs, suikerbieten, aardappelen en graangewassen) en groenten aangegeven welke knelpunten er zijn met betrekking tot nitraatuitspoeling en welke maatregelen getroffen kunnen worden om het nitraatstikstofresidu te beperken. Tevens werd de noodzaak van een beredeneerde bemesting besproken.

Deze aanbevelingen werden steeds ondersteund door proefveld- en/of literatuurgegevens en worden in deze samenvatting kort besproken.

7.2 Beredeneerde bemesting

Bij het streven naar een beredeneerde bemesting kan er op drie niveaus voor ondersteuning gezorgd worden, namelijk via een standaardgrondontleding, een mestanalyse en een mineraal stikstofonderzoek (0-90 cm).

- (1) Een regelmatige standaardgrondontleding geeft inzicht in de algemene chemische bodemvruchtbaarheid van het perceel.
- (2) De samenstelling van dierlijke mest kan sterk afwijken van de gemiddelde samenstelling; rekenen met gemiddelde samenstelling en werking van dierlijke mestsoorten leidt dikwijls tot een onderschatting van de hoeveelheid werkzame stikstof die toegediend wordt, met alle

gevolgen vanden voor het nitraatstikstofresidu. Anderzijds kan echter ook minder stikstof toegediend worden dan gemiddeld verwacht, wat dan weer nadelig is voor de opbrengst en de N-opname door het gewas. Deze onbekende factor kan vermeden worden door het uitvoeren van een mestanalyse.

- (3) De stikstofbemesting dient te gebeuren op basis van een optimale combinatie van:
- de hoeveelheid minerale stikstof aanwezig in de bodem;
 - de hoeveelheid minerale stikstof die vrijkomt uit de organische stof van de bodem en eventuele toediening van organische bemesting, oogstresten en groenbemesters
 - de aanvullende hoeveelheid minerale stikstof, toegediend op basis van een perceelsspecifiek bemestingsadvies op basis van een mineraal N-onderzoek.

Door de stikstofbemesting zo kort mogelijk voor het zaaien of planten van de akkerbouwteelt uit te voeren wordt verhinderd dat de nitraat zich al beweegt tot lager dan 30 cm diepte en bijgevolg niet of te laat opgenomen wordt door het gewas. De toediening van dierlijke mest dient te gebeuren onder gunstige bodemomstandigheden, zodat het effect op de bodemstructuur beperkt blijft.

7.3 Aanbevelingen per gewas(groep)

7.3.1 Maïs

Maïs laat bij een overdreven stikstofbemesting het teveel aan stikstof gewoon achter in de bodem. Indien oordeelkundig wordt bemest volgens het advies, kunnen de nitraatstikstofresidunormen in praktijk gerealiseerd worden. Een bijkomende aanbeveling is het inzaaien van gras na de oogst van de maïs, waarvan in het daaropvolgende voorjaar één snede afgevoerd wordt.

Maïs in vruchtwisseling biedt ten opzichte van maïs in monocultuur meer mogelijkheden om het gebruik van stikstofmeststoffen te beperken zonder belangrijke opbrengstverliezen.

7.3.2 Graangewassen

De gefractioneerde toediening van stikstof zorgt voor een betere benutting van de toegediende bemesting. Met de combinatie van drijfmest toegediend in het voorjaar en een verlaagde N-bemesting via kunstmest werden op proefvelden vergelijkbare opbrengsten behaald als bij de adviesbemesting onder de vorm van zuivere kunstmeststikstof. Er moet evenwel rekening gehouden worden met de samenstelling van de drijfmest.

Na de oogst van graangewassen is de nitraatstikstofhoeveelheid in de bodem eerder beperkt doordat graangewassen over een uitgebreid wortelstelsel beschikken en het bodemprofiel goed kunnen uitputten. In de periode na de oogst kan de hoeveelheid minerale stikstof in het bodemprofiel echter sterk toenemen door vrijzetting van stikstof door mineralisatie uit de bodemhumus, of de stikstof die toegediend werd door organische bemesting.

Wanneer een groenbemester tijdig is ingezaaid (voor 1 september), is deze in staat om een hoeveelheid stikstof (soms tot meer dan 50 kg N ha⁻¹) op te nemen. Wanneer voor de zaai van een groenbemester een organische bemesting werd uitgevoerd, bestaat het risico dat het nitraatstikstofresidu niet voldoet aan de norm ter zake. De organische bemesting moet in ieder geval beperkt zijn. Er moet algemeen gesteld worden dat geen drijfmest meer mag toegediend worden op akkerland als er geen gewas geteeld wordt.

7.3.3 Suikerbieten

Een beredeneerde bemesting van suikerbieten is niet alleen belangrijk vanuit milieu-oogpunt maar tevens vanuit financieel oogpunt (opbrengst en kwaliteit).

Als de totale beschikbare hoeveelheden stikstof hoger zijn dan de stikstofbehoefte van het gewas, worden de suikeropbrengst en de extraheerbaarheid negatief beïnvloed.

Naast het belang van de beschikbare hoeveelheden voor de plant, is de localisatie ervan in de bodem zeer belangrijk. De aanwezigheid van stikstof in de bovenste bodemlagen (0-60 cm) is belangrijk om een goede ontwikkeling van de plant in het begin van de groei te verzekeren. Een hoge stikstofvoorraad in de diepere lagen kan leiden tot een buitensporige bladhergroei op het einde van het seizoen, met een afname van het suikergehalte en de te verwachten financiële opbrengst als gevolg. Veel stikstof in de diepere bodemlagen in het voorjaar kan vermeden worden door de keuze en een beredeneerde bemesting van de voorteelt en door de inzaai van een groenbemester.

Rijtoediening van minerale stikstof kan het risico op nitraatuitspoeling reduceren.

Voor een beredeneerde bemesting van de volgteelt moet rekening gehouden worden met de stikstofvrijstelling uit het suikerbietenloof.

7.3.4 Aardappelen

De efficiëntie van stikstofmeststoffen in de aardappelteelt is vaak gering. Dit is vooral te wijten aan de geringe bewortelingsdiepte en de beperkte bewortelingsintensiteit van het gewas.

Het gebruik van traagwerkende N-meststoffen, een correcte inschatting van de bemestingswaarde bij het gebruik van dierlijke mest, de fractionering van de N-bemesting en de bepaling van de N-bijbemesting na een meting tijdens het groeiseizoen, zijn allemaal factoren die een bijdrage kunnen leveren tot de verhoging van de efficiëntie van de stikstofbemesting en het beperken van de hoeveelheid reststikstof bij de oogst. Fractioneren is aangeraden omdat er bij een te grote beschikbaarheid van stikstof vlak voor het planten zoutschade kan optreden, omdat er uitspoeling kan optreden tussen de periode van strooien en het begin van intensieve N-opname door het gewas of omdat een te grote N-gift de groeiperiode kan verlengen. Het toedienen van traagwerkende meststoffen steunt op hetzelfde principe als een gedeelde gift, namelijk een spreiding van de N-voorziening in functie van de gewasontwikkeling.

De rol van het klimaat is een niet te onderkennen factor: in seizoenen waarbij er voldoende bodemvochtreserves voorhanden zijn, zal de efficiëntie van de N-opname en het opbrengstniveau een stuk hoger zijn.

Omdat tussen het doodspuiten van de aardappelen (de N-opname stopt) en het inzaaien van snijrogge of gerst enkele weken verlopen, wordt aanbevolen om geen drijfmest toe te dienen omdat de bodem immers nog voldoende stikstof beschikbaar stelt door mineralisatie en omdat de opname door snijrogge en vooral door gerst in de herfst en winter beperkt is.

7.3.5 Grasland

Op gemaaid grasland zijn weinig problemen te verwachten voor wat betreft de accumulatie van nitraatstikstof in de bodem, in tegenstelling tot begraasd grasland waar bijkomende beperkingen in het beweidingssysteem en beweidingsperiode aan te bevelen zijn om het risico op nitraatuitspoeling te verminderen. Er kan gesteld worden dat de N-uitspoeling onder goed uitgebaat, productief grasland klein is. De grootste uitspoeling komt hier van de N-uitscheiding van de weidende dieren, wanneer deze in hun voeding een overmaat aan eiwit aangeboden krijgen. Er moet dus gestreefd worden naar een evenwichtige voeding. Dit betekent dus dat zowel op maaibeiden als op grasweiden de N-bemesting beredeneerd moet uitgevoerd worden. Omdat

een dier zoveel mogelijk mineralen en eiwit in melk en/of vlees zou omzetten moet het de erfelijke aanleg daartoe hebben (via veeselectie) en moet het een juist gebalanceerd rantsoen voorgeschoteld krijgen. Door een groter aandeel zeer energierijke, eerder eiwitarme producten in te schakelen wordt de uitstoot van stikstof in mest en urine gereduceerd.

Er werd aangetoond dat urineplekken die laat in het groeiseizoen ontstaan, sterk kunnen bijdragen aan uitspoeling van nitraatstikstof. Vroeger opstallen van het vee zal dus een gunstig effect hebben op de nitraatconcentratie in het grondwater. Door de overgang van onbeperkte naar beperkte beweiding wordt een bijkomende verbetering nagestreefd. Hierdoor daalt logischerwijze het aantal urinelozingen en dus de N-excretie door het vee in de weide.

Bij het scheuren van ouder grasland voor akkerland kunnen grote hoeveelheden stikstof vrijkomen uit de bodemorganische stof. Het scheuren van ouder grasland dient daarom te gebeuren in het voorjaar en wordt gevolgd door een gewas met een hoge N-opname en een lange groeiperiode. Voederbieten zijn aangewezen als eerste teelt op de tijdelijke akker.

7.3.6 Groenten

De meeste groenten hebben in tegenstelling tot akkerbouwgewassen (aardappelen uitgezonderd) een bewortelingsdiepte die beperkt blijft tot 60 cm, waardoor minerale N aanwezig in de onderliggende laag onbenut blijft. Daarenboven kan gesteld worden dat ook de bewortelingsintensiteit van de meeste groenten beperkt is, waardoor de uitputting van de doorwortelde zone laag is. Groenten kunnen naar bewortelingsdiepte opgedeeld worden in 3 categorieën (Tabel 3).

Een aantal groenten wordt bovendien geoogst terwijl de groei in volle gang is. Daarnaast kan ook een inefficiënte distributie van de bemesting tot hoge N_{\min} -residu's bij de oogst leiden.

Een beredeneerde bemesting is noodzakelijk om nitraatuitspoeling bij het begin van de teelt en in het najaar zoveel mogelijk te vermijden. Bij groenten met een lage N-opname bij het begin van de teelt leidt een hoge N-bemesting bij planten of zaaien tot een lage N-efficiëntie. Het stikstofbijmeststelsel verhoogt de N-efficiëntie bij groenten. Bij groenten met een grote afstand tussen de rijen is rijbemesting in plaats van breedwerpige bemesting aan te raden.

Tabel 3: Indeling groenten naar bewortelingsdiepte

Categorie I ≤ 30 cm	Categorie II 30 - 60 cm	Categorie III > 60 cm
Bonen Erwten Sla Spinazie	Andijvie Bleekselder Bloemkool Broccoli Knolselder Prei Rode kool Savooikool Wortelen	Spruitkool Witte kool

Om het NO_3 -N-residu zoveel mogelijk te beperken, is het aangewezen om reeds bij de teelt voorafgaand aan de groenten het residu te beheersen en bij aanvang van de teelt van groenten rekening te houden met de NO_3 -N-verdeling in het profiel en de keuze van de teelt af te stemmen op deze verdeling.

Twee systemen kunnen voorgesteld worden:

- Teeltsysteem I: Teeltkeuze en -periode zodanig afstemmen zodat de oogstdatum voor 15 augustus valt + inzaai van een diepwortelende groenbemester of diepwortelend volggewas ten laatste op 20 augustus. Hierdoor zal de groenbemester of het volggewas voldoende tijd hebben om zich te ontwikkelen en de NO₃-N uit de diepere lagen op te nemen, hoewel de laag van 60 tot 90 cm in sommige gevallen onvoldoende bereikbaar kan zijn voor de wortels.
- Teeltsysteem II: Indien afgeweken wordt van teeltsysteem I, dient de teeltkeuze afgestemd te worden op de NO₃-N-verdeling in de bodem en is een NO₃-N-analyse verplicht voor iedere teelt. Dit betekent dat een teelt van groenten behorend tot een bepaalde categorie slechts zou kunnen doorgaan indien aan bepaalde voorwaarden voldaan wordt (Tabel 4).

Tabel 4: Voorwaarden, ingedeeld per groentecategorie, voor het verbouwen van groenten met oogstdatum na 15 augustus (teeltsysteem II)

N _{min} -verdeling	Diepte	Maximale NO ₃ -N hoeveelheid bij aanvang teelt kg N ha ⁻¹
Categorie I	30-90	≤ 50
Categorie II	60-90	≤ 25
Categorie III: Geen bijkomende voorwaarden		

Indien voor een bepaalde categorie aan deze voorwaarden niet voldaan kan worden, dient een andere categorie groente, een teeltsysteem I of een akkerbouwgewas geteeld te worden.

De N-residu's bij de oogst van groenten kunnen hoog zijn. Bovendien is de N-hoeveelheid in de oogstresten van groenten vaak hoog tot zeer hoog en kunnen reeds aanzienlijke hoeveelheden na de oogst mineraliseren. Daarom is het noodzakelijk om bij de teelt van groenten bijkomende maatregelen te nemen om de vooropgestelde normen tussen 1 oktober en 15 november te kunnen realiseren.

Bij groenten die vroeg (voor 15 augustus) geoogst worden, moet een diepwortelende navrucht geteeld of een diepwortelende groenbemester ingezaaid worden (Teeltsysteem I). Bij bloemkool en broccoli is het telen van een tweede bloemkool- of brocoliteelt een alternatief indien ≤ 25 NO₃-N kg ha⁻¹ in de 60-90 cm aanwezig is. Ook bij teeltsysteem II dienen er na de oogst nog maatregelen genomen te worden om aan de vooropgestelde normen te kunnen voldoen. Tot eind augustus kunnen verschillende groenbemers nog met goed gevolg ingezaaid worden, terwijl vanaf begin september deze mogelijkheden geleidelijk aan beperkt worden. Om N-mineralisatie van de oogstresten van teeltsysteem II tijdens de herfst- en winterperiode bij een oogst na 15 september tegen te gaan, is het aan te bevelen de groente-oogstresten niet in te ploegen maar van het land te verwijderen. In de praktijk is het verwijderen van de groente-oogstresten echter niet altijd uitvoerbaar. Een alternatief is, om tijdens het inploegen van de groente-oogstresten anorganische, restproducten met een hoge C/N-verhouding (vb. stro) in te ploegen, die de N die uit de groenteoogstresten vrijkomt, immobiliseert.

Het gebruik van nitrificatieremmers zou voor een aantal groenten die veel stikstofrijke oogstresten achterlaten één van de mogelijkheden kunnen zijn om het nitraatstikstofresidu te beperken omdat de gemineraliseerde stikstof uit de gewasresten dan langer onder NH₄⁺-vorm blijft. Een ander alternatief is om de oogstresten van koolgewassen niet onder te werken. Omwille van een mogelijk verhoogde ziektedruk wordt dit in de praktijk niet courant toegepast.

Rotatie-maatregelen kunnen eveneens deel uit maken van een duurzame landbouw.

Voor sommige groenten zal, zelfs bij een wetenschappelijk beredeneerde bemesting, de voorgestelde nitraatstikstofresidunorm moeilijk haalbaar zijn, omdat de N-mineralisatie op deze percelen (meestal als gevolg van een rijke bemestingsgeschiedenis) vaak zeer hoog is, zodat bepaalde percelen in feite niet meer geschikt zijn voor deze teelten (te ondiep wortelend, te lage N-afvoer, reeds een te hoge stikstofvoorraad bij aanvang van de teelt in de bodem beneden 30 cm). Het hoge N-leverend vermogen van deze bodems, gecombineerd met een hoge stikstofbemestingsdosis, een te grote stikstofvoorraad bij aanvang en stikstofrijke oogstresten, leiden op deze percelen tot hoge residu's na de oogst. Een goede teeltrotatie en beredeneerde bemesting kunnen hier een oplossing bieden.

7.4 Besluit

Teelten dienen bemest te worden volgens hun behoefte (vanuit economisch, kwalitatief én ecologisch standpunt), rekening houdend met de beschikbare stikstof in de bodem en de stikstoflevering tijdens het groeiseizoen (mineralisatie van bodemorganische stof, oogstresten en groenbemesters). Planten zullen immers niet meer stikstof opnemen dan nodig, tenzij bepaalde gewassen die aan 'N-luxeconsumptie' kunnen doen zoals suikerbieten, spruitkool, spinazie, andijvie,... met zeer stikstofrijke oogstresten tot gevolg.

Bij de start van de teelt is het van belang dat het profiel niet onnodig aangerijkt is, zeker niet de bodemlagen beneden 30 cm, aangezien deze stikstof minder beheersbaar is dan deze in de intensieve wortelzone.

Afstemming van de bemestingsdosissen op de stikstofvoorraad en de mineralisatiecapaciteit van de bodem, kennis van de bemestingswaarde van de toe te dienen organische meststof en een correcte plaatsing van de stikstof en een goede timing van de stikstoftoediening, aangepast aan de stikstofbehoefte en het N-opnameverloop van de teelt, verbeteren de stikstofbenutting en beperken het nitraatstikstofresidu.

8 Bemonstering, analyse en temporele variabiliteit van het nitraatstikstofresidu

8.1 Doelstelling

Opdat het nitraatstikstofresidu in de bodem een bruikbaar beleidsinstrument zou zijn, is een correcte bemonsteringsprocedure en een correcte interpretatie van de analyseresultaten noodzakelijk bij het opstellen van een procedure ter controle van de nitraatstikstofresidunormen. Aangezien de nitraatstikstofresidunormen gebaseerd zijn op metingen van een dynamische bodemparameter, dient rekening te worden gehouden met de ruimtelijke variabiliteit van nitraatstikstof in de bodem en met de temporele variabiliteit van de gemeten parameter in de periode van staalname.

8.2 Karakterisering van de ruimtelijke variabiliteit van nitraatstikstof in de bodem

8.2.1 Literatuuronderzoek

Uit het literatuuronderzoek bleek dat de ruimtelijke variabiliteit van nitraatstikstof in de bodem groot is en sterk beïnvloed wordt door het bodemgebruik (grasweiden ten opzichte van akkerland). Uit eerder uitgevoerd proefveldonderzoek in Vlaanderen bleek dat na de oogst van aardappelen een variatiecoëfficiënt (VC) van meer dan 30 % werd waargenomen (Van Meirvenne, 1991). Op begraasd grasland was de variatie nog groter en werd in oktober een VC van meer dan 80 % vastgesteld door Bogaert *et al.* (2000). De grote ruimtelijke variabiliteit van N_{\min} op weiden is niet alleen het gevolg van de relatief willekeurige depositie van dierlijke excreta over de volledige weide, maar ook van de voorkeur van het vee voor bepaalde plaatsen, zoals paden, schaduwrijke plaatsen en drinkplaatsen.

Uit verschillende literatuurgegevens bleek dat de ruimtelijke variabiliteit van NO_3-N in de bodem afhankelijk is van het bemonsteringstijdstip. Tijdens de winterperiode neemt de variatie in NO_3-N , als gevolg van nitraatuitspoeling, binnen een perceel af.

8.2.2 Proefveldonderzoek

In de herfst van 2001 werden 3 proefvelden (1 begraasde weide, 2 akkerlandpercelen (aardappelen en wintertarwe)) intensief bemonsterd om de ruimtelijke variabiliteit in het najaar te begroten. Op deze drie percelen werd een gebied van 1 ha bemonsterd volgens een basisgrid van 10 m x 10 m. Rond drie willekeurige staalnamepunten van dit grid werden zes bijkomende stalen genomen in drie richtingen loodrecht op elkaar op een afstand van 2 en 5 m.

Analyse van de proefveldresultaten bracht zeer grote verschillen in nitraatstikstofhoeveelheden tussen punten op korte afstand naar voor. Zowel op grasland als op akkerland werden grote variatiecoëfficiënten voor het nitraatgehalte in de bodem (0-90 cm) berekend: een VC van ongeveer 60 % voor de begraasde weide en een VC van 30 tot 40 % op de akkerlandpercelen. Naast het bodemgebruik (akkerland versus begraasde weiden) werd de ruimtelijke variabiliteit ook beïnvloed door de voorgeschiedenis van het perceel en het management.

8.2.3 Bepaling van het aantal boorsteken

Door de grote ruimtelijke variabiliteit van nitraatstikstof in de bodem is het moeilijk om een goede schatting van de gemiddelde hoeveelheid te bekomen die representatief is voor het hele perceel. Het aantal stalen dat noodzakelijk is om een schatting te maken van een bepaalde gemiddelde waarde is afhankelijk van de vereiste accuraatheid van de schatting.

Vanuit praktisch oogpunt zou een toename van het aantal vereiste boringen per hectare een sterke verzwaring van het te leveren veldwerk betekenen zodat wat betreft de bemonsteringsprocedure een compromis moet worden gezocht tussen enerzijds het opvangen van de ruimtelijke variabiliteit van nitraatstikstof en anderzijds de praktische haalbaarheid en staalnamekost.

Bij een groot aantal boorsteken is het bovendien moeilijk om een homogeen mengmonster te bekomen waardoor een aanzienlijke fout kan ontstaan.

Op basis van de vastgestelde ruimtelijke variabiliteit op de 3 proefvelden kon het aantal stalen bepaald worden dat nodig is om de nitraatstikstofhoeveelheid voor deze percelen te schatten.

Volgens een statistische en visuele at random benadering werd bij 15 boorsteken op de twee onderzochte akkerlandpercelen een precisie van 20 % bereikt. Dit wil zeggen dat bij een mengmonster bestaande uit 15 boorsteken een bepaalde nitraatstikstofhoeveelheid plus of min 20 % kan afwijken van de werkelijk gemiddelde nitraatstikstofhoeveelheid op het perceel.

Op het begraasd graslandperceel, met een hogere variabiliteit, zijn minstens 20 boringen vereist om een precisie van 25 % te bereiken. De hier vermelde precisiegraden werden berekend volgens de formule van Cline (1944) en werden visueel benaderd met behulp van de at random generator in Excel. Ze geven slechts een indicatie van de te verwachten nauwkeurigheid van de nitraatstikstofbepaling bij een gegeven aantal boorsteken en moeten enigszins genuanceerd worden.

Immers, door het compendium wordt een strikt bemonsteringspatroon opgelegd (kruis- of vierkantsverband) en wordt dus niet at random bemonsterd. Op basis van een strikt bemonsteringspatroon zal men een meer representatief mengmonster bekomen aangezien het ganse perceel op deze manier puntsgewijze bemonsterd wordt. Dit bleek ook uit de stalen die op de 3 percelen in kruis- of vierkantsverband werden genomen en uit meer dan 15 boorsteken bestonden.

Verder bepaalt het compendium dat extremititeiten moeten vermeden worden bij de bemonstering en dat de deelobjecten niet groter mogen zijn dan 2.2 hectare.

Volgens het huidige compendium kan er bemonsterd worden volgens het vierkantsverband of het kruisverband. Op basis van beperkt proefveldonderzoek kan niet worden besloten dat beide bemonsteringspatronen significant verschillend zouden zijn. De bemonstering in kruisverband heeft evenwel enkele voordelen ten opzichte van bemonstering in vierkantsverband (zoals het vermijden van bemonstering van perceelsranden; het vermijden van een systematische bemonstering van bemestingsgangen; beter geschikt voor onregelmatige percelen; gemakkelijker voor de staalnemer).

8.3 Invloed van staalnameprocedure, bewaar- en analysemethode op de bepaling van ammonium- en nitraatstikstof van bodemstalen

Wat betreft de bemonstering en de verdere behandeling en analyse van de monsters kan geconstateerd worden dat in hoofdzaak de bemonstering problematisch is. Door de grote ruimtelijke variatie binnen een perceel zou een groot aantal deelmonsters genomen moeten worden om een betrouwbare schatting van de werkelijk aanwezige hoeveelheid N_{\min} te bekomen. Uit literatuurgegevens blijkt dat de invloed van de boordiameter ter bepaling van de residuele NO_3 -N-hoeveelheid in de bodem slechts minimaal is, op voorwaarde dat men de staalnameprocedure goed beheerst. Evenwel moet gesteld worden dat voor de bovenste laag (lagen) het gebruik van een bredere boordiameter is aangewezen. Hiermee wordt de korte-afstandsvariabiliteit meer in rekening gebracht en wordt cross-contaminatie met de onderste laag (lagen) vermeden.

Aangezien de minerale stikstof in de bodem aan vlugge veranderingen onderhevig is (ammonificatie, nitrificatie, fixatie, denitrificatie, vervluchtiging), is het aangewezen dat de nitraat- en ammoniumstikstofbepalingen zo vlug mogelijk na de monsternamen uitgevoerd worden. Na de staalname moeten de monsters koel en binnen 24 uur naar het instituut worden vervoerd, waar de analyse zo snel mogelijk moet gebeuren.

Echter, omwille van praktische redenen, is het niet altijd haalbaar staalname en analyse onmiddellijk op elkaar te laten aansluiten en dus is het essentieel de bodems te bewaren zonder het microbiële evenwicht, zoals aanwezig onder veldomstandigheden, te zeer te verstoren.

Zo moeten, rekening houdend met enerzijds het groot aantal monsters die in het kader van de controle op het nitraatstikstofresidu genomen dienen te worden in een relatief korte periode en met anderzijds de mogelijk vlugge wijzigingen in het anorganisch N-patroon van gronden, maatregelen getroffen worden om de N-transformaties te vertragen of te verhinderen. Mogelijke oplossingen zijn: chemische inhibitie, koelen, invriezen of drogen van de monsters.

Toediening van reagentia om de microbiële activiteit te inhiberen bleek onvoldoende effectief te zijn en/of de analyseresultaten te beïnvloeden.

Bewaring van bodemstalen in de koelkast heeft als voordeel dat het staal manipuleerbaar blijft. Nadeel is echter dat bij lage temperaturen de microbiële activiteit weliswaar wordt afgeremd, maar niet volledig wordt gestopt.

Het diepvriezen van bodemstalen die langere tijd bewaard dienen te worden, is een betrouwbare methode. Eén zaak evenwel die in het oog moet worden gehouden, is de ontdooiperiode. De ontdooiperiode mag niet langer duren dan noodzakelijk is om de grond te kunnen homogeniseren en er moet vermeden worden dat de omgevingstemperatuur hoog oploopt, dit om mogelijke N-mineralisatie te verhinderen. Overnacht ontdooien in een gekoelde ruimte (4°C) is dan ook de aangewezen methode.

Het drogen van bodemstalen heeft een aantal praktische voordelen, doch gedroogde stalen vertonen in vergelijking met vers geanalyseerde stalen afwijkende ammoniumstikstofgehalten, terwijl de nitraatstikstofgehalten vergelijkbaar zijn. Drogen heeft het grote voordeel dat de grond gemalen kan worden en bijgevolg een beter en homogener mengmonster bekomen wordt. Bovendien kan het monster in gezeefde en gedroogde toestand lange tijd bewaard worden, wat de mogelijkheid biedt om de analyse, indien gewenst, te herhalen. Contaminatie tijdens de bewaring van gedroogde bodemstalen door adsorptie van gasen moet vermeden worden door het gebruik van zuivere, luchtdichte containers.

Om na te gaan hoeveel de fout op de nitraatmeting zelf bedraagt kunnen de resultaten van De Brucker en Van Bree (1999) aangehaald worden. Aan het Vito werd door de Vlaamse Landmaatschappij de opdracht gegeven om een ringtest te organiseren met de bedoeling laboratoria te erkennen voor analyses in het kader van het mestdecreet. Er namen 28 laboratoria effectief deel. Indien de uitschieters (te hoog of te laag) niet in rekening worden gebracht, kan voor de overblijvende labo-resultaten een standaardafwijking ten opzichte van het gemiddelde (RSD) berekend worden van 7.7 %.

8.4 Opvangen van de temporele variabiliteit van nitraatstikstof in de bodem

8.4.1 Doelstelling

In het mestdecreet staat op dit ogenblik ingeschreven dat de veldmonsternamen ter bepaling van de residuele NO₃-N uitgevoerd moet worden in de periode 1 oktober-15 november. Evenwel zal in deze tijdspanne, afhankelijk van de weersomstandigheden, het NO₃-N-gehalte wijzigen door enerzijds mineralisatie van organische stof (najaarsmineralisatie), organische meststoffen (najaarstoepassing van drijfmest) en/of oogstresten en anderzijds door het optreden van stikstofverliezen via uitspoeling en/of denitrificatie. Minerale stikstof kan ook vastgelegd worden door immobilisatie, bijvoorbeeld als koolstofrijke gewasresten afgebroken worden. Tevens kan nog stikstof worden opgenomen indien het perceel begroeid is (gras, groenbemester). Door het optreden van deze processen zullen nitraatstikstofresidumetingen op een zelfde veld, maar op verschillende tijdstippen, andere resultaten geven.

Er werd daarom nagegaan hoe sterk de maximaal toelaatbare nitraatstikstofresidu's, voorgesteld in Tabel 2, die gelden voor een staalname op 1 oktober, wijzigen in functie van de tijd. Het is van belang om te onderzoeken of de nitraatstikstofresidunormen dienen aangepast te worden in functie van het staalnametijdstip binnen de wettelijke staalnameperiode van 1 oktober tot 15 november.

8.4.2 Werkwijze

De temporele variabiliteit werd onderzocht aan de hand van literatuuronderzoek en op basis van de simulatieresultaten van de scenarioanalyse op basis van de proefvelden (SA1a). Deze omvat 29 veel voorkomende combinaties textuur/hydrologie/oogstrest/gewas (met inbegrip van groenbemesters) in Vlaanderen. De simulaties gebeurden voor verschillende nitraatstikstofresiduniveaus op 1 oktober (20, 30, 40, 50, 70 en 90 kg NO₃-N ha⁻¹) en per nitraatstikstofresiduniveau werden 86 scenario's (verschillende oogstrest, hydrologie, gewas, verdeling van het nitraatstikstofresidu) doorgerekend.

8.4.3 Resultaat

Uit de modelresultaten blijkt dat er enkel bij de oogstrest bloemkool een significante vrijzetting van stikstof plaats vindt na 1 oktober. Gras en groenbemesters nemen nog stikstof op tussen 1 oktober en 15 november. Uiteraard hebben deze vaststellingen gevolgen voor de handhaving van de nitraatstikstofresidunormen. De in dit project voorgestelde nitraatstikstofresidunormen zijn immers afgeleid voor een staalname op 1 oktober en moeten in de hogervermelde gevallen aangepast worden in functie van het staalnametijdstip.

Voor de oogstrest bloemkool zal, bij een bepaald maximaal toegelaten nitraatstikstofresidu op 1 oktober, het overeenkomstige residu 7 weken later reeds geleidelijk toegenomen zijn met gemiddeld 20 kg NO₃-N ha⁻¹. Dit betekent een toename van het residu van gemiddeld 2.9 kg per week.

Indien het perceel begroeid is met gras of een groenbemester zal het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu op 15 november ten opzichte van dit op 1 oktober zijn afgenomen met gemiddeld 20 kg NO₃-N ha⁻¹. Dit betekent een geleidelijke afname van 2.9 kg NO₃-N ha⁻¹ per week.

Bij de andere gesimuleerde oogstresten (maïs, aardappel, wintertarwe) worden uitspoelings- en denitrificatieverliezen vrijwel opgeheven door de vrijzetting van stikstof door mineralisatie, zodat het nitraatstikstofresidu niet significant wijzigt gedurende de periode 1 oktober – 15 november en een aanpassing van de nitraatstikstofresidunorm in functie van het staalnametijdstip bijgevolg niet noodzakelijk is.

Er wordt dus voorgesteld om voor de eerste 7 weken (dit is de officiële staalnameperiode van 1 oktober tot 15 november) de temporele variabiliteit van het nitraatstikstofresidu buiten beschouwing te laten, uitgezonderd voor de oogstrest bloemkool (en andere stikstofrijke, snel mineraliseerbare oogstresten) en in het geval van gras of groenbemesters.

Over het algemeen werden de hoogste residu's gesimuleerd in de droogste en warmste oktober-november-december-periode, terwijl de laagste residu's gesimuleerd werden in de natste en koudste oktober-november-december-periode.

Deze volgorde is aannemelijk aangezien vrijzetting van stikstof door mineralisatie slechts kan optreden bij voldoende hoge temperaturen en aangezien denitrificatie- en voornamelijk uitspoelingsverliezen belangrijk kunnen zijn onder natte weersomstandigheden.

8.5 Besluit

De voorgeschreven bemonsteringsmethode moet de garantie inhouden dat de geanalyseerde bodemmonsters voldoende representatief zijn voor het bemonsterde perceel, zowel ten aanzien van de belanghebbende landbouwer als ten aanzien van de overheid. Hiertoe werd de ruimtelijke variabiliteit van nitraatstikstof in de bodem gekarakteriseerd op basis van literatuuronderzoek en op basis van 3 proefvelden die in het najaar van 2001 intensief bemonsterd werden. Aan de hand hiervan werd getracht om vast te stellen hoeveel boorsteken noodzakelijk waren voor het bekomen van een representatief mengstaal.

Eens het monster volgens een goed bemonsteringsprotocol is genomen, moet dit monster op de juiste wijze worden behandeld, geanalyseerd en bewaard. Hiertoe werden aanbevelingen geformuleerd.

Tot slot werd nagegaan hoe sterk de maximaal toelaatbare nitraatstikstofresidu's, die gelden voor een staalname op 1 oktober, wijzigen in functie van de tijd. In het geval van stikstofrijke, gemakkelijk mineraliseerbare oogstresten en in het geval van gras en groenbemesters dienden de in Tabel 2 voorgestelde nitraatstikstofresidunormen aangepast te worden in functie van het staalnametijdstip.

9 Algemeen besluit

Het onderzoek heeft aangetoond dat het WAVE-model, na grondige kalibratie en validatie, een nuttig instrument is dat:

- ✓ bijdraagt tot een beter inzicht in de procesdynamiek die de respons van complexe systemen bepalen, zoals de nitraatuitspoeling van 'bodem-gewas' systemen;
- ✓ een vrij nauwkeurige predictie toelaat van het effect van wijzigingen in landgebruik en bemestingspraktijk;
- ✓ toelaat een ruimtelijke differentiatie uit te werken van het nitraatstikstofresidu en het perceelsmanagement welke beantwoordt aan de nitraatrichtlijn.

Modellen zijn echter slechts een hulpmiddel, en de nauwkeurigheid wordt bepaald door de juistheid waarop in het model de processen zijn beschreven, door de foutmarge op de invoergegevens, modelparameters en door de waarnemingen met dewelke de simulatieresultaten worden vergeleken. Alvorens ze in predictief verband kunnen worden aangewend, is het noodzakelijk dat modellen gekalibreerd worden. Opdat het WAVE-model betrouwbare voorspellingen inzake nitraatuitspoeling zou opleveren, werd het model gedurende dit project verfijnd en uitgebreid getest op basis van metingen op 20 proefvelden, aan de hand van literatuurgegevens en door middel van de bepaling van de mineralisatiecapaciteit en van de denitrificatiepotentiaal van 20 bodems.

Niettegenstaande de beperkingen aan modellen, zijn deze in combinatie met terreingegevens en na kalibratie economisch kosteffectieve en betrouwbare rekeninstrumenten. Zij kunnen zoals in deze bijdrage aangetoond werd, nuttig ingezet worden voor het afleiden van de nitraatstikstofresidunormen in functie van textuur- en gewasgroep, normen die teeltechnisch meestal haalbaar zijn, alsook voor de reconstructie van het perceelsmanagement dat leidt tot de voorgestelde nitraatstikstofresidunorm. Verder leert het op modellen gebaseerd onderzoek dat de voorgestelde nitraatstikstofresidunormen niet sluitend zijn, en geen algemene garantie bieden wat betreft het respecteren van de Europese nitraatrichtlijn aangezien de normen gebaseerd zijn op gemiddelde waarden terwijl de scenarioanalyses per 'bodem-gewas' combinatie een interval

opleverden voor het maximaal toelaatbaar nitraatstikstofresidu. De voorgestelde nitraatstikstofresidunormen blijken soms te streng, soms niet streng genoeg naargelang perceelsspecifieke kenmerken.

Tot slot tonen de resultaten van het onderzoek aan dat een bemesting volgens de forfaitaire normen uit den boze is, en dat een perceelsspecifieke, beredeneerde bemesting de regel zou moeten zijn. Een beredeneerde bemesting houdt in dat de bemestingsdosissen rekening houden met de aanwezige stikstofvoorraad in de bodem, met de mineralisatiecapaciteit van de bodem en met de mineralisatie van oogstresten en groenbemesters. Bovendien wordt de stikstofbenutting verbeterd door kennis van de samenstelling en de bemestingswaarde van de toe te dienen organische meststof, door een correcte plaatsing van de stikstof en door een goede timing van de stikstoftoediening, aangepast aan de stikstofbehoefte en het N-opnameverloop van de teelt. Op deze manier kunnen goede opbrengsten behaald worden met een beredeneerde stikstofinput en wordt het risico op nitraatuitspoeling geminimaliseerd.

Ondanks al de kritiek die soms op wiskundige modellen wordt geleverd, kan worden gesteld dat het afleiden van richtwaarden voor de residuele nitraatstikstof in de bodem en de ruimtelijke differentiatie van de nitraatstikstofresidunorm niet mogelijk zou zijn zonder het gebruik van een model, zoals bv. het WAVE-model. De gebruiker moet zich echter steeds bewust blijven van het feit dat modellen een hulpinstrument zijn en dat hij zich niet blindelings mag laten leiden door wat het model als output geeft. De modeloutput dient steeds getoetst te worden aan de expertkennis van deskundigen en aan praktijkgegevens, hetgeen uitvoerig gebeurd is gedurende dit onderzoeksproject. De resultaten van de scenarioanalyse en de aanwezige expertkennis binnen het consortium, vormden de basis waarop de nitraatstikstofresidunormen en het perceelsmanagement, dat resulteert in deze nitraatstikstofresidunormen, werden afgeleid.

10 Literatuur

Bierkens, M.F.P. (1998). Modelling water table fluctuations by means of a stochastic differential equation. *Water Resources Research*, 34: 2485-2499.

Bierkens, M.F.P. and Walvoort, D.J.J. (1998). Simple stochastic models for fluctuations of the water table depth. Part 2: A combined soil-groundwater model with stochastic input (in Dutch). *Stromingen*, 4: 5-20.

Bierkens, M., Knotters, M. en Van Geer, F. (1999). Tijdsreeksanalyse nu ook toepasbaar bij onregelmatige meetfrequenties. *Stromingen*, 5(2), p 43-54.

Bogaert, N., Salomez, J., Vermoesen, A., Hofman, G., Van Cleemput, O. en Van Meirvenne, M. (2000). Within variability of mineral nitrogen in grassland. *Biol. Fert. Soils*, 32: 186-193.

Brevé, M.A., Skaggs, R.W., Parsons, J.E., and Gilliam, J.W. (1997). DRAINMOD-N, a nitrogen model for artificially drained soils. *Trans. ASAE*, 40 (4): 1067-1075.

Burns, I.G. (1974). A model for predicting the redistribution of salts applied to fallow soils after excess rainfall or evaporation. *Journal of Soil Science*, 25: 165-178.

Cline, M.G. (1944). Principles of soil sampling. *Soil Science*, 58: 275-288.

De Brucker, N., Van Bree, P. (1999). Interlaboratoriumvergelijking voor analyse van dierlijke mest, kunstmest, water, bodem en veevoeder. Studie uitgevoerd in opdracht van VLM. 1999/DIA/R/146-1.

El-Sadek, A. A. M. (2002). Engineering approach to water quantity and quality modelling at field and catchment scale. Doctoraatsthesis, Department of Civil Engineering, KULeuven, 251 p.

Janssen, P.H.M., Heuberger, P.S.C. and Sanders, R.. (1993). UNCSAM 1.1: A software package for sensitivity and uncertainty analysis; Manual. RIVM Rep. No. 959101004, RIVM, Bilthoven, Nederland.

Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E. & Machet, J. M. (1999). Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50: 549-566.

Vanclooster, M., Viaene, P., Diels, J. en Christiaens, K. (1994). WAVE, a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and the vadose environment. Reference and user's manual, release 2.0. Institute for Land and Water management, K.U.Leuven, Belgium.

Vanclooster, M., Viaene, P., Christiaens, K. en Ducheyne, S. (1996). WAVE, a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and the vadose environment. Reference and user's manual, release 2.1. Institute for Land and Water management, K.U.Leuven, Belgium.

Van Meirvenne, M. (1991). Characterization of soil spatial variation using geostatistics. Doctoraatsthesis. Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Gent, 168 p.

Van Orshoven, J., Maes, J., Vereecken, H. and Feyen, J. (1991). A procedure for the statistical characterisation of the units of the Belgian soil map. *Pédologie*, XLI-3, p. 193-212.

Vereecken, H. (1988). Pedotransfer functions for the generation of the hydraulic properties for Belgian soils. Doctoraatsthesis. Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, K.U.Leuven, België, 254 p.