



Methodiek berekening bronnen van stikstof en fosfor in uitspoelend bodem- en grondwater.

Notitie

Onderdeel KIWK-project Nutriënten: welke landbouwmaatregelen snijden hout.

## KIWK IN HET KORT

In de Kennisimpuls Waterkwaliteit werken Rijk, provincies, waterschappen, drinkwaterbedrijven en kennisinstituten aan meer inzicht in de kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater en de factoren die deze kwaliteit beïnvloeden. Daarmee kunnen waterbeheerders de juiste maatregelen nemen om de waterkwaliteit te verbeteren en de biodiversiteit te vergroten.

In het programma brengen partijen bestaande en nieuwe kennis bijeen, en maken ze deze kennis (beter) toepasbaar voor de praktijk. Hiermee verstevigen ze de basis onder het waterkwaliteitsbeleid. Het programma is gestart in 2018 en duurt vier jaar. Het wordt gefinancierd door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, STOWA, waterschappen, provincies en drinkwaterbedrijven. Kennisimpuls Waterkwaliteit. Beter weten wat er speelt en wat er kan.

## **Colofon**

titel:	<i>Methodiek berekening bronnen van stikstof en fosfor in uitspoelend bodem- en grondwater</i>
Opdrachtgever	Kennisimpuls Waterkwaliteit
Auteurs :	Piet Groenendijk, Leo Renaud Wageningen Environmental Research
Vormgeving:	
	<i>KIWK-notitie</i>
datum:	16 mei 2022
Contactgegevens:	<i>Email: piet.groenendijk@wur.nl Tel: +31(0)31 317 48 64 34</i>
Copyright	De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar.
Disclaimer	Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteur(s) en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassingen

# Inhoud

Samenvatting .....	5
0 Inleiding.....	6
0.1            Aanleiding .....	6
0.2            Vraagstelling.....	6
0.3            Doelstelling.....	6
0.4            Leeswijzer .....	6
1 Bronnen van uit- en afspoeling van nutriënten.....	7
1.1            Inleiding bronnenanalyses .....	7
1.2            Eerder toegepaste methoden .....	9
1.2.1          Berekenen van de balansposten.....	9
1.2.2          Gevoeligheidsanalyse .....	10
1.2.1          Voor- en nadelen van de eerder toegepaste methoden.....	14
2 Nieuwe methode: simulatie van gelabelde stoffen .....	16
3 Implementatie in het ANIMO-model .....	22
4 Testplan .....	24
5 Conclusies en aanbevelingen .....	25
Referenties.....	26

# Samenvatting

## Aanleiding

In veel regionale oppervlaktewateren worden Kaderrichtlijn Waterdoelen ten aanzien van stikstof- en fosforconcentraties nog niet bereikt. De uit- en afspoeling vanaf landbouwgronden heeft hierin een grote bijdrage. Om de uit- en afspoeling verder te beperken zijn ook gebiedsgerichte en bedrijfsspecifieke maatregelen nodig. Daarvoor is zowel kennisverdieping als verdere kennisdeling nodig. Bij waterbeheerders is er behoefte aan kennis over bronnen en routes op stroomgebiedsniveau om locaties te kunnen identificeren waar maatregelen doelmatig ingezet kunnen worden: de juiste maatregel op de juiste plaats. Daarnaast hebben waterbeheerders en agrariërs behoefte aan kennis over de effecten van maatregelen op perceelsniveau.

## Doel

Het doel van het gehele project "Nutriënten: welke landbouwmaatregelen snijden hout" dat binnen het onderzoeksprogramma van de Kennisimpuls Waterkwaliteit wordt uitgevoerd, is de juiste maatregelen op de juiste plek ingezet te krijgen door:

- State-of-the-art meettechnieken, modellen en kennis over bronnen en routes in stroomgebieden samen te brengen
- Gegevens op bedrijfsniveau te integreren voor bedrijfsspecifieke handelingsperspectieven
- De effecten van veelbelovende maatregelen te onderbouwen.

Een deel van de doelen is gerealiseerd in andere deelprojecten, waarvan "Maatregel op de Kaart" en "Reviews van maatregelen ter vermindering van de uit- en afspoeling van nutriënten" de belangrijkste waren.

Voor het onderhavige deelproject "Methodiek berekening bronnen van stikstof en fosfor in uitspoelend bodem- en grondwater" zijn de volgende doelen geformuleerd:

- op stellen van een rekenschema waarin beperkingen van oudere methoden voor het berekenen van bodembronnen zijn opgeheven
- implementatie van de methodiek in een rekencode, met percelen uit de pilotgebieden als cases voor modelverificatie
- opstellen van een testplan dat resulteert in een robuuste versie ter ondersteuning van andelijke beleidsanalyses en gebiedsstudies

## Resultaat

De nieuwe methode biedt de mogelijkheid om de bijdragen uit de verschillende bronnen aan de uitspoeling dynamisch in de tijd te berekenen, terwijl eerdere methoden dit niet konden. Ook kan met de nieuwe methode en beter onderscheid gemaakt worden tussen uitspoeling door nalevering van de bodem, uitspoeling uit historische bemesting en uitspoeling door recente en actuele bemesting. Daarnaast is de nieuwe methode minder rekenintensief dan de eerdere methode op basis van een gevoeligheidsanalyse en vergt het ook minder voorbereiding van modelinvoer en nabewerking van modelresultaten. De methode is daarmee beter geschikt om vaker in te zetten

De ontwikkeling bevindt zich nog in de testfase met een test op een perceel in elk van de twee pilotgebieden. Het verder testen onder meerdere omstandigheden is nodig voordat het bedrijfsklaar is voor landelijke beleidsstudies. Ook is een vergelijking met resultaten van de eerdere methode nodig en dienen eventuele verschillen met voorgaande resultaten eerst goed begrepen en geduid te worden alvorens de nieuwe methode breed in te zetten voor beleids- en gebiedsstudies.

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Schoon grond- en oppervlaktewater is een essentiële randvoorwaarde voor planten en dieren en vormt een belangrijk onderdeel van een gezonde leefomgeving en veilig drinkwater. De waterkwaliteit is de afgelopen decennia weliswaar verbeterd, maar Nederland heeft nog steeds belangrijke opgaven en verbetering van de fysisch-chemische waterkwaliteit lijkt te stagneren. Recente studies hebben uitgewezen dat er desondanks in veel gebieden nog een grote opgave is om de waterkwaliteit voor nutriënten voldoende te verbeteren ([Knoben et al 2021](#)).

Om invulling te kunnen geven aan een gebiedsgerichte aanpak voor vermindering van de uit- en afspoeling van nutriënten, spelen de volgende kennisvragen een belangrijke rol:

- In landelijke en regionale evaluaties van het water en mestbeleid worden rekenmodellen ingezet om de uit- en afspoeling van landbouw- en natuurgronden te kwantificeren en op basis van dat aandeel in de totale nutriëntenbelasting de landbouwopgaven voor nutriënten te bepalen en effecten van maatregelen te schatten.
- Naarmate 2027 als eindjaar van de KRW dichterbij komt wordt de vraag naar het wel of niet realiseren van doelen steeds urgenter. Voor de landbouwopgaven voor nutriënten is inzicht in de bijdrage door achtergrondbelasting en de bijdrage in uitspoeling te beïnvloed door management gewenst. Om deze bijdragen te kwantificeren worden rekenmodellen toegepast. Geconstateerd is dat de eerder toegepaste methoden beperkingen kennen die opgelost zouden kunnen worden door een nieuwe methode.

## 1.2 Vraagstelling

Vanuit deze problemen zijn voor het onderzoek de volgende onderzoeksvragen opgepakt:

- 1) Welke methoden voor de kwantificering van bronnen in het bodem/gewassysteem zijn eerder toegepast voor beleidsstudies en gebiedsstudies?
- 2) Hoe ziet een alternatief rekenschema eruit binnen het model waarmee eerder ten behoeve van beleidsstudies bronnen in het bodem/gewassysteem van uitspoeling zijn gekwantificeerd?
- 3) Wat is de meerwaarde van het alternatieve rekenschema en welke activiteiten zijn nodig om een volledig geteste versie in te kunnen zetten voor beleidsstudies en gebiedsstudies?
- 4) Hoe verhouden eerste resultaten voor enkele percelen zich tot de resultaten van de eerdere aanpak?

## 1.3 Doelstelling

Voor het onderhavige deelproject "Nieuwe methodiek voor bronanalyse" zijn de volgende doelen geformuleerd:

- op stellen van een rekenschema waarin beperkingen van oudere methoden voor het berekenen van bodembronnen zijn opgeheven
- implementatie van de methodiek in een rekencode
- opstellen van een testplan en zo mogelijk een test van de rekencode op enkele percelen in de twee pilotgebieden

## 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft achtergronden van bronnenanalyses. In Hoofdstuk 3 worden eerder toegepaste methodes voor het onderscheid in bronnen van het bodem- en gewassysteem beschreven. Hoofdstuk 3 beschrijft de nieuwe methode met een naar bron gelabelde splitsing van stof-pools. In hoofdstuk 4 wordt de implementatie van de nieuwe methode in de rekencode van het ANIMO-model toegelicht. Hoofdstuk 5 geeft eerste resultaten van een test op percelen in de twee pilotgebieden van het project KIWK Nutriëntenmaatregelen. In hoofdstuk 6 worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

## 2 Bronnen van uit- en afspoeling van nutriënten

### 2.1 Inleiding bronnenanalyses

In de discussies over de herkomst van stikstof en fosfor in het oppervlaktewater, en de rol die landbouw daarin speelt, wordt onderscheid gemaakt tussen bronnen en routes. Het begrip 'bronnenanalyse' toegepast op de rol van landbouwgronden is in de afgelopen 20 jaar op verschillende manieren uitgewerkt (Hendriks et al., 2002; Van der Bolt et al., 2007; Planbureau voor de Leefomgeving, 2008; Groenendijk et al., 2014). Daarnaast zijn verschillende bronnenanalyses van nutriënten in regionale wateren en Rijkswateren uitgevoerd zonder in te gaan op verschillende landbouw- en bodeminteracties die van invloed zijn op uit- en afspoeling (Verhagen et al., 2007).

De verschillen in uitwerking zijn onder andere veroorzaakt door de verschillende doelen die met deze analyses werden nagestreefd:

- wetenschappelijk: nieuwsgierigheidgedreven inzicht verwerven in de werking van het systeem,
- toewijzen van verantwoordelijke bronnen als oorzaak van eutrofiering en
- zoeken naar effectieve sturingsmogelijkheden (maatregelen).

Een bronnenanalyse geeft informatie over de relatieve bijdrage van bronnen aan de uit- en afspoeling van stikstof en fosfor op een bepaald moment. Bedacht moet worden dat deze relatieve verhoudingen zich dynamisch in de tijd kunnen gedragen door variatie in het weer, door naijlingseffecten van historisch landgebruik, naijlingseffecten van historische mestgiften en door invloed van waterbeheer.

De informatie uit een bronnenanalyse kan worden gebruikt voor het identificeren van maatregelen waarvan men verwacht dat ze effect zullen sorteren, maar geeft geen informatie over het te bereiken effect. Voor de effectbepaling zijn andere methoden nodig (veldonderzoek, modelanalyse).

Bedacht moet worden dat de onderlinge verhouding tussen bronnen kan wijzigen door naijlingsprocessen en door een systeemverandering (autonome ontwikkeling, maatregelen). Het kan interessant (korte termijn) dan wel noodzakelijk (langere termijn) zijn om voor verschillende zichtjaren de onderlinge verhouding tussen de bronnen in beeld te brengen en de verschuivingen ten opzichte van de referentiesituatie te bepalen.

Er is een methodische samenhang tussen bronnenanalyses en lotgevallenstudies, het zijn in essentie twee kanten van dezelfde medaille. In een lotgevallenstudie staat de vraag centraal hoe de toegediende stikstof of fosfor zich verdeelt over verschillende balansposten in het bodem/water-plant-systeem. In een bronnenanalyse staat de vraag centraal waar de in het grondwater en oppervlaktewater gemeten hoeveelheden stikstof en fosfor vandaan komen. Een lotgevallenstudie kijkt dus vooruit, een bronnenanalyse kijkt terug. Het lot kan via metingen worden gevolgd (bijvoorbeeld via tracers) en kan met modellen worden voorspeld.

De herkomst van stikstof en fosfor in het regionale oppervlaktewatersysteem is niet te meten en kan alleen indirect worden afgeleid met aanvullende gegevens en kennis. Zowel de herkomst als het lot zijn/worden bepaald door de routes die de stof door het systeem volgt en de omzettings- en vastleggingsprocessen die onderweg optreden.

Bij het gebruik van de term 'bronnenanalyse' treedt soms verwarring op met het begrip 'routes'. Verschijnselen als kwel en neerslag kunnen zowel een bron als een route zijn. Het is daarom van belang de gehanteerde begrippen specifiek te omschrijven.

*Specifieke omschrijving (transport)route:*

Een route is de weg waarlangs stoffen vanuit een bron in het oppervlaktewater terecht komen.

Stikstof en fosfor kunnen vanaf en vanuit de bodem via verschillende routes in het oppervlaktewater terecht komen. Een stof kan op een directe manier (transport) of op een indirecte manier (ketenreacties in voorraden) in het oppervlaktewatersysteem terecht komen.

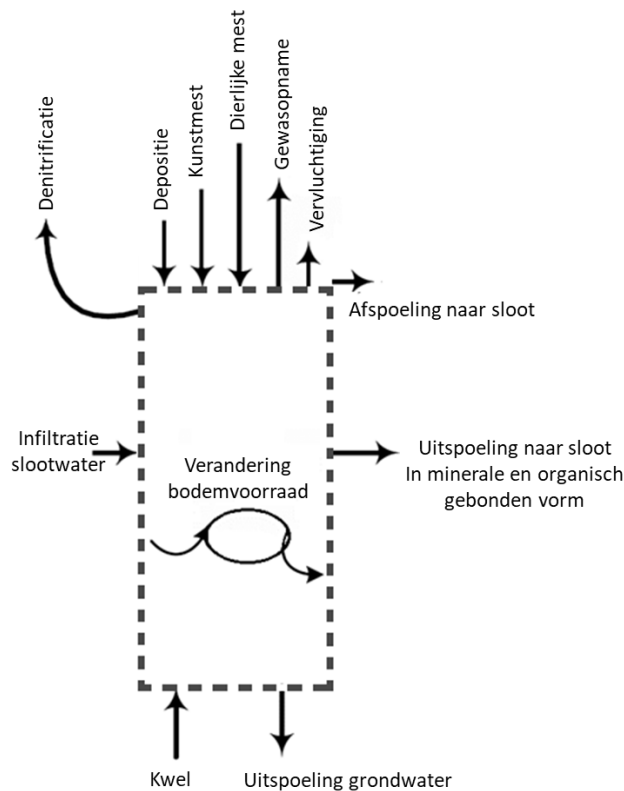
Voor nutriënten in het gewas/bodem/watersysteem zijn op perceelschaal de volgende routes te onderscheiden:

- oppervlakkige afstroming met water en gebonden aan sediment,
- ondiep transport over bodemlagen,
- ondiep transport naar en door greppels, drainbuizen, kavelsloten,
- dieper en langzamer transport naar grotere watergangen,
- kwel in het perceel.

Routes zijn van belang voor het verkennen van mogelijkheden om via ingrijpen in de routes (en daarmee ook in de processen), i.e. via het nemen van maatregelen, de belasting van het oppervlaktewater te verminderen. Maar ook geven de routes aanvullend inzicht in het relatieve belang van verschillende bronnen en het risico van potentiële bronnen.

*Specifieke omschrijving bronnen:*

In bronnenanalyses wordt voor de emissies die optreden door uit- en afspoeling van landbouwgronden onderscheid gemaakt in de af- en uitspoeling die optreedt door bemesting, kwel, atmosferische depositie. De resterende oorzaken van de uitspoeling zijn de nalevering die optreedt door uitloging of mineralisatie van de nutriënten die al in gebonden (organische) vorm in het bodemprofiel aanwezig zijn en uitspoeling van lokaal slootwater dat op een eerder moment in het seizoen in het bodemprofiel van de percelen is geïnfiltrteerd (zie figuur 2.1).



**Figuur 2.1**

**Schematische voorstelling van de termen van nutriëntenbalansen. De bronnen die in de huidige methodiek worden onderscheiden zijn bemesting (dierlijke + kunstmest tezamen), depositie, kwel, infiltratie slootwater en het resterende deel dat aangeduid wordt als nalevering.**

Deze verschillende emissiebronnen grijpen aan op verschillende plekken in het bodem-water-plant systeem en de daaruit komende emissies volgen verschillende routes met andere omzet- en vastleggingsprocessen. Daarom is de bijdrage van een bron aan de uitspoeling naar het regionale oppervlaktewatersysteem van een niet conservatieve stof per definitie niet gelijk aan de verhouding van emissies uit de bronnen.



De tot op heden toegepaste schattingsmethoden met uitspoelingsmodellen kennen tekortkomingen ten aanzien van de wijze waarop het historische grondgebruik en de landbouwkundige geschiedenis van een rekeneenheid is beschreven.

In een analyse van bronnen wordt de relatieve bijdrage van verschillende bronnen aan het stikstof- en fosfor-transport vanuit de bodem naar het oppervlaktewater bepaald. De bron kan op een directe manier (levering van stof) of indirecte manier (ketenreacties in voorraden) het transport beïnvloeden. De route is de weg waarlangs stikstof en fosfor vanuit een bron in het oppervlaktewater terecht komen. Doordat water beide nutriënten, - stikstof en fosfor- kan transporteren bepaalt de waterhuishouding in belangrijke mate de routes waarlangs de nutriënten het oppervlaktewater bereiken. Voor de evaluatie van inspanningen gericht op milieudoelen is het nuttig onderscheid te maken tussen stuurbare bronnen en stuurbare routes. Verder is er een methodische samenhang met lotgevallenstudies. In een lotgevallenstudie staat de vraag centraal waar de toegediende stikstof of fosfor blijft en hoe het zich verdeelt over verschillende balansposten in de bodem. Zowel in een bronnenanalyse als in een lotgevallenstudie worden de stikstof- en fosfor-balansen voor het beschouwde milieucompartiment, in ons geval de bodem zoals weergegeven in figuur 2.1, opgesteld.

De verandering van de bodemvoorraad kan zowel een input-term als een output-term zijn in de bodembalans. Als de bodemvoorraad toeneemt, fungeert de verandering als een verdwijnterm en is hij geen bron die bijdraagt aan de andere output-termen. Als de bodemvoorraad afneemt is hij wel een bron en kan aan deze term in een lotgevallenstudie geen stikstof of fosfor worden toegevoegd vanuit de balansterm 'mest'.

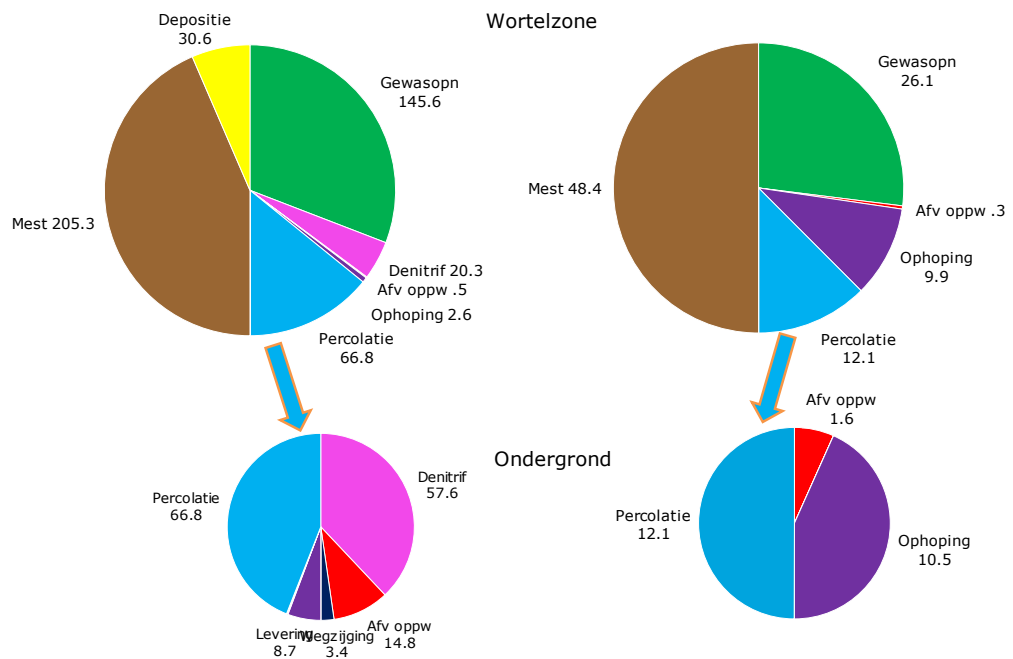
De term 'mest' is verder te onderscheiden in 'historische mestgift' en 'huidige mestgift'. Met de historische mestgift wordt de bijdrage uit de bodem bedoeld vanuit de voorraad die in de afgelopen 30 jaar is ontstaan door mestoverschotten. De historische mestgift is mede bepalend voor de huidige belasting van oppervlaktewater, maar is niet meer te sturen als middel voor reductie van oppervlaktewaterbelasting. In dynamische simulatiemodellen kan het onderscheid tussen historie en huidige situatie worden aangebracht door de tijdreeks van bemesting te manipuleren.

In figuur 2.1 wordt de bodem voorgesteld als één compartiment. Dit kan de suggestie wekken dat de stoffen in de bodem gelijkmatig zijn verdeeld. Dit doet vaak geen recht aan de werkelijkheid. De meeste gemakkelijk beschikbare mineralen bevinden zich in de wortelzone of de bouwvoor. Er kunnen zich situaties voordoen dat de ophopingssnelheid in de wortelzone groter is dan de uitputtingssnelheid in de ondergrond. Voor het gehele profiel berekend vindt er dan ophoping plaats (bodemvoorraad als verdwijnterm), terwijl desondanks de bodem toch bijdraagt aan de belasting van oppervlaktewater. Een schattingsmethode die hiermee rekening houdt en die inzicht geeft in de onderlinge relaties tussen bouwvoor en ondergrond is gewenst.

## **2.2 Eerder toegepaste methoden**

### **2.2.1 Berekenen van de balansposten**

De verdeling van de balansposten geeft een eerste indruk van het relatieve belang van de bronnen bemesting, depositie en de bijdrage van de bodem aan het totaal van de balans. De kwantificering van de uitgaande termen geeft inzicht in het relatieve aandeel van de bronnen in de uitspoeling naar het oppervlaktewater. Figuur 2.2 is een voorbeeld van een dergelijk diagram voor een maisperceel. De gemiddelde bodembalans is hierin onderverdeeld in de wortelzone en de ondergrond.



**Figuur 2.2**  
**Stikstofbalansen (links) en fosforbalansen (rechts) in kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> van een maisperceel in het Schuitenbeekgebied berekend als gemiddelde voor de periode 2001-2015.**

In deze figuur is te zien dat het grootste deel van de nutriëntenkringloop zich afspeelt in de wortelzone, maar dat de belasting van oppervlaktewater voornamelijk afkomstig is van de bodem onder de wortelzone (14.8 kg ha<sup>-1</sup> vs 0.5 kg ha<sup>-1</sup> uit de wortelzone). In dit geval heeft denitrificatie bijna een viermaal zo belangrijke aandeel in de stikstofbalans dan stikstofuitspoeling naar het oppervlaktewater, zowel in de wortelzone als in de ondergrond. Van de 12.1 kg ha<sup>-1</sup> fosfor die jaarlijks vanuit de wortelzone uitspoelt naar de ondergrond wordt 10.5 kg ha<sup>-1</sup> gebonden aan de bodem en komt 1.6 kg ha<sup>-1</sup> tot uitspoeling, van de 48.3 kg ha<sup>-1</sup> die via mest aan de wortelzone wordt toegevoegd spoelt maar 0.3 kg ha<sup>-1</sup> af naar het oppervlaktewater.

Deze methode geeft geen inzicht in de werkelijke bijdrage van de bronnen aan de uitspoeling naar het oppervlaktewater omdat de routes van de bronnen naar het oppervlaktewater niet zijn verdisconteerd.

## 2.2.2 Gevoeligheidsanalyse

Een bronnenberekening kan worden uitgevoerd met gevoeligheidsanalyse waarbij een verandering van de verhouding in uitspoeling van stikstof en fosfor wordt gerelateerd aan een verandering van de bronsterkte. In deze methode wordt de verdeling van bronnen geschat aan de hand van elasticiteiten. De elasticiteitscoëfficiënt wordt gegeven door:

$$p_i = \frac{\Delta L_i / L}{\Delta S_i / S_i} \quad (1)$$

waarin  $\Delta L_i / L$  de relatieve verandering is van de oppervlaktewaterbelasting (*load*) en  $\Delta S_i / S_i$  de relatieve verandering van een bron *i* (*source*). De elasticiteit  $p_i$  drukt dan de verhouding van de verandering van de load ten opzichte van de verandering van de *source*. Als  $p_i = 0.1$  vermindert de belasting van het oppervlaktewater met 0.1 % als gevolg van een 1% kleinere bron *i*.

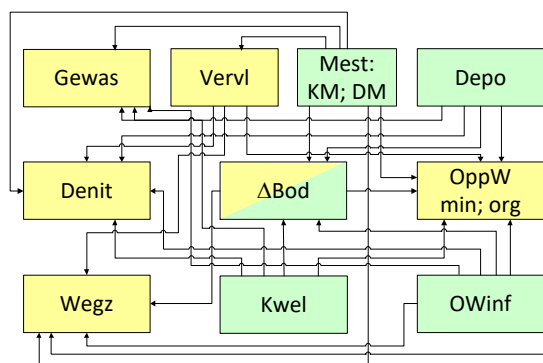
Het traject waarin binnen een gevoeligheidsanalyse de bron kan worden gevarieerd is kleiner naarmate het systeem sterker niet-lineair reageert. Gezorgd moet worden dat binnen het traject  $\Delta S_i$  de reactie van  $\Delta L_i$  lineair is.

Bij een negatieve waarde van de term 'verandering bodemvoorraad' komt stikstof en/of fosfor vrij en fungeert de bodem als bron.  $S_{\text{bodem}}$  is dan positief. Echter, als de term 'verandering bodemvoorraad' positief is, vormt hij een sink en is  $S_{\text{bodem}}$  negatief. In deze situatie wordt geen elasticiteit voor deze term berekend en speelt de bodem geen rol bij de berekening van de relatieve bijdrage van bronnen.

Omdat de bodemvoorraad en de verandering in de bodemvoorraad over de diepte kunnen verschillen is het noodzakelijk de bodem in compartimenten op te delen in bijvoorbeeld de wortelzone en de ondergrond op te delen. Een risico van de 'gevoeligheidsmethode' is dat door kleine, zeer geleidelijk optredende, vertraagde wijzigingen (een wijziging in een bron werkt niet altijd onmiddellijk door in de emissie naar het oppervlaktewater) niet in alle situaties een duidelijke verandering wordt berekend en de elasticiteit niet adequaat kan worden gedefinieerd.

De uitsluiting van bronnen ( $\Delta L_i/L = -1$ ), is als een extreme variant van gevoeligheidsmethode te beschouwen. De uitsluiting van bronnen mag alleen worden toegepast i) als het systeem lineair reageert op de verandering van bronnen; ii) als de modellen valide zijn in het traject waarin een bron niet meer voorkomt en iii) als een bronsterkte nul reëel zou zijn voor het gewas-bodemsysteem. In het ANIMO-model dat onderdeel uitmaakt het Landelijk Waterkwaliteitsmodel (Groenendijk et al, 2005) en het STONE-model (Groenendijk et al, 2013) wordt gebruik gemaakt van de QUADMOT- en MEBOT-modellen voor het bepalen van de gewasopname. Een afname van de bemesting groter dan 30% is voor deze modellen niet meer reëel. De volledige uitsluiting van de bron bemesting zou (zoals gedaan door Van der Bolt et al., 2007) een verandering van landgebruik impliceren: landbouw wordt omgezet naar natuur.

Met de resultaten van een gevoeligheidsanalyse wordt een regressiemodel opgesteld waarin de uitgaande termen van de stikstof- en de P-balans worden gerelateerd aan de ingaande termen met behulp van lineaire (regressie-) vergelijkingen. In deze benadering onderscheiden we de aanvoer van water en stoffen uit het grondwater met kwel van de afvoer van water en stoffen naar het grondwater door wegzijging (figuur 2.3).



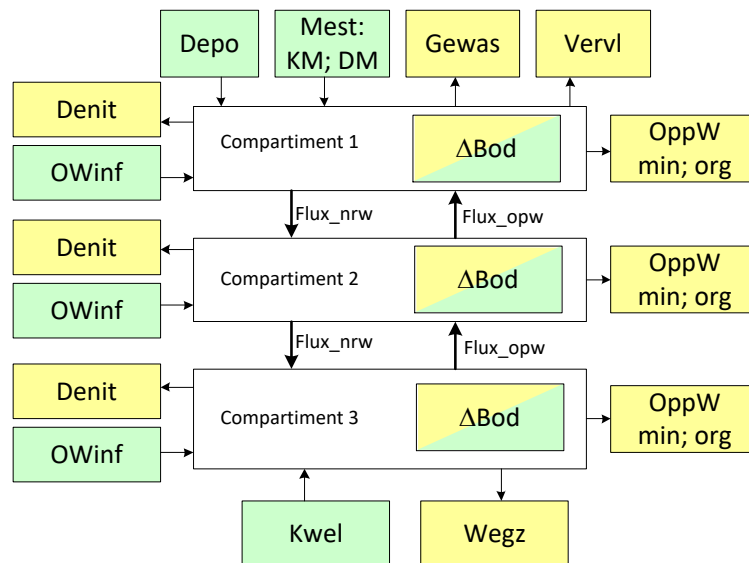
**Figuur 2.3**  
 Lineair regressiemodel op basis van de inputs en outputs van het ANIMO-model, waarin of kwel of wegzijging optreedt. Groen = bronterm; geel = putterm.

Als mogelijke bronnen worden onderscheiden de bemesting (Mest) met dierlijke mest (DM) en kunstmest (KM), de droge en natte atmosferische depositie (Depo), de aanvoer met kwelwater (Kwel) en de aanvoer met infiltrerend oppervlaktewater (OWinf): in peilbeheerste poldergebieden infiltreert in de zomer water vanuit sloten in de bodem en zorgt dan voor aanvoer van nutriënten naar de bodem. Tenslotte kan ook de bodem zelf stikstof- en fosfor afgeven en kan daarmee een bron zijn ( $\Delta\text{Bod}$ ). Deze term bodemleverantie is eigenlijk een restterm waarin enkele naijlings-effecten samen tot een verandering leiden van de bodemvoorraad:

- De afname of toename van de voorraad organische gebonden stikstof en fosfor en de afname of toename van de voorraad ammonium, nitraat en fosfor doordat van een oude overschotsituatie is overgegaan naar een nieuwe overschotsituatie. Fosfor is voor het grootste gedeelte aanwezig in de vorm van geadsorbeerd en geprecipiteerd fosfaat en een verandering van de voorraad minerale fosfor heeft dan vooral betrekking op deze pool.
- De langzame ontwikkeling van een oude naar een nieuwe overschotsituatie. De brontermen zijn geschat door de resultaten van tien jaar (periode 2001 – 2010) te middelen in de veronderstelling dat hiermee de effecten van de variatie in weer worden uitgemiddeld. In deze periode waren daarnaast de overschotten niet constant maar daalden deze voor de meeste landbouwgebruiksvormen. De afnemende trend in bodemoverschotten komt ook tot uiting in een na-ijling in de verandering van de bodemvoorraad.
- Behalve variatie in weer en afnemende mestgiften spelen ook de trends en de variatie van de gewasopname een rol. In ANIMO binnen het Landelijk Waterkwaliteitsmodel is de gewasopname over meerjarige periodes niet constant omdat rekening wordt gehouden met o.a. weerseffecten en trends in de landbouwstatistieken. Ook dit leidt tot na-ijleffecten.

Het effect van historische bodemoverschotten komt evenals het effect van de historische depositie en de kwel in het verleden tot uitdrukking in de veranderingssnelheid van de bodemvoorraad. Als de verandering in de bodemvoorraad ( $\Delta Bod$ ) kleiner is dan nul, dan treedt de bodem op als bronterm voor de belasting van het oppervlaktewater en spreken we van bodemlevering ( $BoL$ ). Naast de overschotten, depositie en kwel hebben ook (de inschatting van) de bodemeigenschappen en de beginvoorraad effect op de bodemlevering.

Een onderscheid in diepte-compartmenten in het bodemprofiel is gewenst omdat zich situaties kunnen voordoen waarin de ophopingssnelheid in de wortelzone groter is dan de uitputtingssnelheid in de ondergrond. Voor het gehele profiel vindt er dan (netto) ophoping plaats (bodemvoorraad als verdwijnterm), terwijl desondanks de bodem toch bijdraagt aan de belasting van oppervlaktewater. Om deze reden dient ook het verticale transport als balanspost te worden beschouwd. Voor een 3-lagen profiel komt het schema er als volgt uit te zien (figuur 2.4).



**Figuur 2.4**

*Lineair regressiemodel op basis van de inputs en outputs van het ANIMO-model Statisch opgesteld voor drie bodemlagen.*

De termen 'Infiltratie uit oppervlaktewater', 'denitrificatie', 'uitspoeling naar oppervlaktewater' en verandering bodemvoorraad worden nu per laag berekend en ook worden uitwisselingsfluxen tussen de compartimenten berekend.

De laterale uit- en afspoeling van de bronnen voor compartiment 1 naar het oppervlaktewater (OppW) wordt in het regressiemodel geschreven als:

$$OppW_1 = a_{1,1}(KM + DM) + a_{1,2}Depo + a_{1,3}Flux_{opw_1} + a_{1,4}OW_{inf,1} + a_{1,5}(BoL_1 | > 0) \quad (2)$$

Hierin zijn  $KM$  en  $DM$  de bemesting met kunstmest en dierlijke mest,  $Depo$  is de depositie,  $Flux_{opw}$  is de aanvoer uit de ondergrond met capillaire opstijging,  $OW_{inf}$  is de aanvoer met infiltratie van oppervlaktewater en  $BoL$  is de bodemleverantie. Omdat de verandering van de bodemvoorraad ook negatief kan zijn, wordt als expliciete eis gesteld dat  $BoL$  groter dan 0 moet zijn.

De neerwaartse uitspoeling uit compartiment 1 ( $Flux_{nrw_1}$ ) wordt ook als lineaire geschreven:

$$Flux_{nrw_1} = b_{1,1}(KM + DM) + b_{1,2}Depo + b_{1,4}OW_{inf,1} + b_{1,5}(BoL_1 | > 0) \quad (3)$$

En voor de opwaartse flux naar compartiment 1 ( $Flux_{opw_1}$ ) geldt:

$$Flux_{opw_1} = c_{2,3}Flux_{opw_2} + c_{2,4}OW_{inf,2} + c_{2,5}(BoL_2 | > 0) \quad (4)$$

Analoog aan de bovenstaande formules worden ook vergelijkingen opgesteld voor compartiment 2 en 3:

$$\begin{aligned} OppW_2 &= a_{2,1}Flux_{nrw_1} + a_{2,3}Flux_{opw_2} + a_{2,4}OW_{inf,2} + a_{2,5}(BoL_2 | > 0) \\ Flux_{nrw_2} &= b_{2,1}Flux_{nrw_1} + b_{2,4}OW_{inf,2} + b_{2,5}(BoL_2 | > 0) \\ Flux_{opw_2} &= c_{3,3}Kwel + c_{3,4}OW_{inf,3} + c_{3,5}(BoL_3 | > 0) \\ OppW_3 &= a_{3,1}Flux_{nrw_2} + a_{3,3}Kwel + a_{3,4}OW_{inf,3} + a_{3,5}(BoL_3 | > 0) \end{aligned} \quad (5)$$

De totale belasting van het oppervlaktewater wordt dan berekend als de som van  $OppW_1$ ,  $OppW_2$  en  $OppW_3$ . De termen voor opwaartse en neerwaartse fluxen tussen de compartimenten zijn te elimineren door substitutie, zodat:

$$\begin{aligned} OppW &= (a_{1,1} + a_{2,1}b_{1,1} + a_{3,1}b_{1,1}b_{2,1})Mest \\ &\quad + (a_{1,2} + a_{2,1}b_{1,2} + a_{3,1}b_{1,2}b_{2,1})Depo + \\ &\quad (a_{3,3} + a_{2,3}c_{3,3} + a_{1,3}c_{2,3}c_{3,3})Kwel \\ &\quad + (a_{1,4} + a_{2,1}b_{1,4} + a_{3,1}b_{1,4}b_{2,1})OW_{inf,1} + \\ &\quad (a_{2,4} + a_{3,1}b_{2,4} + a_{1,3}c_{2,4})OW_{inf,2} \\ &\quad + (a_{3,4} + a_{2,3}c_{3,4} + a_{1,3}c_{2,3}c_{3,4})OW_{inf,3} + \\ &\quad (a_{1,3} + a_{2,1}b_{1,5} + a_{3,1}b_{1,5}b_{2,1})(BoL_1 | > 0) \\ &\quad + (b_{2,5} + a_{3,1}b_{2,5} + a_{1,3}c_{2,5})(BoL_2 | > 0) + \\ &\quad (b_{3,5} + a_{2,3}c_{3,5} + a_{1,3}c_{2,3}c_{3,5})(BoL_3 | > 0) \end{aligned} \quad (6)$$

Deze vergelijking is te herschrijven als:

$$\begin{aligned} OppW &= f_1Mest + f_2Depo + f_3Kwel + f_{4,1}OW_{inf,1} + f_{4,2}OW_{inf,2} + f_{4,3}OW_{inf,3} \\ &\quad + f_{5,1}(BoL_1 | > 0) + f_{5,2}(BoL_2 | > 0) + f_{5,3}(BoL_3 | > 0) \end{aligned} \quad (7)$$

Bemesting is voor de meeste landbouwgronden de grootste bron van nutriënten. Een belangrijk deel van deze nutriënten wordt opgenomen door het gewas. Deze 'overheersende' invloed van mest leidt ertoe dat de rekenprocedure voor het afleiden van de coëfficiënten soms instabiel is.

Daarom is Vgl. 7 op een alternatieve manier geschreven waarbij de 'Mest' is vervangen door 'Overschot'. De term 'Overschot' wordt in de analyse berekend als 'Mest – Gewasopname':

$$OppW = f_1^* Overschot + f_2^* Depo + f_3^* Kwel + f_{4,1}^* OW_{inf,1} + f_{4,2}^* OW_{inf,2} + f_{4,3}^* OW_{inf,3} + f_{5,1}^* (BoL_1 | > 0) + f_{5,2}^* (BoL_2 | > 0) + f_{5,3}^* (BoL_3 | > 0) \quad (8)$$

De coëfficiënten in Vgl. 7 zijn te herleiden door:

$$f_i = f_i^* \frac{OppW}{OppW + f_1^* Gewasopname} \quad (9)$$

Waarin de onderschrift in  $f_i$  verwijst naar een index in Vgl. 7.

In de term 'verandering van bodemvoorraad' is geen onderscheid gemaakt naar de herkomst van de bodemvoorraad zelf, terwijl het inzicht hierin soms wel is gewenst. De verandering van de bodemvoorraad wordt beïnvloed door een veelheid aan processen zoals: de hoeveelheid en de kwaliteit van de organische stof die aan het begin van de simulatie werd verondersteld, de hoeveelheid en de kwaliteit van de inputs in de recente geschiedenis, de oplading van de hoeveelheid minerale stikstof en fosfor in de waterfase van de bodemkolom en de snelheid waardoor de hoeveelheid verandert als gevolg van veranderingen in het netto-neerslag overschot, de veranderingen van de bemesting en de gewasopname in de rekenperiode waarvoor balansen worden opgesteld. Om de invloed van historische mestoverschotten op de belasting van het oppervlaktewater te schatten is een vergelijking opgesteld waarin de verandering van de bodemvoorraad is gerelateerd aan het totale geaccumuleerde overschot over de periode die als representatief voor 'historisch' wordt beschouwd en een restterm.

$$BoL_i = a_i \sum_{j=1941}^{2000} (Mest_j - Gewasopname_j) + b_i \quad (10)$$

Hierin verwijst het onderschrift  $i$  in de coëfficiënt  $a_i$  en  $b_i$  naar het compartiment nummer in Vgl. 7. Het aandeel van de historische overschotten in de verandering van de bodemvoorraad is dan te berekenen als:

$$\{a_i \sum_{j=1941}^{2000} (Mest_j - Gewasopname_j)\} / BoL_i.$$

Deze fracties kunnen worden ingevuld in Vgl.7, waarmee een schatting wordt verkregen van het aandeel van de historische overschotten aan de huidige belasting van het oppervlaktewater.

### 2.2.1 Voor- en nadelen van de eerder toegepaste methoden

De methoden van het opstellen van balansen en de bronsplitsing aan de hand van een gevoeligheidsanalyse hebben het voordeel dat de ze uitgevoerd kunnen worden met de bestaande rekencode voor het berekenen van uit- en afspoeling in regionale en landelijke modelstudies. Er kleven echter ook nadelen aan:

- De berekende verdeling van de bronnen is een gemiddelde over een reeks van jaren en in de bronverdeling kan geen tijdverloop worden aangegeven. Een onderscheid tussen de bronverdeling in de zomerperiode en in de winterperiode kan relevant zijn voor het bepalen van de opgave aan de hand van zomergemiddelde concentraties van het oppervlaktewater. De eerder toegepaste methoden geven geen zuiver beeld van de bronverdeling in de zomer.
- Als gevolg van maatregelen kan de uit- en afspoeling veranderen in de loop van de tijd. Daarmee verandert ook de verdeling van de verschillende bronnen. In de eerder toegepaste methoden werd het onderscheid tussen uitspoeling uit historische bemesting en uit de nalevering uit andere bodempools sterk beïnvloed door de aannames ten aanzien van de

datum van de overgang van historische bemesting naar actuele bemesting. Gezien de beleidsdiscussies over het perspectief op doelbereik na de einddatum van de KRW in 2027 is het van belang een goed beeld te hebben van de naijling van de uitspoeling door historische bemesting.

- De gevoeligheidsanalyse is een rekenintensief proces. De analyse werd uitgevoerd met een Latin Hypecupe Sampling van een aantal vermenigvuldigingsfactoren die op de verschillende bronnen werden toegepast. Dit resulteerde in een hondertal combinaties van vermenigvuldigingsfactoren waarna het model 100 maal werd gerund. De nieuwe methode onderscheid meer deelvariabelen en daarmee duurt een enkele modelrun langer, maar voor een analyse volstaat één run.

### 3 Nieuwe methode: simulatie van gelabelde stoffen

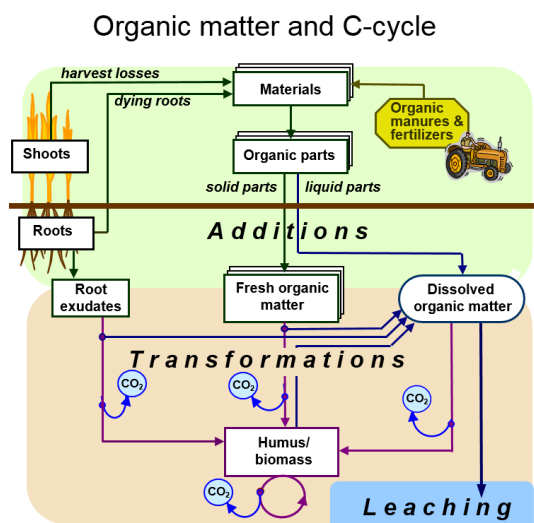
Zoals in hoofdstuk 2 is aangegeven onderscheiden we verschillende bronnen van uitspoeling in het bodem- en gewassysteem. De belangrijkste zijn: bemesting, depositie op het oppervlak, kwel, nalevering uit de bodem<sup>1</sup>, en door de uitspoeling van nutriënten in de winterperiode nadat in de zomerperiode water en nutriënten vanuit het oppervlaktewater in de bodem zijn geïnfiltreerd. Bij bemesting kan een nader onderscheid gemaakt worden in dierlijke mest en kunstmest en in de periode waarin de mest in de bodem is terecht gekomen. Bemesting die in het verleden tot een paar jaar geleden is gegeven merken we aan "historische bemesting".

Om de nadelen van de in hoofdstuk 2 gepresenteerde methoden te ondervangen is een methode ontwikkeld met zgn. "gelabelde stoffen". Volgens deze methode worden stromen van organische stof, stikstof en fosfor in het model opgesplitst in delen die corresponderen met de bron waaruit stikstof en fosfor afkomstig is. Elk deel van de opgesplitst pool heeft dan een "label" met de naam van de bron. Voor de implementatie van deze methode waren aanpassingen in een groot aantal onderdelen van de modelcode nodig. Een enkele modelrun met de nieuwe methode is rekenintensiever dan een gewone simulatie zonder onderscheid in herkomst van de stoffen. De modelcode bevat een optie om zonder onderscheid in bronnen te kunnen rekenen en kan worden ingezet voor studies waarin een bronnensplitsing niet nodig is.

Om de methode van bronnensplitsing te begrijpen is het nodig inzicht te hebben in de wijze waarop de organische stofkringloop, de stikstofkringloop en de fosforkringloop zijn gemodelleerd.

De organische stof- en stikstofomzettingsprocessen zijn in het ANIMO-model beschreven als een lineair reagerend deelsysteem, maar de binding van fosfaat aan de bodem gedraagt zich niet-lineair en vraagt extra aandacht. Hiervoor moeten aanvullende aannames worden gedaan.

In de organische stofkringloop in het ANIMO-model zijn een aantal pools gedefinieerd (Figuur 3.1).



**Figuur 3.1**  
**Schematische weergave van de organische stofkringloop. Voor het plantsysteem wordt onderscheid gemaakt tussen bovengrondse en ondergrondse delen en in de bodem in pools met verse organische stof, wortelresten, opgeloste organische stof en humus/biomassa.**

<sup>1</sup> Nalevering uit de bodem door uitloging van ingepolderde gronden (zeeklei), door mineralisatie ten gevolge van oxidatie van veengronden en / of door ontwatering van zandgronden



Organische stof komt in de bodem terecht met mestgiften en met plantenresten. Deze toegediende organische stof bestaat uit verschillende bestanddelen, met een hoofdindeling van vaste bestanddelen op opgeloste organische stof.

De transformaties tussen de pools zijn beschreven als lineaire eerste orde differentiaalvergelijkingen. De differentiaalvergelijking voor de vaste bestanddelen:

$$\frac{dOM_i}{dt} = -k_i OM_i + k_{i-1} OM_{i-1} + \delta(OM_i) + P(OM_i)$$

en de differentiaalvergelijking voor de opgeloste organische stof:

$$\frac{d\theta DOM}{dt} = -\frac{q_{out}}{\Delta z} DOM + \frac{q_{in} DOM_{in}}{\Delta z} - k_{DOM} \theta DOM + \delta(DOM) + P(DOM)$$

Hierin is:

$OM_i$	Hoeveelheid organische stof van pool i in een bepaalde bodemlaag	[kg]
$\frac{dOM_i}{dt}$	Veranderingssnelheid van de hoeveelheid organische stof van pool i in een bepaalde bodemlaag	[kg d <sup>-1</sup> ]
$k_i$	Eerste orde omzettingsconstante van pool i	[d <sup>-1</sup> ]
$k_{i-1} OM_{i-1}$	Toevoeging van de hoeveelheid organische stof in pool i door omzetting vanuit pool i-1	[kg d <sup>-1</sup> ]
$\delta(OM_i)$	Toevoeging van de hoeveelheid organische stof in pool i op een specifiek tijdstip (begin van een tijdstap)	[kg d <sup>-1</sup> ]
$P(OM_i)$	Toevoeging gelijkmatig in de tijd van de hoeveelheid organische stof in pool i (0-de orde productieterm)	[kg d <sup>-1</sup> ]
$DOM$	Concentratie opgeloste organische stof in een bodemlaag	[kg m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$\theta$	Vochtgehalte van de bodemlaag	[m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
$\frac{d\theta DOM}{dt}$	Veranderingssnelheid van het gehalte opgeloste organische stof in een bepaalde bodemlaag	[kg m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$q_{out}$	Inkomende waterflux in de betreffende bodemlaag	[m d <sup>-1</sup> ]
$q_{in}$	Uitgaande waterflux uit de betreffende bodemlaag	[m d <sup>-1</sup> ]
$\Delta z$	Dikte van de bodemlaag	[m]
$DOM_{in}$	Concentratie opgeloste organische stof in het instromende bodemwater	[kg m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$k_{DOM}$	Eerste orde omzettingsconstante van opgeloste organische stof	[d <sup>-1</sup> ]
$\delta(DOM)$	Toevoeging van de hoeveelheid organische stof in opgelost organische stof pool op een specifiek tijdstip (begin van een tijdstap)	[kg m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$P(DOM)$	Toevoeging gelijkmatig in de tijd van de hoeveelheid organische stof in de opgelost organische stof pool (0-de orde productieterm)	[kg m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]

Voor het maken van een onderscheid naar bronnen worden de pools gesplitst:

$$OM_i^{Tot} = OM_i^{Ini} + OM_i^{DM} + OM_i^{Gew}$$

$$DOM^{Tot} = DOM^{Ini} + DOM^{Reg} + DOM^{Irr} + DOM^{DM} + DOM^{KM} + DOM^{Gew} + DOM^{Kw} + DOM^{OW}$$

Waarin de superscripts de bronnen aanduiden. Tot = totaal aanwezig; Ini = Initieel aanwezig; Reg = afkomstig uit neerslag en depositie; Irr = afkomstig uit beregening; DM = afkomstig uit dierlijke mest; KM = afkomstig uit kunstmest; Gew = afkomstig uit gewasresten; Kw = afkomstig uit kwel; OW = afkomstig uit geïnfiltreerd oppervlaktewater. Voor elk van de gesplitste pools is de differentiaalvergelijking voor de vaste bestanddelen en voor de opgeloste organische stof van toepassing. Voor vaste bestanddelen geldt dat slechts drie van de acht genoemde bronnen van toepassing zijn:

$$\frac{dOM_i^{Ini}}{dt} = -k_i OM_i^{Ini} + k_{i-1} OM_{i-1}^{Ini}$$

$$\frac{dOM_i^{DM}}{dt} = -k_i OM_i^{DM} + k_{i-1} OM_{i-1}^{DM} + \delta(OM_i^{DM})$$

$$\frac{dOM_i^{Gew}}{dt} = -k_i OM_i^{Gew} + k_{i-1} OM_{i-1}^{Gew} + \delta(OM_i^{Gew})$$

De som van de vergelijkingen voor de gesplitste pools vormt de oorspronkelijke vergelijking:

$$\frac{dOM_i^{Ini}}{dt} + \frac{dOM_i^{DM}}{dt} + \frac{dOM_i^{Gew}}{dt} =$$

$$-k_i OM_i^{Ini} + k_{i-1} OM_{i-1}^{Ini} - k_i OM_i^{DM} + k_{i-1} OM_{i-1}^{DM} + \delta(OM_i^{DM}) - k_i OM_i^{Gew} + k_{i-1} OM_{i-1}^{Gew} + \delta(OM_i^{Gew}) =$$

Herschrijven geeft:

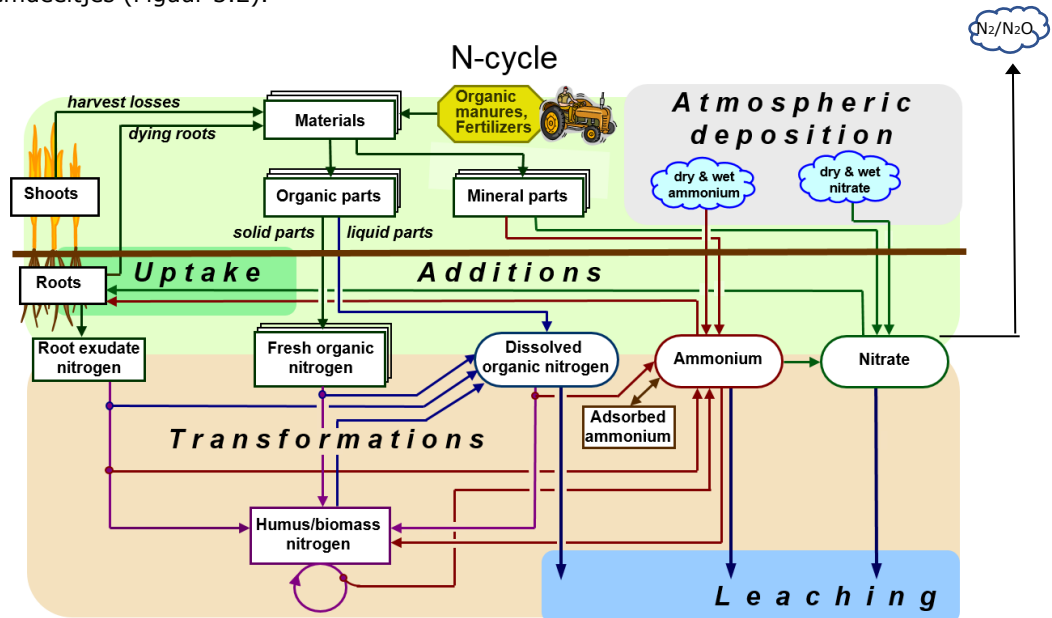
$$\frac{d(OM_i^{Ini} + OM_i^{DM} + OM_i^{Gew})}{dt} = -k_i(OM_i^{Ini} + OM_i^{DM} + OM_i^{Gew}) + k_{i-1}(OM_{i-1}^{Ini} + OM_{i-1}^{DM} + OM_{i-1}^{Gew}) + \delta(OM_i^{DM} + OM_i^{Gew} + 0)$$

Oftewel:

$$\frac{d(OM_i^{Tot})}{dt} = -k_i(OM_i^{Tot}) + k_{i-1}(OM_{i-1}^{Tot}) + \delta(OM_i^{Tot})$$

Voor opgeloste organische stof geldt hetzelfde principe. De differentiaalvergelijkingen voor elk onderdeel van de gesplitste pools kunnen worden gesommeerd. De som van de termen vormt dan weer de differentiaalvergelijking voor  $DOM^{Tot}$ .

Voor stikstof is het schema van de kringloop uitgebreider. Naast de pools met organisch gebonden stikstof zijn er ook pools voor nitraat, ammonium in oplossing en ammonium geadsorbeerd aan bodemdeeltjes (Figuur 3.2).



**Figuur 3.2**  
Schematische weergave van de stikstofkringloop in het ANIMO-model.

De pools met organisch gebonden stikstof worden berekend uit de hoeveelheid organische stof in een pool vermenigvuldigd met een stikstoffractie. De stikstoffracties zijn specifiek voor de pools en worden gedefinieerd in de modelinvoer. Door mineralisatie komt stikstof vrij uit de organische pools in de vorm van ammonium. Ammonium wordt in aanwezigheid van voldoende zuurstof omgezet naar nitraat. Bij afwezigheid van zuurstof of onder zuurstofarme omstandigheden wordt nitraat op zijn beurt weer afgebroken tot  $N_2$  en voor een klein deel tot  $N_2O$ . Stikstof komt in de bodem terecht met dierlijke mest,

kunstmest, gewasresten, droge depositie en met regenval. Daarnaast kan stikstof de bodem van een perceel binnendringen met stikstofhoudend kwelwater, met beregeningswater en met water dat in de zomer vanuit het oppervlaktewater infiltreert. Een belangrijke post in de stikstofkringloop is de opname door gewassen. Zowel nitraat als ammonium kunnen worden opgenomen door plantenwortels. De differentiaalvergelijkingen voor de massaconserving en het transport van ammonium en nitraat zijn in het ANIMO-model als volgt geformuleerd:

$$\rho_d K_d \frac{dNH_4}{dt} + \frac{d\theta NH_4}{dt} = -\frac{q_{out}}{\Delta z} NH_4 + \frac{q_{in} NH_{4,in}}{\Delta z} - \sigma_{NH_4} \frac{q_{tr}}{\Delta z} NH_4 - k_{nitr} \theta NH_4 + \delta(NH_4) + P(NH_4)$$

$$\frac{d\theta NO_3}{dt} = -\frac{q_{out}}{\Delta z} NO_3 + \frac{q_{in} NO_{3,in}}{\Delta z} - \sigma_{NO_3} \frac{q_{tr}}{\Delta z} NO_3 + k_{nitr} \theta NH_4 - \min(k_{den} \theta NO_3, \omega_{ox}) + \delta(NO_3)$$

Hierin is:

$NH_4$	Concentratie ammonium-stikstof in het bodenvocht van een bodemlaag	[kg m <sup>w-3</sup> ]
$\frac{d\theta NH_4}{dt}$	Veranderingssnelheid van het gehalte ammonium-stikstof in een bepaalde bodemlaag	[kg m <sup>s-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$\rho_d$	Droge bulkdichtheid	[kg m <sup>s-3</sup> ]
$K_d$	Lineaire sorptiecoëfficiënt voor ammonium-stikstof	[m <sup>w3</sup> kg <sup>s</sup> ]
$NH_{4,in}$	Ammonium-stikstofconcentratie van het instromende bodemwater	[kg m <sup>w-3</sup> ]
$q_{tr}$	Transpiratieflux	[m d <sup>-1</sup> ]
$\sigma_{NH_4}$	Concentratie-transpiratiestroomfactor voor ammoniumopname (vermenigvuldigingsfactor ten opzichte van passieve stroming van ammonium-stikstof)	[-]
$k_{nitr}$	Eerste orde nitrificatieconstante	[d <sup>-1</sup> ]
$\delta(NH_4)$	Toevoeging van ammonium-stikstof op een specifiek tijdstip (mest, depositie)	[kg m <sup>s-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$P(NH_4)$	Toevoeging van ammonium-stikstof gelijkmatig in de tijd (mineralisatie)	[kg m <sup>s-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$NO_3$	Concentratie ammonium-stikstof in het bodenvocht van een bodemlaag	[kg m <sup>w-3</sup> ]
$\frac{d\theta NO_3}{dt}$	Veranderingssnelheid van het gehalte nitraat-stikstof in een bepaalde bodemlaag	[kg m <sup>s-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$NO_{3,in}$	Concentratie nitraat-stikstof in het instromende bodemwater	[kg m <sup>w-3</sup> ]
$\sigma_{NO_3}$	Concentratie-transpiratiestroomfactor voor nitraatopname (vermenigvuldigingsfactor ten opzichte van passieve stroming van nitraat-stikstof)	[-]
$k_{den}$	Eerste orde denitrificatieconstante	[d <sup>-1</sup> ]
$\omega_{ox}$	Nulde orde putterm voor de denitrificatiesnelheid gestuurd door behoefte aan nitraatzuurstof bij de afbraak van organische stof	[kg m <sup>s-3</sup> d <sup>-1</sup> ]
$\delta(NO_3)$	Toevoeging van nitraat-stikstof op een specifiek tijdstip (mest, depositie)	[kg m <sup>s-3</sup> d <sup>-1</sup> ]

In de differentiaalvergelijking voor nitraat-stikstof komt een uitdrukking voor de denitrificatiesnelheid voor waarbij afhankelijk van de situatie een keuze gemaakt wordt voor de geldende uitdrukking. De keuze wordt gemaakt door de oplossing van de vergelijking te berekenen voor zowel de situatie dat de nitraatconcentratie snelheidsbeperkend is en voor de situatie dat de vraag naar nitraatzuurstof ( $\omega_{ox}$ ) beperkend is. De oplossing met laagste waarde voor  $k_{den} \theta NO_3$  of voor  $\omega_{ox}$  wordt uiteindelijk gekozen.

Evenals voor de vaste bestanddelen van organische stof en voor de opgeloste organische stofpool kan de ammoniumconcentratie en de nitraatconcentratie worden geschreven als de som van gesplitste concentraties:

$$NH_4^{Tot} = NH_4^{Ini} + NH_4^{Reg} + NH_4^{Irr} + NH_4^{DM,hist} + NH_4^{DM,act} + NH_4^{KM,hist} + NH_4^{KM,act} + 0 + NH_4^{Kw} + NH_4^{OW}$$

$$NO_3^{Tot} = NO_3^{Ini} + NO_3^{Reg} + NO_3^{Irr} + 0 + 0 + NO_3^{KM,hist} + NO_3^{KM,act} + NO_3^{Gew} + NO_3^{Kw} + NO_3^{OW}$$

Hierin hebben de superscripts de volgende betekenis:

*Tot*: totaal, de som van de onderdelen

*Ini*: afkomstig uit de initieel aanwezige voorraad voor de start van de simulatie

*Reg*: afkomstig uit neerslag

*Irr*: afkomstig uit beregeningswater

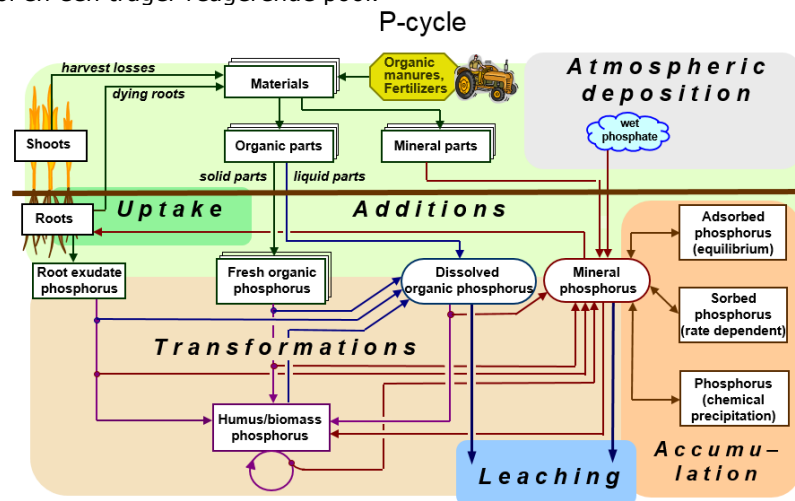
$DM_{hist}$ : afkomstig uit dierlijke mest gegeven in het verleden  
 $DM_{act}$ : afkomstig uit dierlijke mest recent gegeven  
 $KM_{hist}$ : afkomstig uit kunstmest gegeven in het verleden  
 $KM_{act}$ : afkomstig uit kunstmest recent gegeven  
 Gew: afkomstig van gewasresten  
 Kw: afkomstig uit kwel  
 OW: afkomstig uit geïnfilterd oppervlaktewater

Gewasresten bevatten in de formulering van het ANIMO-model geen ammonium of nitraat, met uitzondering gras dat wel nitraat kan bevatten. Daarnaast wordt er vanuit gegaan dat dierlijke mest geen nitraat bevat, maar dat de minerale stikstof in deze mest volledig in de vorm van ammonium is.

Voor de gesplitste concentraties zijn de vergelijkingen voor de massaconserving en transport van toepassing. Een uitzondering vormt de term voor denitrificatie  $\min(k_{den} \theta NO_3, \omega_{ox})$ . In het rekenschema wordt eerst  $NO_3^{Tot}$  berekend en met dit resultaat wordt vervolgens de denitrificatie voor elk van de gesplitste concentraties berekend naar rato van het aandeel van de gesplitste concentratie in de totale concentratie:  $\min(k_{den} \theta NO_3^{Tot}, \omega_{ox}) \frac{NO_3^{bron}}{NO_3^{Tot}}$ .

Het schema van de fosforkringloop in de bodem is weergegeven in Figuur 3.3. Evenals voor stikstof worden de pools met organisch gebonden fosfor worden berekend uit de hoeveelheid organische stof in een pool vermenigvuldigd met een fosforfractie. Analoog aan de formulering van organisch gebonden stikstof zijn de fosforfracties specifiek voor de pools en komt door mineralisatie komt minerale fosfor vrij uit de organische pools.

In de bovengrond is een groot deel van de fosfor aanwezig in een minerale vorm, waarbij het overgrote deel gebonden is aan bodemdeeltjes. In zandgronden, met uitzondering van de kalkrijke zandgronden in West-Nederland, is de fosfor gebonden aan ijzer- en aluminiumbestanddelen in de bodem. Voor de aan de bodem gebonden fosfor wordt in het ANIMO-model onderscheid gemaakt in een heel snel reagerende pool en een trager reagerende pool.



**Figuur 3.3**  
 Schematische weergave van de fosforkringloop in het ANIMO-model.

De hoeveelheid in de snel reagerende pool (in figuur 3.3 aangeduid met "adsorbed phosphorus, (equilibrium)") wordt uit de bodemvochtconcentratie berekend met een zgn. Langmuir-vergelijking:

$$Q_p = Q_p^{max} \frac{K_L P_{min}}{1 + K_L P_{min}}$$

Hierin is  $P_{min}$  de bodemvochtconcentratie van mineraal fosfor [ $\text{kg m}_w^{-3}$ ],  $Q_p$  het fosforgehalte in de snel reagerende pool van aan de bodem gebonden fosfor [ $\text{kg m}_s^{-3}$ ],  $Q_p^{max}$  het maximum gehalte [ $\text{kg m}_s^{-3}$ ] dat doorgaans berekend wordt als 1/6 maal het aluminium en ijzergehalte van de bodem en  $K_L$  als de Langmuirconstante [ $\text{m}_w^3 \text{kg}^{-1}$ ].

Voor de minerale fosfor in de trager reagerende pools met gebonden fosfor zijn formuleringen opgesteld waarbij de snelheid van adsorptie of desorptie afhankelijk is van het verschil van de actuele hoeveelheid in een pool en de hoeveelheid die er zou zijn bij evenwicht. Deze evenwichtswaarde wordt berekend met een zgn. Freundlichvergelijking. In formulevorm:

$$\frac{dS_p}{dt} = k_{sr}(K_F P_{min}^N - S_p)$$

Hierin is  $S_p$  het fosforgehalte van de traag reagerende bodempool [ $\text{kg m}_s^{-3}$ ], zijn  $K_F$  en  $N$  parameters van de Freundlichvergelijking en is  $k_{sr}$  een eerste orde snelheidsconstante [ $\text{d}^{-1}$ ] voor het adsorptie en desorptieproces. Als  $K_F P_{min}^N$  groter is dan  $S_p$  neemt de hoeveelheid in de pool toe en is er sprake van adsorptie. Als  $K_F P_{min}^N$  kleiner is dan  $S_p$  wordt de pool uitgeput en is er sprake van desorptie.

Zoals hierboven is aangegeven wordt de binding van fosfor aan bodembestanddelen beschreven met niet-lineaire vergelijkingen. De methodiek van het splitsen van concentraties en gehalten in gelabelde onderdelen is niet direct toepasbaar op de minerale fosfor gebonden aan bodemdeeltjes. Hiervoor wordt nog een nadere methodiek ontwikkeld waarbij het uitgangspunt is dat het aan een bron toegewezen deel van  $Q_p$  en  $S_p$  evenredig is met het aandeel van de gesplitste bodemvochtconcentratie in de totale bodemvochtconcentratie van in de totale concentratie  $\frac{P_{min}^{bron}}{P_{min}^{Tot}}$ .

## 4 Implementatie in het ANIMO-model

De nieuwe methode waarbij concentraties en stofvoorraden worden gesplitst naar bron heeft een aanzienlijke uitbreiding van de modelcode van het ANIMO-model gevergd. De grootste aanpassingen waren nodig in de modules voor:

- het simuleren van de toevoeging van mest en gewasresten aan de bodem, eventueel in combinatie met grondbewerking en mestinjectie
- het simuleren van gewasgroei en nutriëntenopname door gewassen
- de output van resultaten in extra bestanden met tijdreeksen en balanstermen

Het ANIMO-model is in Fortran gecodeerd. Voor veel toestandsvariabelen (concentraties, gehalten, voorraden) zijn arrays gedefinieerd met één of meerdere dimensies. Voor de boekhouding van gewasopname zijn meestal scalaire variabelen gedefinieerd. De splitsing naar bronnen is voor deze variabelen tot stand gebracht door ze met een dimensie uit te breiden. De index van de 'brondimensie' kan de volgende waarden aannemen:

- 0 = Som van de gesplitste concentratie, gehalten of voorraden
- 1 = Initieel aanwezig bij het begin van de simulatie
- 2 = afkomstig uit depositie of neerslag
- 3 = afkomstig uit dierlijke mest voor een bepaalde datum
- 4 = afkomstig uit dierlijke mest na de bepaalde datum
- 5 = afkomstig uit kunstmest voor een bepaalde datum
- 6 = afkomstig uit kunstmest na de bepaalde datum
- 7 = afkomstig uit kwel
- 8 = afkomstig uit geïnfilteerd oppervlaktewater
- 9 = afkomstig uit gewasresten
- 10 = afkomstig uit beregeningswater

Bron 3 en 5 hebben betrekking op bemesting in het verleden en bron 4 en 6 op actuele bemesting. Door het opgeven van de datum waarop de actuele bemesting begint kan men in de naar bron gesplitste uit- en afspoeling onderscheid maken in stikstof- en fosfor uit "historische bemesting" en uit "actuele bemesting".

Een gebruiker geeft met een optie aan of alleen bron 0 (Totaal = som van de gesplitste variabelen) wordt beschouwd, of dat alle bronnen worden meegenomen. In het eerste geval heeft het model de oorspronkelijke simulatie-modus.

Voor het vaststellen van een startwaarde van de concentraties, gehalten en voorraden aan het begin van een simulatie wordt vaak een initialisatieprocedure toegepast. Beginwaarden worden berekend voor een bepaald jaar in het verleden (koude start) en vervolgens wordt het model in een serie van deeltijdreeksen gerund. De toestand aan het einde van een deeltijdreeks geldt als de begintoestand van een volgende deeltijdreeks (doorstart). Bij een koude start wordt de gehele waarde van de variabelen toegekend aan bron 1 (initieel aanwezig) en bij een herstart kan de stof zich ook in één van de andere gesplitste variabelen bevinden.

Bij de implementatie is er vooralsnog voor gekozen om gewasresten als afzonderlijke bron te beschouwen. Beredeneerd kan worden dat de stikstof en fosfor in gewasresten oorspronkelijk afkomstig is uit bronnen zoals 'Dierlijke mest', 'Kunstmest', 'Depositie' of 'Initieel'. De term van de gewasresten zou opgesplitst kunnen worden in deze termen. Voor de optie in het ANIMO-model waarbij gewasresten worden berekend met een externe gewasmodule is dit lastig. Voor een toepassing van ANIMO binnen het Landelijke Waterkwaliteitsmodel wordt, evenals voor het STONE-model werd gedaan, gebruik gemaakt van het QUADMOD-model (gras en mais) en het MEBOT-model (akker- en tuinbouwgewassen) voor de berekening van gewasopname en gewasresten. De met deze

modellen berekende gewasopname per tijdstap en bovengrondse en ondergrondse verliezen aan gewasresten worden aan het ANIMO-model opgelegd. Binnen het QUADMOT- en MEBOT-model wordt ten aanzien van de opgenomen stikstof en fosfor geen onderscheid naar herkomst. Het onderscheiden van de herkomst van de nutriënten in de gewasresten is wel mogelijk, maar vraagt nog een verdere uitbreiding van het ANIMO-model waarin per groeiseizoen de verdeling van de herkomst binnen gewasresten op een bepaald tijdstip evenredig wordt verondersteld met de verdeling van de herkomst in de opgenomen nutriënten. Deze uitbreiding is nog niet geïmplementeerd.

Het resultaat van simulatieberekening wordt door het ANIMO-model in verschillende typen tabellen geschreven bestanden. Een gebruiker heeft de mogelijkheid om balansen te presenteren over een zelf gekozen diepte en met een zelf gekozen tijdsinterval en kan daarnaast tijdreeksen van meer dan 70 verschillende variabelen. Als alle bronnen worden meegenomen in de simulatie worden de balansen en tijdreeksen voor bron 1 tot en met 10 ook weggeschreven.

## 5 Testplan

Binnen het KennisImpuls-project "Nutriëntenmaatregelen" is de nieuwe methodiek uitgewerkt, geïmplementeerd in het ANIMO-model en getest op een enkel perceel ter verificatie van de code. Voordat de methodiek ingezet kan worden in gebiedsstudies is een reeks aan testberekeningen nodig:

- Testen met de verschillende modelopties in het ANIMO model. Het model heeft opties voor de simulatie van de sulfaatkringloop, voor de emissie van broeikasgassen en voor het transport door macro-poriën. Echter, deze opties zijn alleen gebruikt in perceelstudies en niet in gebiedsstudies of voor landelijke beleidsrapportages. De modelopties waarvoor de nieuwe methode wel getest moet zijn:
  - De berekening van gewasgroei en gewasopname. Het ANIMO-model kent hiervoor drie opties die allen relevant zijn voor gebiedsstudies en landelijke studies.
  - De opties voor de invloed van aeratie op omzettingsprocessen en denitrificatie. Het ANIMO-model kent hiervoor twee opties. Binnen het Landelijke Waterkwaliteitsmodel wordt gebruik gemaakt van de eenvoudige beschrijving waarbij processnelheden afhankelijk zijn gesteld van het watergevuuld poriëngehalte. Voor de modellering van de nitraatuitspoeling in het gebied van de Vinkenloop is gebruik gemaakt van de uitgebreidere optie in het ANIMO-model waarbij verticaal (binnen poriën) en lateraal (rondom poriën) zuurstoftransport in de bodem als een diffusieproces is beschreven.
- Testen in gebieden met verschillende hydrologische omstandigheden. De invloed van kwel op de belasting van oppervlaktewater was in voorgaande studies gebiedsgemiddeld meestal beperkt. De invloed van uitspoeling van water dat in de zomer vanuit sloten is geïnfiltrerd was slechts in enkele gebieden in West Nederland van belang. Voor deze test is het van belang om de beschikking te hebben over betrouwbare hydrologische informatie uit het Landelijk Hydrologisch Model en/of uit regionale gebiedsmodellen.

De volgende stappen zijn voorzien voor het testen van de methodiek:

1. Test op een aantal percelen in de pilotgebieden met verschillende gewassen (gras, bouwland) en verschillende drainage-omstandigheden (wel of geen buisdrainage).
2. Test voor een tweetal gebieden met uiteenlopende bodemkundige en hydrologische eigenschappen waarvoor eerder een gebiedsstudie is uitgevoerd door Schipper et al (2019a, 2019b).
3. Test op dezelfde gegevens-set als waar de bronnenverdeling in Groenendijk et al (2016) mee berekend om een vergelijking met eerdere resultaten te kunnen maken. Deze eerdere berekening van de bronnenverdeling is gemaakt met STONE2.4.
4. Test door toepassing van de methodiek in het Landelijk Waterkwaliteitsmodel. Een dergelijke test is zinvol bij de beschikbaarheid van hydrologische informatie met voldoende betrouwbaarheid.

Als de resultaten van de bronnenanalyse met het ANIMO-model binnen het LWKM voldoende betrouwbaar zijn, ligt het voor de hand om de naar bronnen gesplitste informatie over uit- en afspoeling te koppelen aan de andere modellen binnen het LWKM. Het KRW-verkennermodel heeft reeds opties om met deze informatie te kunnen rekenen. Voor het grondwaterkwaliteitsmodel MT3DMS zijn waarschijnlijk extra voorzieningen nodig om met de naar bronnen gesplitste informatie te kunnen rekenen.

Een deel van de voorziene activiteiten kan worden uitgevoerd binnen lopende en voorziene projecten. Voor een ander deel zijn de activiteiten afhankelijk van aanvullend budget.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

Een nieuwe methode is ontwikkeld waarmee de herkomst van stikstof en fosfor in uitspoelend water beter wordt berekend dan met eerdere methoden waarin een benadering aan de hand van een gevoeligheidsanalyse werd toegepast. De nieuwe methode biedt de mogelijkheid om de bijdragen uit de verschillende bronnen aan de uitspoeling dynamisch in de tijd te berekenen, terwijl eerdere methoden dit niet konden. Ook kan met de nieuwe methode een beter onderscheid gemaakt worden tussen uitspoeling door nalevering van de bodem, uitspoeling uit historische bemesting en uitspoeling door recente en actuele bemesting.

De nieuwe methode is minder rekenintensief dan de eerdere methode op basis van een gevoeligheidsanalyse en vergt ook minder voorbereiding van modelinvoer en nabewerking van modelresultaten. De methode is daarmee beter geschikt om vaker in te zetten

De ontwikkeling bevindt zich nog in de testfase met een test op een perceel in elk van de twee pilotgebieden van het KIWK-project (Vinkenloop en Vuursteentocht). Hiermee is de methode nog niet onder alle omstandigheden getest waarvoor het ANIMO-model doorgaans wordt toegepast. Het verder testen onder meerdere omstandigheden is nodig voordat het toepasbaar is voor landelijke beleidsstudies. Ook is een vergelijking met resultaten van de eerdere methode nodig en dienen eventuele verschillen met voorgaande resultaten eerst goed begrepen en geduid te worden alvorens de nieuwe methode breed in te zetten voor beleids- en gebiedsstudies.

## Referenties

Groenendijk, P., L.V. Renaud, J. Roelsma, 2005. Prediction of nitrogen and phosphorus leaching to groundwater and surface waters; process descriptions of the animo4.0 model. Wageningen, Alterra. Rapport 983.

Groenendijk, P., L.V. Renaud, E.M.P.M. van Boekel, C. van der Salm, O.F. Schoumans, 2013. Voorbereiding STONE2.4 op berekeningen voor de evaluatie Meststoffenwet 2012. Wageningen, Alterra. Rapport 2462.

Groenendijk, P., H.M. Mulder, R.F.A. Hendriks, F.J.E. van der Bolt, 2014. Bronnen van diffuse nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater : evaluatie Meststoffenwet 2012: deelrapport ex post. Wageningen, Alterra. Rapport 2328.

Groenendijk, P., E. van Boekel, E., L. Renaud, A. Greijdanus, R. Michels, T de Koeijer, 2016. Landbouw en de KRW-opgave voor nutriënten in regionale wateren: het aandeel van landbouw in de KRW-opgave, de kosten van enkele maatregelen en de effecten ervan op de uit- en afspoeling uit landbouwgronden. Wageningen, Wageningen Environmental Research. Rapport 2749.

Hendriks, R.F.A., 2003. Bemesting hoofdoorzaak van eutrofe veensloten? H twee O 36 (11) 33-36

Knoben, R., F. Verhagen, N. Schoffelen, J. Rost, 2021. Ex Ante Analyse Waterkwaliteit. Nijmegen, HaskoningDHV Nederland B.V., Referentie: BH7109WMP2109281159

Planbureau voor de Leefomgeving, 2008. Kwaliteit voor Later. Ex ante evaluatie Kaderrichtlijn Water. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Bilthoven. Publicatie 50014001/2008.

Schipper, P., L. van Gerven, E. van Boekel, L. Renaud, G. Ros, 2019a. Herkomst van nutriënten in het landelijk gebied van Schieland. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2969.

Schipper, P., L. Renaud, E. van Boekel, 2019b. Bronnenanalyse nutriënten stroomgebied Maas. Wageningen, Wageningen Environmental Research rapport 2931

Van der Bolt, F.J.E., H.P. Oosterom, R.F.A. Hendriks & P. Groenendijk, 2007. Bronnen van nutriënten in het landelijke gebied. De bijdrage van landbouw aan oppervlaktewaterkwaliteit in perspectief. Alterra, Wageningen. Rapport 1483.

Verhagen, F., H.P. Broers, A. Krikken, J. Rozemeijer, R. van Ek, M. van Vliet, B. van der Grift, R. Heerdink, R. Knoben, 2007. Invloed van grondwater op oppervlaktewater Regionale differentiatie in Noord-Brabant. Utrecht/'s Hertogenbosch, TNO/Haskoning Nederland B.V. Referentie: 9S5637 / R0001 / 900642/DenB