



Bronnen van diffuse nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater

Evaluatie Meststoffenwet 2012: deelrapport ex post

P. Groenendijk, H.M. Mulder, R.F.A. Hendriks en F.J.E. van der Bolt



ALTERRA
WAGENINGEN UR

Bronnen van diffuse nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater

Evaluatie Meststoffenwet 2012: deelrapport ex post

P. Groenendijk, H.M. Mulder, R.F.A. Hendriks en F.J.E. van der Bolt

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van BO-05-004 , Mineralen en Milieu, Thema KRW en maatregelen. Dit onderzoek dient als achtergrondstudie voor de Evaluatie van de Mestwetgeving 2012, Beleidsondersteunend onderzoek Ministerie van EL&I. Projectcode: BO-12-07-005.

Alterra Wageningen UR
Wageningen, januari 2014

Alterra-rapport 2328
ISSN 1566-7197

Groenendijk, P., H.M. Mulder, R.F.A. Hendriks en F.J.E. van der Bolt, 2014. *Bronnen van diffuse nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater; Evaluatie Meststoffenwet 2012: deelrapport ex post*. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2328. 38 blz.; 18 fig.; 5 tab.; 17 ref.

De ex-post evaluatie van de Mestwetgeving 2012 bevat informatie over de bijdrage van verschillende bronnen aan de eutrofiering van het regionale oppervlaktewater. Dit rapport beschrijft de nieuwe methodiek waarmee de bijdragen vanuit landbouwpercelen zijn geschat. De methode vervangt de zgn. uitsluitmethode die in eerdere studies naar de herkomst van stikstof en fosfaat in het oppervlaktewater is toegepast en is gebaseerd op de bepaling van de coëfficiënten van een lineair, statisch metamodel aan de hand van de resultaten van een gevoeligheidsanalyse van het STONE-model. Hoewel de nieuwe methode als een verbetering van voorgaande methoden beschouwd wordt, is ook geconstateerd dat de methode nog niet robuust is voor het bepalen van de bijdrage van mestoverschotten in het verleden. Aanbevolen wordt om in een toekomstige versies van het metamodel voor bronnenanalyses aandacht te besteden aan zowel de diagnose van de huidige herkomst van stikstof en fosfaat in het oppervlaktewater, als de prognose van de maximaal haalbare reductie van de stikstof- en fosforuitspoeling uit landbouwpercelen door vermindering van de mestgiften.

Trefwoorden: bronnen, diffuse belasting, eutrofiering, fosfaatuitspoeling, stikstofuitspoeling, stuurbaarheid diffuse bronnen

Dit rapport is gratis te downloaden van www.wageningenUR.nl/alterra (ga naar 'Alterra-rapporten' in de grijze balk onderaan). Alterra Wageningen UR verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2014 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E info.alterra@wur.nl, www.wageningenUR.nl/alterra. Alterra is onderdeel van Wageningen UR (University & Research centre).

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

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

Inhoud

	Woord vooraf	5
	Samenvatting	7
1	Inleiding	9
2	Schattingsmethoden	13
	2.1 Diffuse bronnen	13
	2.2 Overzicht van methoden	14
	2.3 Afleiding van een statisch lineair metamodel	16
	2.4 Aannames voor berekeningen met STONE	19
3	Bronnen van uit- en afspoeling op landelijke schaal	20
	3.1 Herkomst van uit- en afspoeling	20
	3.1.1 Onderscheid naar grondsoorten	20
	3.1.2 Onderscheid naar beleidsgebieden	21
	3.1.3 Onderscheid naar landgebruik	22
	3.1.4 Herkomst van nutriënten op nationale schaal	23
	3.1.5 Ruimtelijke variatie in de herkomst	23
	3.2 Mogelijkheid voor sturing van bronnen	24
4	Mogelijkheden en beperkingen van de methode	27
	4.1 Invloed rekenperiode	27
	4.2 Schatting invloed historische bemesting	28
	4.2.1 Methode	28
	4.2.2 Resultaten	29
	4.3 Bronnen en routes	29
	4.4 Vergelijking met andere studies	30
	4.5 Perspectieven van bronnenanalyses	32
5	Conclusies en aanbevelingen	34
	Literatuur	35

Woord vooraf

Voor de ex-post Evaluatie van het mestbeleid in 2012 is de herkomst van stikstof en fosfor in het water dat vanuit de bodem het oppervlaktewater bereikt in beeld gebracht met numerieke methoden. In het rapport wordt ingegaan op de definitie van 'bronnenanalyse' en het doel dat men er mee voor ogen kan hebben.

Het onderzoek dat in dit rapport is beschreven is uitgevoerd door de auteurs. De informatie is gebruikt in rapport 2318 waarin de ontwikkeling van de bodem- en waterkwaliteit wordt beschreven in het kader van de Evaluatie Meststoffenwet 2012 (Van der Bolt en Schoumans, 2012).

Juni 2013

De auteurs

Samenvatting

Voor de verschillende informatiebehoefte wordt op een verschillende manier onderscheid gemaakt in bronnen. De definitie van bronnen hangt af van de ruimtelijke schaal en het doel dat met een bronnenanalyse wordt nagestreefd. Voor de toerekening naar oorzaken (diagnose) van eutrofiering van oppervlaktewater is een onderscheid tussen bemesting en bodem relevant, voor een inzicht in de effecten van mogelijke maatregelen (prognose) kan onderscheid gemaakt worden tussen 'stuurbare' bronnen en 'niet-stuurbare' bronnen.

Voor de bepaling van de herkomst van stikstof en fosfor zijn in het verleden meerdere studies uitgevoerd. Deze studies zijn uitgevoerd in de verwachting dat verbetering mogelijk is door 1) gebruik van nieuwe en actuele gegevens over bemesting en kwelwaterconcentraties en door 2) een verfijning en verbetering van de methodiek. Met deze studie zijn vier doelen nagestreefd:

1. *Het ontwikkelen en verbeteren van een methode voor de kwantificering van bronnen voor toepassing in de Evaluatie van het Mestbeleid.*

Een nieuwe methode voor het schatten van bronnen is opgesteld waarin door lineaire regressie van de resultaten van een lokale gevoeligheidsanalyse van het STONE-model de coëfficiënten zijn te schatten van een statisch en lineair model. Dit is een verbetering ten opzichte van de eerder toegepaste uitsluitmethode, omdat hiervoor geen rekenruns gemaakt hoeven te worden die buiten het werkingsgebied vallen van het STONE-model. Geconstateerd is dat de methode nog niet robuust is omdat 1) voor individuele STONE-plots de resultaten soms niet plausibel zijn, 2) de verschillende methoden voor het bepalen van de bijdrage van mestoverschotten in het verleden aan de huidige stikstof- en fosforuitspoeling leiden tot verschillende resultaten en omdat 3) bij de schatting van bronbijdragen een extrapolatie van het metamodel wordt toegepast buiten het werkingsgebied van het metamodel.

2. *Het kwantificeren van de relatieve bijdrage van verschillende bronnen aan de belasting van oppervlaktewater in 2010.*

Landelijk gemiddeld draagt de bemesting voor resp. 12.4 en 0.82 kg ha⁻¹ jr⁻¹ bij aan de stikstof- en fosforbelasting van het oppervlaktewater, draagt natte en droge depositie voor 2.1 kg ha⁻¹ jr⁻¹ bij aan de stikstofuitspoeling. De som van kwel en de infiltratie uit het oppervlaktewater heeft een heel geringe bijdrage van respectievelijk 0.7 en 0.1 kg ha⁻¹ jr⁻¹ aan de stikstof- en fosforbelasting van het oppervlaktewater en de vermindering van de voorraad in de bodem draagt respectievelijk 5.9 en 0.58 kg ha⁻¹ jr⁻¹ bij aan de stikstof- en fosforuitspoeling naar oppervlaktewater. Bemesting, depositie, kwel+infiltratie en de levering uit de bodem dragen voor respectievelijk 58%; 10%; 4% en 28% bij aan de stikstofbelasting van het oppervlaktewater terwijl deze bronnen voor respectievelijk 55%; 0%; 7% en 38% bijdragen aan de fosforbelasting van oppervlaktewater.

3. *Het kwantificeren van de bronnen voor verschillende gewas- en bodemcombinaties en voor zover relevant ook voor droge en natte omstandigheden en voor regio's (Noordelijk, Centraal, Zuidelijk zandgebied).*

Gebruikmakend van de kenmerken van de verschillende STONE-plots zijn de bronnen voor verschillende gewassen, grondsoorten en regio's berekend. Het Centrale en het Zuidwestelijke zeeleigebied hebben de hoogste stikstofbelasting van het oppervlaktewater berekend, gevolgd door de veengebieden. De bemesting draagt in deze gebieden voor resp. 62, 62 en 64% bij aan de stikstofuitspoeling. De hoogste fosforbelasting van het oppervlaktewater wordt berekend voor de veengebieden, gevolgd door het Centrale en het Zuid-westelijke zeeleigebied. In de veengebieden draagt de bemesting voor 30% bij aan de fosforvrucht naar het oppervlaktewater en de levering uit de bodem voor 63%. Van de totale fosforuitspoeling in deze gebieden is 5% afkomstig van het water dat in de zomer vanuit sloten in de bodem is geïnfiltrerd.

4. *Het verschaffen van inzicht in effectieve sturingsmogelijkheden voor het realiseren van grondwater- en oppervlaktewaterkwaliteitsdoelen met het landelijke mestbeleid.*

De sturingsmogelijkheid van mestniveaus is nagegaan door de vergelijking van de resultaten van rekenvarianten voor de Evaluatie Mestwetgeving 2012. Hiermee is het begrip 'sturingsmogelijkheid' beperkt tot wat beleidsmedewerkers aangeven als een maximale sturing vanuit politiek perspectief. De maximale reductie van stikstof- en fosforuitspoeling die op lange termijn vanuit de fysische en chemische kenmerken van het landbouwsysteem en de bodem mogelijk is, is niet bekeken. Op de korte termijn zijn op de zandgronden de grootste reducties haalbaar. Een vermindering van het stikstofoverschot met 10 kg ha^{-1} op deze gronden leidt voor resp. grasland en mais+akkerbouw tot een vermindering van de stikstofuitspoeling met 1.7 en 2.1 kg ha^{-1} . Voor klei- en veengronden is de respons van een vermindering van het stikstofoverschot veel kleiner. Een vermindering van het stikstofoverschot met 10 kg ha^{-1} op deze gronden leidt voor resp. grasland en mais+akkerbouw tot een vermindering van de stikstofuitspoeling met 0.13 en 0.60 kg ha^{-1} . Voor fosfaat wordt berekend dat een vermindering van het fosfaatoverschot op de korte termijn leidt tot een vermindering van slechts 2% van de overschotreductie.

Aanbevolen wordt om de lotgevallen van stikstof en fosfor uit verschillende bronnen te simuleren met gelabelde stikstof en fosfor waarbij het label correspondeert met een bepaalde bron. Echter, deze methode is rekenintensief en vergt nog een nadere uitwerking van de software van het ANIMO-model. Daarnaast wordt aanbevolen om een meta-model te ontwikkelen voor zowel de diagnose als de prognose van de stikstof- en fosforuitspoeling naar oppervlaktewater, afkomstig uit verschillende bronnen, dat de verschillende relaties tussen bronnen en verdwijntermen op consistente wijze beschrijft. Voor de prognose zijn haalbare stikstof- en fosforuitspoelingsreducties door vermindering van stikstof- en fosforoverschotten van belang in verband de afweging van kosteneffectieve maatregelen voor de realisatie van KRW-doelen.

1 Inleiding

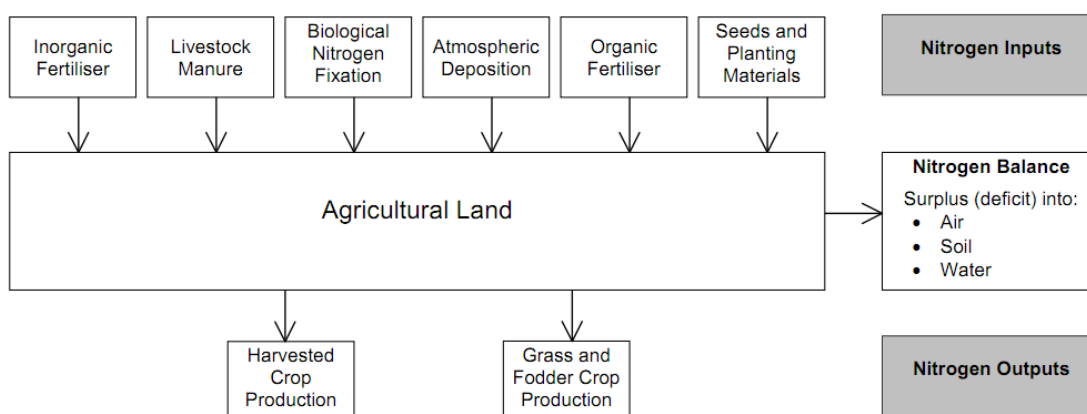
In de discussies over de herkomst van stikstof en fosfor in het oppervlaktewater, en de rol die landbouw daarin speelt, wordt onderscheid gemaakt tussen bronnen en routes. Het begrip 'bronnenanalyse' is in de afgelopen jaren op verschillende manieren uitgewerkt (Hendriks *et al.*, 2002; Van der Bolt *et al.*, 2007, Planbureau voor de Leefomgeving, 2008). 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).

Daarnaast 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.

Voor de verschillende informatiebehoeften wordt op andere manieren onderscheid gemaakt in bronnen. De definities voor bronnen hangen daarbij van systeemgrenzen af. Soms wordt 'landbouw' als bron gezien. Ook het begrip 'landbouw' moet duidelijker gedefinieerd worden om het in een bronnenanalyse hanteerbaar te kunnen maken. De definitie hangt af van de ruimtelijke schaal en het doel dat met de bronnenanalyse wordt nagestreefd. Begrippen die hiermee samenhangen zijn:

- Mestoverschot:** de jaarlijkse nationale mestproductie minus de (wettelijke/potentiële dan wel actuele) gebruikruimte op land minus de afzet buiten de Nederlandse landbouwsector (verwerking en afzet buitenland), meestal uitgedrukt in miljoenen kg stikstof of fosfor per jaar.
- Bedrijfsoverschot:** de totale jaarlijkse aanvoer aan nutriënten naar het bedrijf (kunstmest, aangevoerde dierlijke mest, veevoer, vlinderbloemigen e.d.) minus de afvoer aan nutriënten van het bedrijf (melk, vlees, oogst). Let wel, invang van vlinderbloemigen werden wel opgenomen (klaver in grasland) maar depositie en netto mineralisatie niet (bron MINAS: Schröder en Neeteson, 2008).
- Bodemoverschot:** de totale jaarlijkse aanvoer aan nutriënten op perceelsniveau (kunstmest, drijfmest, groenbemesters, vlinderbloemigen, depositie) minus de afvoer (oogst); zie de definitie van de OECD (2001) en de figuur hieronder.



Source: OECD (2001), *Environmental Indicators for Agriculture — Volume 3: Methods and Results*, Paris, France.

Figuur 1 Termen van de bodembalans voor stikstof.

In het mineraalaangiftesysteem MINAS (Schröder en Neeteson, 2008) dat tot en met 2005 van kracht was, werden verliesnormen gehanteerd als indicator voor het overschot op bedrijfsniveau. Vanaf 2006 is het nieuwe mestbeleid van kracht waarin gebruiksnormen gelden voor gewassen op verschillende grondsoorten. De sturing van milieuemissies door menselijk handelen, vindt sinds 2006 dus plaats via mestgiften en niet via nutriëntenverliezen. Voor de bronnenanalyse wordt daarom de bemesting als bron gedefinieerd en niet het nutriëntenverlies dat het resultaat is van bemesting en gewasopname.

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 en naijlingseffecten van historische mestgiften. De informatie uit een bronnenanalyse kan worden gebruikt voor het opstellen van maatregelpakketten (in de EMW scenario's genoemd) waarvan men verwacht dat ze effect zullen sorteren, maar geeft geen informatie over het te bereiken effect. Voor de effectbepaling moet een scenario met modellen worden doorgerekend. Aan het einde van een scenarioperiode (bijvoorbeeld in 2015 of 2027 als zichtjaar voor de KaderRichtlijn Water) kan door de ingezette maatregelen de onderlinge verhoudingen in de bronnen gewijzigd zijn. Het kan interessant (korte termijn) dan wel noodzakelijk (langere termijn) zijn om voor een dergelijk zichtjaar de bronnenanalyse te herhalen om de verschuivingen ten opzichte van de referentiesituatie te bepalen.

Voor de toerekening naar oorzaken is onderscheiden van bemesting en bodem relevant, voor inzicht in de effecten van mogelijke maatregelen is het nuttig onderscheid te maken tussen 'stuurbare' bronnen en 'niet-stuurbare' bronnen. Verder speelt de ruimtelijke schaal een belangrijke rol.

Voor het gewas/bodemsysteem op perceelschaal kunnen de volgende bronnen worden onderscheiden, bij de aanname dat de waterhuishouding en het landgebruik niet veranderen (Tabel 1).

Tabel 1

Stuurbare en niet-stuurbare bronnen van het gewas/bodemsysteem op perceelschaal.

Anno 2011, niet stuurbare voorraad stikstof en fosfor	Anno 2011, stuurbare stikstof- en fosforbronnen
Natuurlijk aanwezig in bodem en sedimenten	
Opgebouwd door historische bemesting	Huidige/toekomstige giften dierlijke mest
	Huidige/toekomstige giften kunstmest
Door historische depositie opgebouwd	Huidige/toekomstige depositie
Door historische aanvoer nutriëntrijk geïnfiltrerd oppervlaktewater	Huidige/toekomstige aanvoer nutriëntrijk infiltrerend oppervlaktewater
Aanvoer door kwel	

Aanvoer door kwel wordt hier gedefinieerd als de invloed van kwel tijdens de simulatieperiode. De invloed van kwel op het tot stand komen van de voorraden in bodem en sedimenten wordt gezien als een effect van de route.

Er is een methodische samenhang van bronnenanalyses met lotgevallenstudies, het zijn in essentie twee kanten van dezelfde medaille. In een lotgevallenstudie staat de vraag centraal hoe de via mest 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 oppervlaktewater gemeten hoeveelheden stikstof en fosfor vandaan komen en wat de bijdrage van bemesten is. Een lotgevallenstudie kijkt dus vooruit, een bronnenanalyse kijkt terug:

Het lot is de toestand en de plek in het systeem waarin een geëmitteerde stof na een (lange) periode terecht komt.'

'De herkomst is de mate waarin een bron over een (lange) voorafgaande periode beschouwd bijdraagt aan de uitspoeling.'

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.

Kwel en depositie kunnen afhankelijk van de gehanteerde systeemgrenzen zowel als bron of als route zijn gedefinieerd. De uitstoot van stikstofoxiden door de bronnen industrie, huishoudens en verkeer kan worden getransporteerd via de route atmosfeer, maar depositie uit de atmosfeer kan ook beschouwd worden als een bron van stikstof voor het gewas-/bodem-systeem. Het is daarom van belang het systeem, de bronnen en routes goed te specificeren.

'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. Een andere indeling in bronnen is die in puntbronnen (bijvoorbeeld erfafspoeling), lijnbronnen (bijvoorbeeld mee-mesten) of diffuse bronnen (bijvoorbeeld depositie en bemesting). Vooral diffuse bronnen kunnen zowel direct als indirect in het oppervlaktewater terecht komen, denk aan het meemesten van sloten en de depositie op sloten naast de mestgiften en de depositie op het landoppervlak/perceel. 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.

Tijdens het transport van het gewas/bodemsysteem naar het oppervlaktewater kunnen verschillende fysische, chemische en biologische vastleggings- en/of omzettingsprocessen optreden die bepalen hoeveel stikstof en fosfor uiteindelijk in het oppervlaktewater terecht komt. Het is het noodzakelijk dit systeem goed te kennen en goed te kunnen kwantificeren.

Omdat de verschillende emissiebronnen op verschillende plekken in het bodem-water-plant systeem aangrijpen en de emissies verschillende routes met andere omzet- en vastlegprocessen volgen, 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.

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.

In het voorliggende rapport wordt een nieuwe methode voor bronnenanalyse beschreven. Het doel van het onderzoek is:

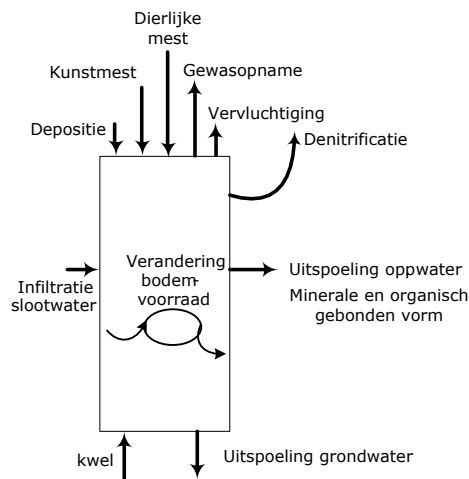
1. Het ontwikkelen en verbeteren van een methode voor de kwantificering van bronnen voor toepassing in de evaluatie van het Mestbeleid 2012.
2. Het kwantificeren van de relatieve bijdrage van verschillende bronnen aan de belasting van het oppervlaktewater in 2010.
3. Het kwantificeren van de bijdrage van de bronnen voor verschillende gewas- en bodemcombinaties en voor zover relevant ook voor droge en natte omstandigheden en voor regio's (Noordelijk, Centraal en Zuidelijk zandgebied).
4. Het verschaffen van inzicht in effectieve sturingsmogelijkheden voor het realiseren van grondwater- en oppervlaktewaterkwaliteitsdoelen als onderbouwing voor het landelijke mestbeleid.

In navolging van Van der Bolt *et al.* (2007) en Van Boekel *et al.* (2009) is het STONE model gebruikt voor de bronnenanalyse. STONE is het standaardmodel waarin de relaties tussen bemesting, grondgebruik en de uit- en afspoeling naar grond- en oppervlaktewater voor toepassing op landelijke schaal zijn beschreven. De afleiding van de methode voor bronnenanalyse wordt beschreven in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 geeft de relatieve verdeling van de bronnen voor verschillende gewas- en bodemcombinaties in 2010. In hoofdstuk 4 worden de resultaten vergeleken met informatie in andere rapporten en publicaties en wordt de toepasbaarheid van de resultaten besproken. In hoofdstuk 5 zijn de conclusies geformuleerd en het rapport besluit met hoofdstuk 6 waarin aanbevelingen worden gedaan.

2 Schattingsmethoden

2.1 Diffuse bronnen

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 milieucompartment, in ons geval de bodem, opgesteld (Figuur 2).



Figuur 2 Schematische voorstelling van de termen van nutriëntenbalansen.

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 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

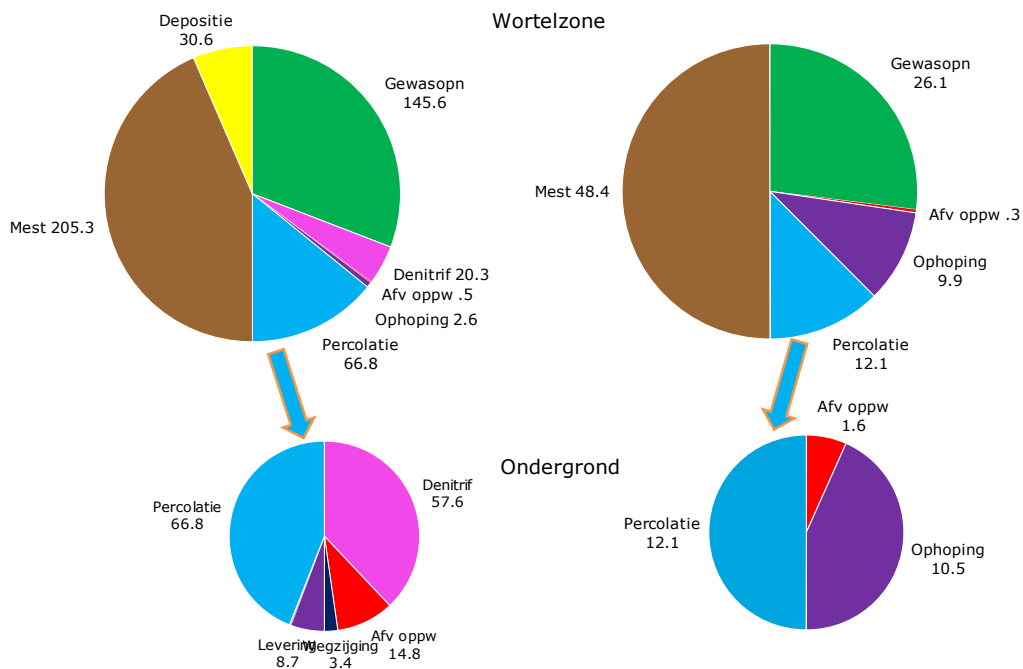
in de ondergrond. Voor het gehele profiel berekend vindt er dan ophoping plaats (bodemvoorraad als verdwijnterm), terwijl desondanks de bodem toch bijdraagt aan de belasting van oppervlaktewater. Een schattingsmethode die hiermee rekening houdt en die inzicht geeft in de onderlinge relaties tussen bouwvoor en ondergrond is sterk gewenst.

2.2 Overzicht van methoden

Met rekenmodellen voor emissies naar grond- en oppervlaktewater kan de relatieve bijdrage van verschillende bronnen op verschillende manieren worden gekwantificeerd:

1. Kwantificeren 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 uitspoeling naar het oppervlaktewater in het totaal van de uitgaande nutriëntenstromen. Figuur 3 is een voorbeeld van een dergelijk diagram voor maisteelt. De gemiddelde bodembalans is hierin onderverdeeld in de wortelzone en de ondergrond.



Figuur 3 N- en fosfor-balansen (kg ha⁻¹ jr⁻¹) van de bodem voor maïs in het Schuitembeekgebied voor de periode 2001-2015. Links is de stikstof-balans weergegeven en rechts de fosfor-balans.

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⁻¹ vs 0.5 kg ha⁻¹ uit de wortelzone). In dit geval heeft denitrificatie bijna een viermaal zo belangrijk aandeel in de stikstof-balans dan stikstofuitspoeling naar het oppervlaktewater, zowel in de wortelzone als in de ondergrond. Van de 12.1 kg ha⁻¹ fosfor die jaarlijks vanuit de wortelzone uitspoelt naar de ondergrond wordt 10.5 kg ha⁻¹ gebonden aan de bodem en komt 1.6 kg ha⁻¹ tot uitspoeling, van de 48.3 kg ha⁻¹ die via mest aan de wortelzone wordt toegevoegd spoelt maar 0.3 kg ha⁻¹ 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. Simulatie van isotopen.

Een simulatie waarin voorraden en stromen van stikstof en fosfor in het model worden opgesplitst in delen die corresponderen met de bron vanuit waaruit stikstof en fosfor afkomstig is (virtuele isotopen). Deze methode met virtuele isotopen vraagt i) aanpassingen in de modelcode, is ii) rekenintensief en is iii) niet helemaal recht-toe-recht-aan voor de verdeling van een stof in pools (voorraden fosfor met andere sorptie-eigenschappen) die onderhevig zijn aan niet-lineaire omzettings- en accumulatieprocessen (bijvoorbeeld fosfaat). De organische stof- en stikstof-omzettingsprocessen zijn in het ANIMO-model beschreven als een lineair reagerend deelsysteem, maar de binding van fosfaat aan de bodem gedraagt zich niet-lineair. Voor de onderverdeling van fosfaat-pools moeten daarom additionele aannames worden gedaan die van invloed kunnen zijn op het resultaat. Een voordeel van deze methode is dat geen ingrepen in het systeem, zoals minder mest, lagere kwelconcentraties, etc. nodig zijn waardoor geen 'ruis' als gevolg van deze verstoring optreedt. Ondanks deze noodzakelijk aannames lijkt deze methode verreweg de beste methode te zijn om de bijdrage van bronnen te kwantificeren. Deze werkwijze is voor zover bekend nog niet toegepast.

3. Gevoeligheidsanalyse.

Een gevoeligheidsanalyse voor de verschillende bronnen door een verandering van de verhouding in uitspoeling van stikstof en fosfor te relateren 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 het percentage verandering van de *load* uit bij 1% 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 de bron kan worden gevarieerd is kleiner naarmate het systeem sterker niet-lineair reageert. Gezorgd moet worden dat binnen het traject ΔS_i de reactie van ΔL_i lineair is.

Als de term 'verandering bodemvoorraad' negatief is, fungeert de bodem als bron. S_{bodem} is dan positief. Echter, als de term 'verandering bodemvoorraad' positief is, vormt hij een sink en is S_{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 binnen het bodemprofiel kunnen verschillen is het noodzakelijk de bodem in compartimenten als bijvoorbeeld de wortelzone en de ondergrond op te delen om per compartiment de elasticiteitscoëfficiënten en de bijdrage van de bronnen te berekenen. Risico van deze methode 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.

4. Simulatie met uitsluiting van bronnen.

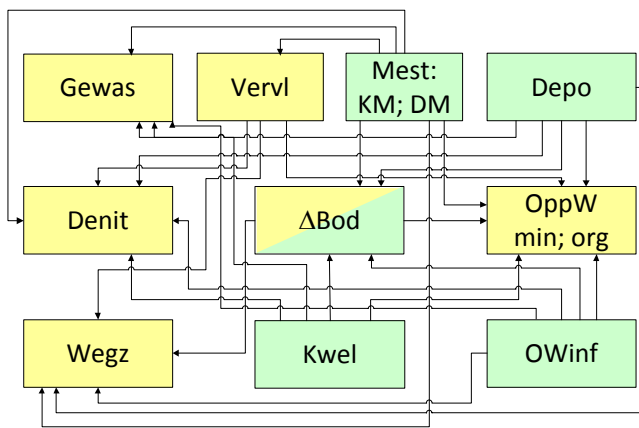
Omdat bij uitsluiting van bronnen de afname van de bron gelijk is aan de bron zelf ($\Delta L_i / L = -1$), is dit als een extreme variant van methode 3 te beschouwen. De uitsluiting van bronnen mag alleen worden toegepast i) als het systeem lineair reageert op de verandering van bronnen; ii) als de 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 STONE wordt gebruik gemaakt van de QUADMOD- 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.*, in 2007) een verandering van landgebruik impliceren: landbouw wordt omgezet naar natuur.

5. Afleiden metamodel.

Aanvullend op 3) wordt een metamodel opgesteld waarin de uitgaande termen van de stikstof- en de P-balans worden gerelateerd aan de ingaande termen met behulp van lineaire (regressie-) vergelijkingen. Door deze werkwijze wordt het risico van methode 3 geëlimineerd, methode 5 is robuuster en is daarom voor deze studie geselecteerd. De uitwerking van deze methode is in par. 2.3 gegeven.

2.3 Afleiding van een statisch lineair metamodel

Voor het schatten van de procentuele bijdrage van bronnen aan de belasting van oppervlaktewater maken we gebruik van een vereenvoudigde, lineaire statische benadering waarin de procesconstanten zijn af te leiden uit de resultaten van het gedetailleerde procesmodel ANIMO. 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 4).



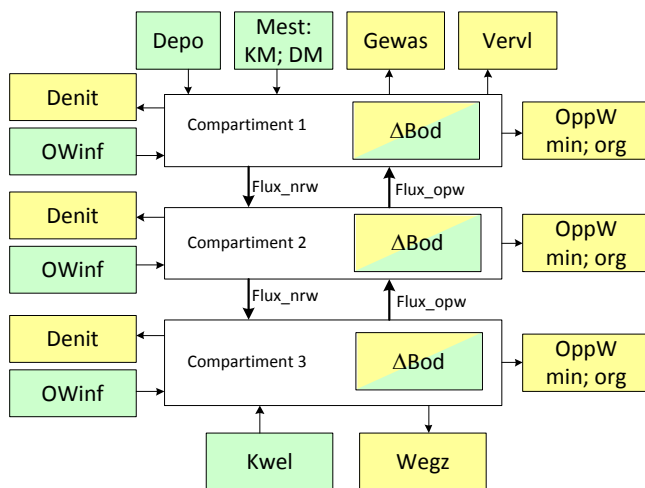
Figuur 4 Statisch, lineair metamodel van ANIMO, waarin of kwel of wegzijging optreedt. Groen = bronsterm; geel = putterm.

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 (Δ Bod). Deze term bodemleverantie is eigenlijk een restterm waarin enkele na-ijlings-effecten samen tot een verandering leiden van de bodemvoorraad:

- De afname of toename van 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 bronstermen 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 STONE2.4 is de gewasopname in de periode 2001- 2010 niet constant omdat rekening wordt gehouden met o.a. weerseffecten. 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 (ΔBod) 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.

Zoals is aangeduid in par. 2.1 is binnen het bodemprofiel een onderscheid in diepte-compartimenten gewenst omdat zich situaties kunnen voordoen waarin de ophopingsnelheid 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 5).



Figuur 5 Statisch, lineair metamodel van ANIMO met drie bodemlagen.

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

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

$$\text{OppW}_1 = a_{1,1}(KM + DM) + a_{1,2}\text{Depo} + a_{1,3}\text{Flux}_{opw_1} + a_{1,4}\text{OW}_{inf,1} + a_{1,5}(\text{BoL}_1 | > 0) \quad (2)$$

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.

Daarnaast wordt de neerwaartse uitspoeling uit compartiment 1 ($Flux_{nrw_1}$) ook als lineaire vergelijking geformuleerd:

$$\text{Flux}_{nrw_1} = b_{1,1}(KM + DM) + b_{1,2}\text{Depo} + b_{1,4}\text{OW}_{inf,1} + b_{1,5}(\text{BoL}_1 | > 0) \quad (3)$$

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

$$\text{Flux}_{opw_1} = c_{2,3}\text{Flux}_{opw_2} + c_{2,4}\text{OW}_{inf,2} + c_{2,5}(\text{BoL}_2 | > 0) \quad (4)$$

De factoren in deze vergelijkingen zijn te schatten door een multiple regressie met de resultaten van een lokale gevoeligheidsanalyse. Analoog aan de bovenstaande formules worden ook vergelijkingen opgesteld voor compartiment 2 en 3:

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

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:

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

Deze vergelijking is te herschrijven als:

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

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 niet stabiel 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':

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

De coëfficiënten in Vgl. 7 zijn te herleiden door:

$$f_i = f_i^* \frac{OppW}{OppW + f_1^*Gewasopname}
 \tag{9}$$

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 periode 2001-2010 waarvoor balansen worden opgesteld. Om de invloed van historische mestoverschotten op de belasting van het oppervlaktewater te schatten is een vergelijking opgesteld waarin het de verandering van de bodemvoorraad is gerelateerd aan het totale geaccumuleerde overschot over de periode 1941 - 2000 en een restterm.

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

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.

2.4 Aannames voor berekeningen met STONE

Zoals aangegeven in par. 2.3 worden de regressiecoëfficiënten berekend uit de resultaten van een lokale gevoeligheidsanalyse van het STONE-model. De mestoverschotten en de daaruit voortvloeiende oplading van de bodem van de STONE-plots t/m het jaar 2000 is gesimuleerd door het STONE-model te runnen voor de periode 1941 - 2000. Vanaf 2001 t/m 2010 is het model gerund met een reeks van 100 verschillende instelwaarden voor de bronnen. De instelwaarden zijn berekend door de 'bron' van de referentie-run te vermenigvuldigen met een factor. De factor per bron is geloot met behulp van Latin Hypercube sampling. Per bron is de minimum- en maximumwaarde ingesteld van de range waarbinnen een vermenigvuldigingsfactor kan worden getrokken. Voor de mestgift kon de bronsterkte variëren tussen 95 en 105% van de referentie-run, voor de stikstof-concentraties in regenwater en droge depositie kon de bronsterkte tussen 50 en 150% variëren en voor kwelwaterconcentraties en concentraties in het oppervlaktewater kon de bronsterkte tussen 0 en 500% variëren t.o.v. de referentiewaarde. Tussen de factoren van de verschillende bronnen is geen correlatie verondersteld. De ranges tussen de bronnen verschillen omdat daarmee de gerealiseerde veranderingen qua orde grootte vergelijkbaar zijn.

Per STONE-plot is een controle uitgevoerd op het eventueel optreden van balansfouten (als gevolg van de rekennauwkeurigheid in dit traject met minimale veranderingen). Als een plot in één van de 100 runs een balansfoutje opleverde is de plot van verdere deelname aan de analyse uitgesloten. Op basis van deze strenge controle zijn 27 van de 6405 plots uitgesloten.

Na afronding van de STONE-berekeningen is per plot een regressie uitgevoerd voor de afleiding van de in Par. 2.3 genoemde coëfficiënten. Het resultaat is de verdeling van de stikstof- en fosforbelasting van oppervlaktewater van de plot aan de genoemde bronnen. Vervolgens zijn aggregaties gemaakt van de verschillende bron-bijdragen door deze areaal-gewogen te middelen.

Het aandeel van de historische overschotten is bepaald met een reeks aanvullende berekeningen waarin (alleen) de mest in de periode 1941 – 2000 is gevarieerd binnen een range van 95 – 105% van de instelwaarde met de verandering van de bodemvoorraad in de periode 2001 – 2010 als responsvariabele.

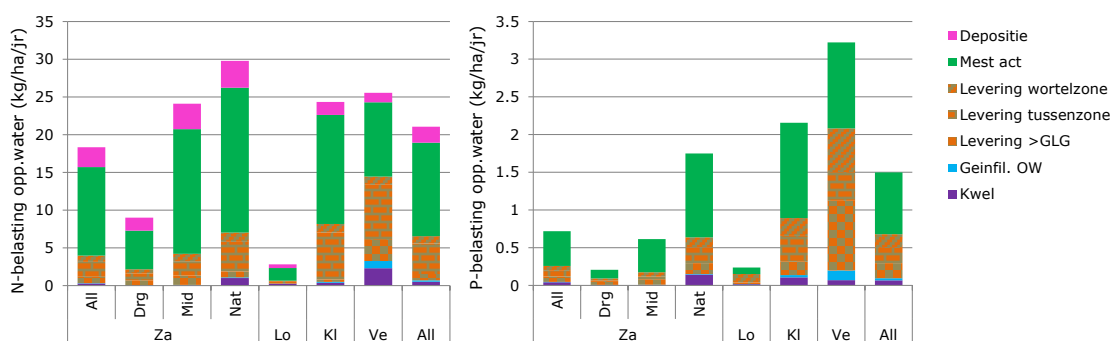
3 Bronnen van uit- en afspoeling op landelijke schaal

3.1 Herkomst van uit- en afspoeling

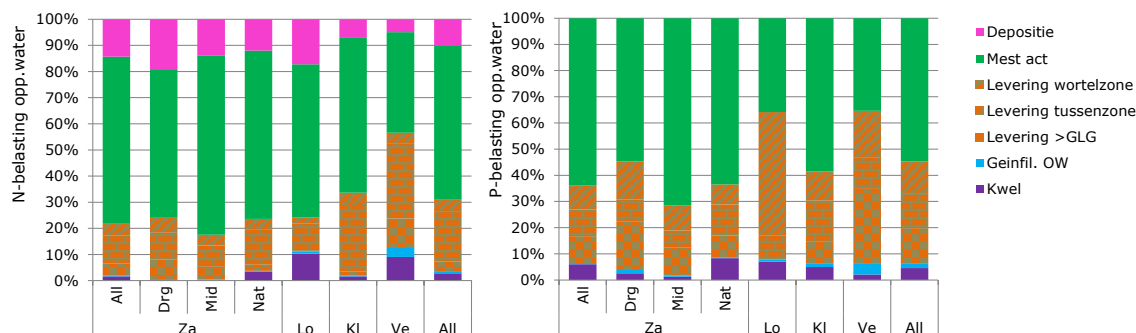
De herkomst van de afspoeling+uitspoeling naar het oppervlaktewater is berekend met de in hoofdstuk 2 afgeleide statisch lineair metamodel op basis van elasticiteiten. Deze methode is gedurende het project 'EMW2012 ex post' (Van der Bolt *et al.*, 2012) ontwikkeld en toegepast. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de data en de modelversie STONE2.4 die zijn gebruikt voor de 'EMW2012 ex ante' (Groenendijk *et al.*, 2012).

3.1.1 Onderscheid naar grondsoorten

De bijdrage van de bronnen aan de vracht is voor verschillende grondsoorten weergegeven in Figuur 6. De nalevering uit de bodemvoorraad is in Figuur 6 en 7 weergegeven voor de drie afzonderlijke bodemcompartimenten zoals aangeduid in Figuur 5. Om de getallen onderling te vergelijken is het nuttig om ook de procentuele verdeling van de bronnen te bestuderen (Figuur 7).



Figuur 6 Bijdrage van bronnen aan de stikstof- (links) en fosforbelasting (rechts) van het oppervlaktewater voor zandgrond (za), lössgrond (Lo), kleigrond (KI) en veengrond (Ve). Zand is onderverdeeld in droge (Drg), neutrale (Mid) en natte (Nat) gronden.



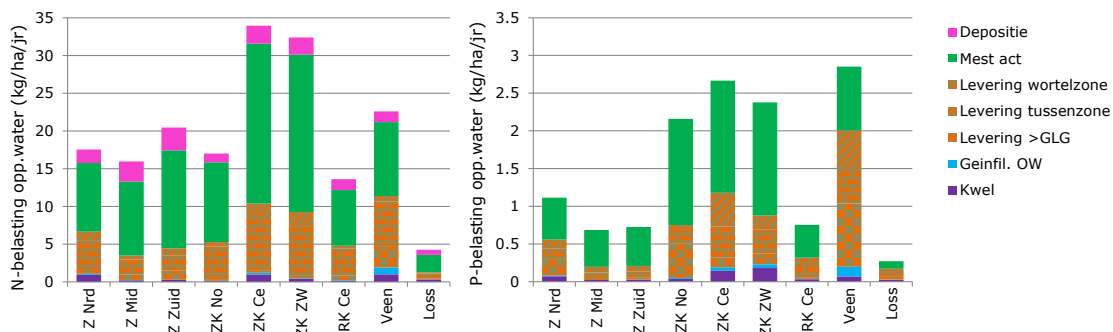
Figuur 7 Procentuele bijdrage van bronnen aan de stikstof- (links) en fosforbelasting (rechts) van het oppervlaktewater voor zandgrond (za), lössgrond (Lo), kleigrond (KI) en veengrond (Ve).

Landelijk gemiddeld is de stikstofbelasting van oppervlaktewater voor 10% afkomstig uit depositie, voor 58% uit de bemesting, voor 28% uit de uitputting van bodemvoorraden en voor 4% uit kwel + geïnfiltreerd oppervlaktewater. De fosforbelasting van oppervlaktewater is voor 55% afkomstig uit de bemesting, voor 38% afkomstig uit de uitputting van bodemvoorraden en voor 7% uit kwel en geïnfiltreerd oppervlaktewater. Van de verschillende hoofdgrondsoorten geven de natte zandgronden de grootste stikstofbelasting van oppervlaktewater en de veengronden de grootste fosfaatbelasting van oppervlaktewater. Het aandeel van de depositie in de stikstofvracht is 10 – 20% voor zand- en lössgronden, terwijl dit aandeel kleiner is voor de klei- en veengronden. In deze gronden is het aandeel van de levering uit bodemvoorraden groter dan in zandgronden.

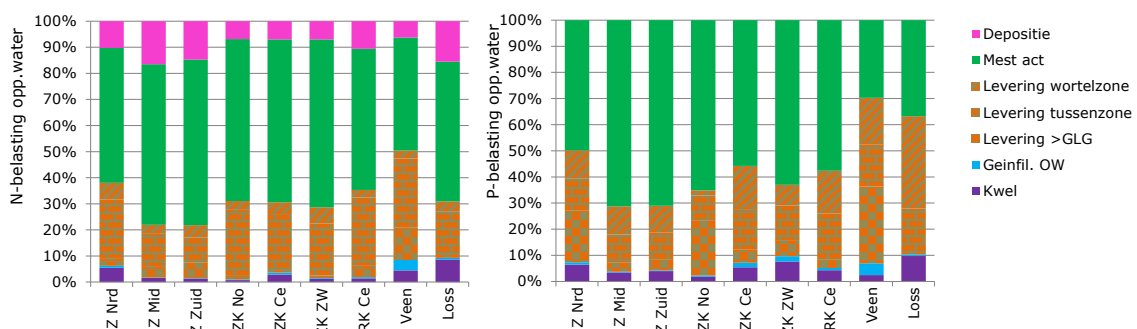
Voor zowel stikstof als voor fosfor is de levering uit de bodem afkomstig van de verschillende bodemcompartimenten. De resultaten voor de lössgronden zijn gebaseerd op een beperkt aantal plots, waaronder enkele plots in beekdalen waarin kwel wordt berekend. In absolute zin geven de lössgronden een geringe belasting van het oppervlaktewater.

3.1.2 Onderscheid naar beleidsgebieden

De bijdrage van de bronnen aan de vracht is weergegeven in Figuur 8 voor de in de EMW2012 gehanteerde beleidsgebieden (Van der Bolt *et al.*, 2012). De procentuele verdeling van de bronnen voor de beleidsgebieden is weergegeven in Figuur 9.



Figuur 8 Bijdrage van bronnen aan de stikstof- (links) en fosforbelasting (rechts) van het oppervlaktewater in de verschillende beleidsgebieden van de EMW2012.



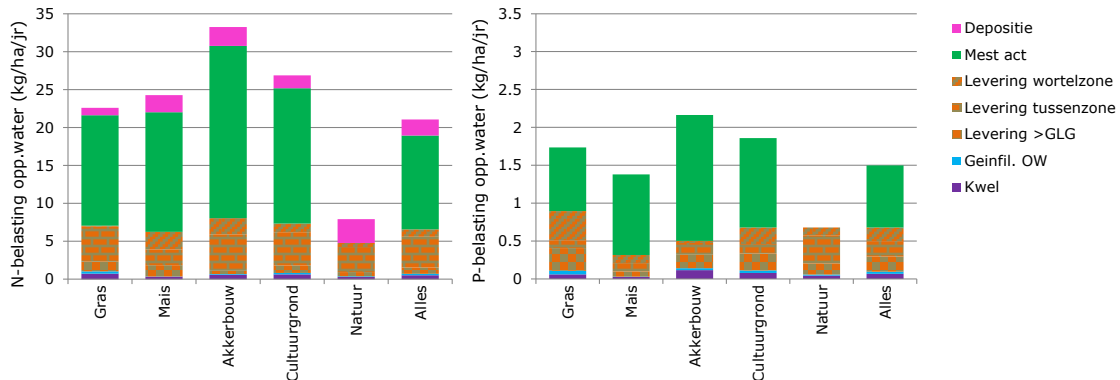
Figuur 9 Procentuele bijdrage van bronnen aan de stikstof- (links) en fosforbelasting (rechts) van het oppervlaktewater in de verschillende beleidsgebieden van de EMW2012.

Voor het Centrale en het Zuidwestelijke zeekleigebied wordt de hoogste stikstofbelasting van het oppervlaktewater berekend, gevolgd door de veengebieden. De bijdrage van de depositie aan de stikstofvracht is in deze gebieden 7%, terwijl de bemesting resp. 62, 62 en 64% bijdraagt. Van de stikstof-levering uit de bodem is de meeste stikstof afkomstig uit de laag tussen de wortelzone en het GLG-niveau. In de veengebieden draagt ook de bodem dieper dan de GLG nog substantieel bij aan de

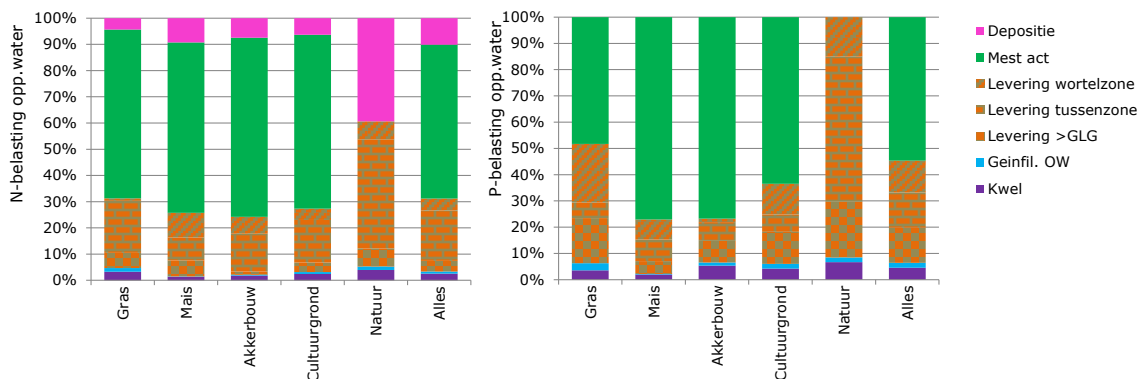
stikstofbelasting van het oppervlaktewater. De hoogste fosforbelasting van het oppervlaktewater wordt berekend voor de veengebieden, gevolgd door het Centrale en het Zuid-westelijke zeeleigebied. Voor de veengebieden wordt berekend dat de bemesting voor 30% bijdraagt aan de fosforvrucht naar het oppervlaktewater en de levering uit de bodem voor 63%. Van de totale fosforuitspoeling in deze gebieden is 5% afkomstig van het water dat in de zomer vanuit sloten in de bodem is geïnfiltreerd.

3.1.3 Onderscheid naar landgebruik

De bijdrage van de bronnen aan de vrucht is weergegeven in Figuur 10 voor de in STONE2.4 gehanteerde grondgebruiksvormen. In Figuur 11 is de procentuele verdeling van de bronnen weergegeven voor de verschillende grondgebruiksvormen.



Figuur 10 Bijdrage van bronnen aan de stikstof- (links) en fosforbelasting (rechts) van het oppervlaktewater onderverdeeld naar de verschillende grondgebruiksklassen in STONE.



Figuur 11 Procentuele bijdrage van bronnen aan de stikstof- (links) en fosforbelasting (rechts) van het oppervlaktewater onderverdeeld naar de verschillende grondgebruiksklassen in STONE.

Van de verschillende grondgebruiksvormen wordt voor akkerbouw de grootste stikstofbelasting van het oppervlaktewater berekend. Dit hangt samen met de regio's waarin akkerbouw sterker is vertegenwoordigd dan de andere grondgebruiksvormen. Akkerbouw neemt een groter aandeel in van het landbouwareaal in de zeeleigebieden en dit komt tot uiting in zowel de stikstofbelasting als de fosforbelasting van oppervlaktewater in die gebieden. Onder gras is de bijdrage van de depositie aan de stikstofbelasting van het oppervlaktewater kleiner dan onder mais, omdat gras een langer groeiseizoen heeft en meer van de atmosferische input kan benutten voor gewasopname. Berekend wordt dat de stikstofbelasting van het oppervlaktewater uit natuurgronden ca. 8 kg ha⁻¹ bedraagt (Tabel 2), waarvan 3 kg ha⁻¹ afkomstig is van de depositie. De fosforbelasting van het oppervlaktewater uit natuurgronden wordt berekend op 0,7 kg ha⁻¹ waarvan een klein deel afkomstig van kwelwater.

Tabel 2

Uit- en afspoeling van stikstof en fosfor naar het oppervlaktewater ($\text{kg ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$).

	Stikstof		Fosfor	
	Cultuurgrond	Natuurgrond	Cultuurgrond	Natuurgrond
Depositie	3.05	3.00		
Bemesten	17.43		1.34	
Afname voorraad in vegetatie		0.17		0.01
Levering bodem	5.62	4.50	0.43	0.63
Kwel	0.68	0.34	0.08	0.05
Infiltratie uit oppervlaktewater	0.20	0.11	0.04	0.01
Totaal	26.97	8.12	1.89	0.70

3.1.4 Herkomst van nutriënten op nationale schaal

In de schematisering van het STONE-instrumentarium (Kroon *et al.*, 2000) bestaat 69.4% van het totale oppervlak uit cultuurgrond en 30.6% uit natuurgrond. De bijdrage van de verschillende bronnen van cultuurgronden en van natuurgronden aan de belasting van het regionale oppervlaktewater kan worden berekend door ze areaal gewogen te middelen (Tabel 3).

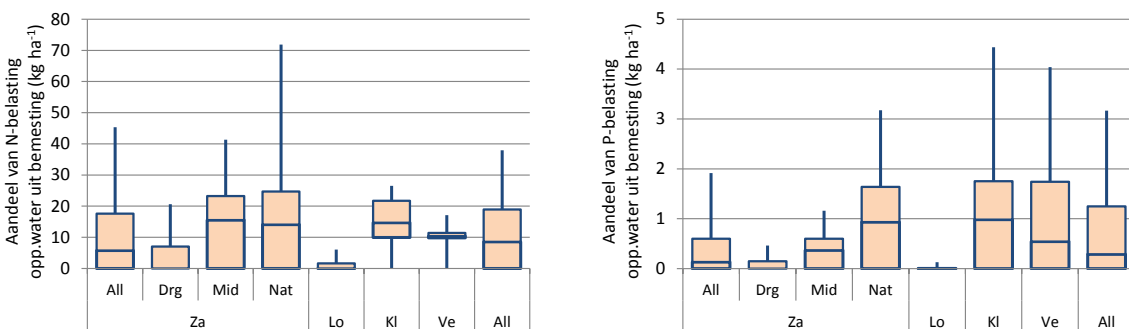
Tabel 3

Uit- en afspoeling van stikstof en fosfor naar het regionale oppervlaktewater.

	Stikstof		Fosfor	
	($\text{kg ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$)	(%)	($\text{kg ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$)	(%)
Depositie cultuurgrond	2.12	10		
Bemesten cultuurgrond	12.10	57	0.93	61
Levering bodem cultuurgrond	3.90	19	0.30	20
Kwel cultuurgrond	0.47	2	0.05	4
Infiltratie uit oppervlaktewater cultuurgrond	0.14	1	0.03	2
Natuurgrond	2.48	12	0.21	14
Totaal	21.21		1.52	

3.1.5 Ruimtelijke variatie in de herkomst

De ruimtelijke spreiding in de verschillende brontermen kan aanzienlijk zijn. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 12 door de box-plot figuren van het aandeel van de stikstof- en de fosforbemesting in de emissie naar het oppervlaktewater onderscheiden naar grondsoorten.



Figuur 12 Box-Whisker plots van de ruimtelijke spreiding van het aandeel van de bemesting in de stikstof- (links) en fosforbelasting (rechts) van het oppervlaktewater voor zandgrond (za), lössgrond (Lo), kleigrond (KI) en veengrond (Ve). Zand is onderverdeeld in droge (Drg), neutrale (Mid) en natte (Nat) gronden.

De onderkant en de bovenkant van de verticale lijnen in Figuur 12 duiden de 5- en 95-percentiel-waarde aan en de boxen begrenzen de 25-, 50- en 75-percentiel waarde van het bemestingsaandeel in de stikstof- en fosforbelasting. De ruimtelijke spreiding in het bemestingsaandeel is groot bij de stikstofbelasting voor de gemiddelde en de natte zandgronden en bij de fosforbelasting voor de natte zandgronden, de kleigronden en de veengronden. Voor de stikstofbelasting liggen de 25-percentiel-waarden van de zand- en lössgronden op nul en voor de fosforbelasting liggen de 25-percentiel-waarden van alle grondsoorten op nul. De regionale verschillen van het aandeel van bemesting in de stikstof- en fosforbelastingen van oppervlaktewater kunnen aanzienlijk zijn. Voor regio-specifieke schattingen van de bijdragen van de verschillende bronnen kan niet worden volstaan met de landelijk gemiddelde cijfers, maar zijn berekeningen nodig waarbij rekening wordt gehouden met de regio-specifieke eigenschappen van bodem, grondgebruik en hydrologie.

3.2 Mogelijkheid voor sturing van bronnen

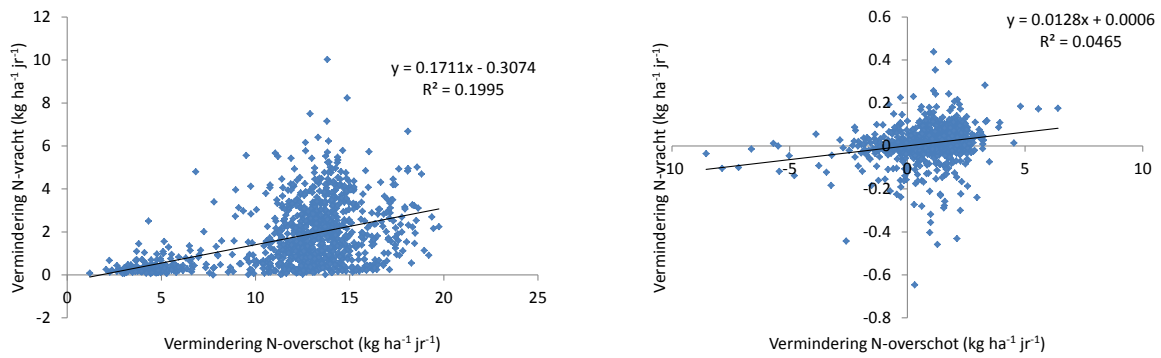
De in paragraaf 3.1 gepresenteerde bronnen hebben betrekking op de herkomst van stikstof en fosfaat in het oppervlaktewater. De verdeling geeft echter geen informatie over de mogelijkheid om de bronnen te beïnvloeden door maatregelen. Een aanzienlijk deel van de bron 'mest' is in het verleden in de bodem terecht gekomen. Fosfaat bindt zich sterk aan de bodem en is slechts voor een klein gedeelte mobiel en 'uitspoelbaar'. Nieuwe overschotten of tekorten worden gebufferd door deze grote voorraad. Daarom is het nuttig om naast de herkomst ook het begrip stuurbaarheid te definiëren:

Stuurbaarheid is de afname in de af- en uitspoeling naar het oppervlaktewater door reductie van een bron.

De stuurbaarheid van puntbronnen is groot: een afname in de emissie uit de puntbron leidt tot een even grote afname in de belasting van het oppervlaktewatersysteem. De stuurbaarheid van bronnen die via het bodem-water-plant systeem tot afvoer komen is lastiger te bepalen. Sommige bronnen zullen niet of nauwelijks stuurbaar zijn. Voor inzicht in de effecten van mogelijke maatregelen kan daarom onderscheid gemaakt worden tussen 'stuurbare' bronnen en 'niet-stuurbare' bronnen.

Van der Bolt *et al.* (2007) en Boekel *et al.* (2008) hebben het lange termijneffect van rigoureuze aanpassingen van de mestgiften op de uit- en afspoeling op lange termijn verkend door een berekening uit te voeren waarin vanaf 2011 tot 2040 het landbouwkundig gebruik is omgezet naar braak en de mestgift op nul is gesteld. De bron bemesten wordt hierbij volledig uitgeschakeld om een indicatie te krijgen van het effect op de uit- en afspoeling van nutriënten naar het regionaal oppervlaktewater i.e. welke maximale reductie in de uitspoeling naar het regionaal oppervlaktewater door uitsluiten van de verschillende bronnen kan worden bereikt. Van Boekel *et al.* berekenden een bijdrage aan de uit- en afspoeling van de bron bemesting van 28 tot 35% voor stikstof en van 16 tot 17% voor fosfor. De berekende stuurbaarheid was in hun studie aanzienlijk kleiner dan de geschatte herkomst.

In de onderhavige studie zijn de mogelijke effecten van een vermindering van het stikstofoverschot onderzocht aan de hand van een vergelijking van de rekenvarianten die zijn doorgerekend met STONE2.4 voor de EMW2012 Ex Ante (Groenendijk *et al.*, 2012). Hiertoe is per rekenplot het verschil berekend van het stikstofoverschot zoals dat wordt berekend voor de rekenvariant 'Referentie' in 2025 en het stikstofoverschot zoals dat wordt berekend in de 'N-scherp'-variant. Verder is per rekenplot het verschil berekend van de corresponderende stikstofvrachten naar het oppervlaktewater in 2030 (Figuur 13 en Figuur 14). Gerekend is met een aangepaste versie van de scenario's waarin een verandering van de fosfaattoestand van de bodem geen invloed heeft op de hoogte van de mestgift. Elke landbouwplot krijgt na implementatie van de bemestingsmaatregelen een constante mestgift. In deze analyse is gekozen voor het jaar 2025 omdat de veronderstelde waterafvoeren in dat jaar het meest overeenkomen met het gemiddelde van de veronderstelde waterafvoeren tussen 2016 en 2030. Verder ligt 2025 ruim 10 jaar na de invoering van de veronderstelde mestmaatregelen in 2013 en 2014. Deze tijdsduur is voldoende om het effect van mestreductie zichtbaar laten zijn in de gevolgen voor uit- en afspoeling.

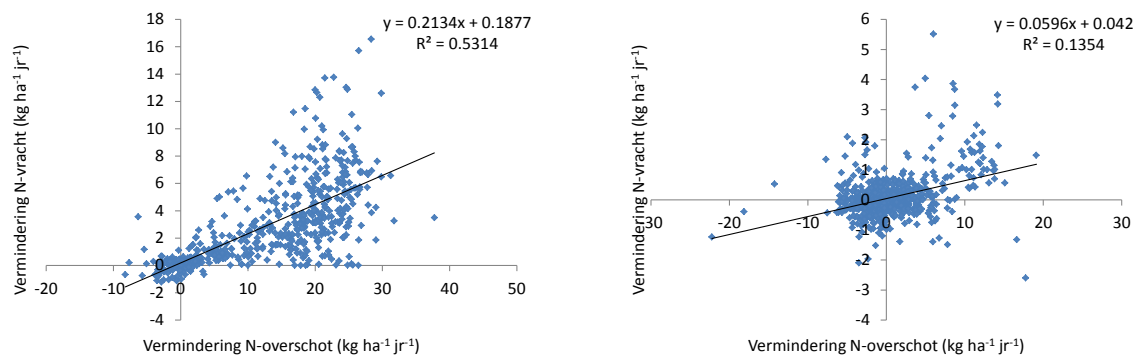


Figuur 13 Vermindering van de stikstofvracht naar het oppervlaktewater in 2025 als functie van het stikstofoverschot voor de plots met grasland op zandgrond (links) en grasland op klei- en veengrond (rechts).

Figuur 13 laat een puntenwolk zien met een grote spreiding. Voor grasland op bedraagt de range van de vermindering van het stikstofoverschot 1 – 20 kg ha⁻¹ jr⁻¹ en voor grasland op klei- en veengrond is de range van -8 tot +7 kg ha⁻¹ jr⁻¹. Door de maatregelen in het N-scherp scenario krijgen een aantal klei- en veenplots een hogere stikstofbemesting dan ze gehad zouden hebben bij continuering van de bemesting in 2010. Bij grasland op zandgrond kan een trend worden bepaald: een reductie van het stikstofoverschot met 10 kg ha⁻¹ jr⁻¹ leidt tot een vermindering van de stikstofvracht naar het oppervlaktewater met 1,7 kg ha⁻¹ jr⁻¹. In de klei- en veenplots is de respons op een vermindering van het stikstofoverschot veel kleiner. Deels omdat in de studie 'EMW2012 ex ante' de aangebrachte variatie van het stikstofoverschot van klei- en veengronden erg klein is en deels omdat het aandeel van bodemorganische stof in de stikstof-huishouding van deze gronden veel groter is dan in zandgronden. Hoewel de regressiecoëfficiënt voor klei en veengronden erg laag is, lijkt zich ook hier een (geringe) positieve trend voor te doen: een vermindering van het stikstofoverschot met een kilo zal leiden tot een vermindering van de stikstofvracht met 1,3% van deze kilo.

Voor snijmaïs op zandgrond en snijmaïs op klei- en veengrond kan geen zinvolle analyse worden uitgevoerd. Het N-scherpscenario in de EMW2012 ex ante studie (Groenendijk *et al.*, 2012) laat voor veel plots een geringe toename in de totale stikstofbemesting zien, omdat geen extra maatregelen voor snijmaïs zijn voorzien als gevolg van de verdringing van varkensmest door rundveemest. Daarnaast speelt de omrekening van met MAMBO berekende mestgiften per klasse van de fosfaat-toestand naar mestgiften per STONE-plot een rol. De achtergronden hiervan worden nader toegelicht in Groenendijk *et al.* (2012).

De resultaten van de analyse voor akkerbouw zijn weergegeven in Figuur 14.

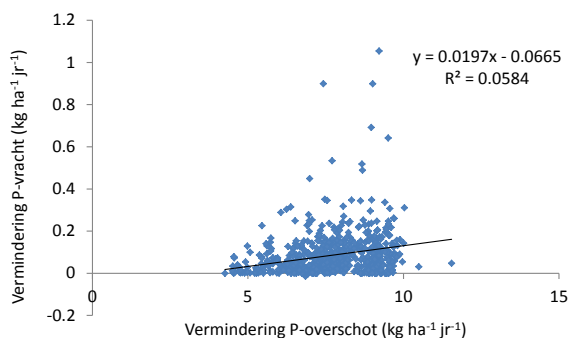


Figuur 14 Vermindering van de stikstofvracht naar het oppervlaktewater in 2025 als functie van het stikstofoverschot voor de plots met akkerbouw op zandgrond (links) en akkerbouw op klei- en veengrond (rechts).

De ranges van de veranderingen van het stikstofoverschot van akkerbouw zijn groter dan voor grasland. Daarnaast worden voor akkerbouw ook hogere correlatiecoëfficiënten berekend van de regressielijnen. Ook de response op een vermindering van het stikstofoverschot is groter. Voor zandgrond wordt berekend dat een reductie van het stikstofoverschot met $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ zal leiden tot een vermindering van de stikstofvracht naar het oppervlaktewater met $2,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$. Voor klei- en veengrond wordt berekend dat een vermindering van het stikstofoverschot met een kilo zal leiden tot een vermindering van de stikstofvracht met 6,0% van deze kilo.

De mogelijke effecten van vermindering van het fosforoverschot zijn eveneens onderzocht aan de hand van een vergelijking van de rekenvarianten in Groenendijk *et al.* (2012). Hiertoe is per rekenplot het verschil berekend van het fosforoverschot zoals dat wordt berekend voor de rekenvariant 'Referentie' in 2025 en het fosforoverschot zoals dat wordt berekend in de rekenvariant 'extra fosfokorting op N-scherp'.

Het resultaat van deze analyse gaf aan dat voor de meeste bodem-grondgebruikscombinaties op plotniveau geen correlatie tussen de vermindering van het fosforoverschot en de vermindering van de fosforuitspoeling aanwezig is. Voor akkerbouw op zandgrond is een geringe correlatie aanwezig en daarom worden de resultaten van deze bodem-grondgebruikscombinatie getoond als voorbeeld (Figuur 15).



Figuur 15 Vermindering van de fosforvracht naar het oppervlaktewater in 2025 als functie van het fosforoverschot in 2025 voor de plots met akkerbouw op zandgrond.

Een vermindering van het fosforoverschot met bijvoorbeeld 10 kilo zal leiden tot een vermindering van de fosforvracht met 2,0% van deze 10 kilo.

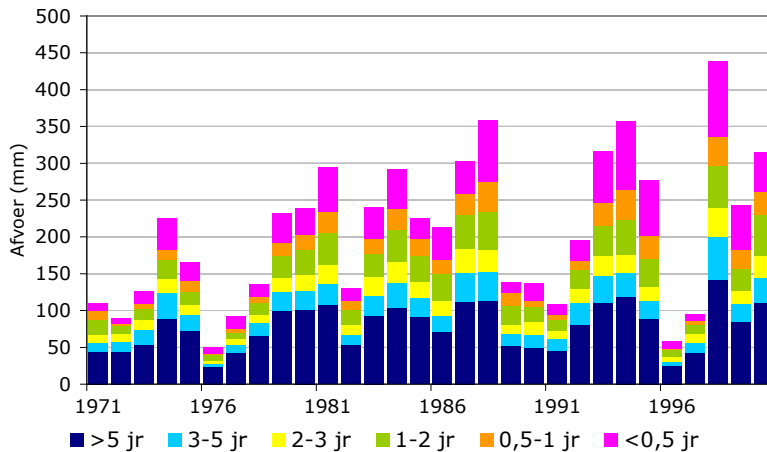
De sturing van de bron 'bemesting' heeft via het stikstof- en fosforoverschot invloed op de uit- en afspoeling. Een vermindering van de bemesting zal doorgaans gepaard gaan met een reactie van het gewas of een reactie van de bodemvoorraad, waardoor de reactie van de stikstof- en fosforuitspoeling sterk wordt gebufferd. De resultaten van de vergelijking van resultaten van rekenvarianten voor de EMW2012 ex ante studie laat zien dat de reactie voor wat betreft belasting van het oppervlaktewater op de termijn van tien 10 jaar gering is. De sterkste reactie is te verwachten voor stikstof in de zandgronden waar een reductie van de uitspoeling ca. 20% kan bedragen van een overschotreductie. Voor fosfaat worden heel geringe effecten verwacht en de uitspoeling van fosfaat lijkt op korte termijn daarmee moeilijk te sturen met bemestingsniveaus.

Opgemerkt wordt dat in de rekenvarianten de verschillen tussen de rekenvarianten voor de EMW 2012 klein waren. Deze rekenvarianten waren zijn opgesteld vanuit de gedachte ideeën van wat bedrijfs-economisch /technisch misschien nog enigszins haalbaar zou kunnen zijn, en niet vanuit de gedachte vraag wat nodig zou zijn om de milieudoelstellingen eutrofiëringsdoelstellingen te realiseren om eutrofiëring te beperken. Om een scherper beeld te krijgen van de mogelijkheid tot sturing van om eutrofiëring te reduceren door vermindering van stikstof- en fosforoverschotten zouden grotere verschillen tussen rekenvarianten aangebracht moeten worden.

4 Mogelijkheden en beperkingen van de methode

4.1 Invloed rekenperiode

Voor de beschrijving van de huidige toestand is aangenomen dat de gemiddelde stofbalanstermen over de periode 2001 – 2010 een goede representatie vormen. Het huidige klimaat is gedefinieerd als de reeks weerjaren 1981 – 2010. De periode 2001 – 2010 is daarmee niet representatief voor het huidige klimaat. Daarnaast kunnen de eindwaarden van een veranderde stikstof- en fosforuitspoeling als gevolg van een veranderde bemesting zich na een lange tijd openbaren. Een verandering van het stikstofoverschot manifesteert zich voor het grootste deel binnen vijf jaar, maar zal ook na vijf jaar nog een gering effect hebben. Figuur 16 geeft een indruk van (de fluctuaties in) de leeftijd verdeling van uitstromend grondwater van landbouwpercelen naar het oppervlaktewater voor een 30-jarige periode.



Figuur 16 Leeftijd verdeling van jaarsommen van uitstromend grondwater van landbouwpercelen met geringe wegzijging, geen infiltratie uit het oppervlaktewater en geen buisdrainage naar het oppervlaktewater voor de periode 1971 – 2000 (Groenendijk et al., 2013.).

In de natte jaren is de afvoer van relatief jong grondwater groot, maar in de droge jaren heeft het relatief oude grondwater een groter aandeel in de afvoer.

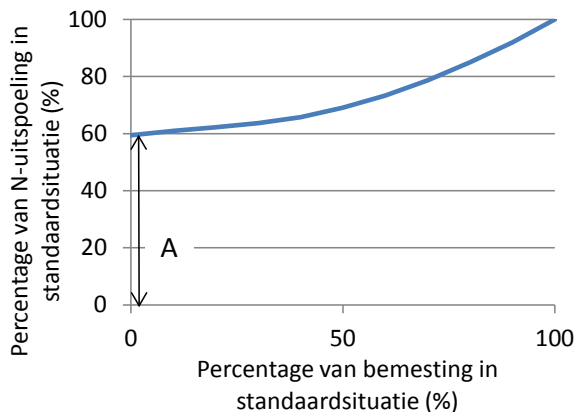
Een deel van het effect van veranderde bemesting komt vertraagd in het grondwater terecht, omdat door de nutriëntencyclus in het bodem-plantsysteem de verliezen later optreden t.o.v. het tijdstip van bemestingsverandering en omdat het transport door en de processen in de bodem tot verdere vertraging leiden. Verwacht wordt dat binnen de beschouwde 10-jarige periode een groot deel van het effect van een verandering van de stikstofuitspoeling als gevolg van een verandering van de stikstofbemesting zich heeft gemanifesteerd, maar niet volledig.

4.2 Schatting invloed historische bemesting

4.2.1 Methode

Om een schatting te kunnen maken van de invloed van de historische mestoverschotten op de stikstof- en fosforbelasting van oppervlaktewater zijn twee verschillende berekeningen uitgevoerd:

1. Voor de periode 1941 – 2000 is de mestgift gevarieerd tussen -5% en +5% van de instelwaarde en in de periode 2001 – 2010 is de mestgift niet gevarieerd. Ook de andere brontermen zijn niet gevarieerd. Vervolgens is met lineaire regressie het aandeel geschat van de verandering van de bodemvoorraad (en van de neerwaartse stoffluxen) dat is toe te schrijven aan de historische overschotten. Vervolgens zijn deze aandeel-schattingen verder verwerkt in de procedure zoals die is toegepast voor de schatting van bronnen in paragraaf 2.3.
2. Voor de periode 1941 – 2000 is de mestgift gevarieerd tussen -5% en +5% van de instelwaarde en is per STONE-plot een relatie opgesteld voor de stikstof- en fosforuitspoeling in 2001 – 2010 als functie van de bemesting in 1941 – 2000. De relatie heeft de vorm $Uitspoeling = A \text{ Exp}(B \times \text{Bemesting})$ en is gebaseerd op de rekenexperimenten in het project Monitoring Stroomgebieden (Roelsma *et al.*, 2011), waarin voor de schatting van bronnen de mestgiften tot nul zijn gereduceerd. Met deze relatie is de bijdrage van historische overschotten aan de huidige uitspoeling naar het oppervlaktewater te schatten (Figuur 17).



Figuur 17 Percentage van de stikstofuitspoeling als percentage van de stikstofbemesting in het stroomgebied van de Drentse Aa (gebaseerd op: Roelsma *et al.*, 2011).

Het niet-lineaire verband in de bovenstaande figuur laat zich goed beschrijven met de genoemde formule. De constanten A en B in de formule worden bepaald door fitten op de resultaten van het rekenexperiment. Als de bemesting nul zou zijn, dan zou de uitspoeling gelijk zijn aan A . De bijdrage van de historische bemesting wordt bepaald door de uitspoeling bij de instelwaarde voor de bemesting te verminderen met de waarde A : De relatieve bijdrage is dan: $1 - A / (\text{Uitspoeling bij instelwaarde})$.

Op voorhand is niet aan te geven welke methode de voorkeur verdient. De eerste methode is consistent met de methode voor de actuele bronnen, maar kan door de indirecte benadering worden 'vervuild' door de onzekerheden in de verandering van de bodemvoorraad. Bij de tweede methode is een extra veronderstelling geïntroduceerd voor het niet lineaire verband tussen bemesting en stikstofuitspoeling en zijn mogelijk niet alle indirecte na-ijleffecten meegenomen. De resultaten van deze methode vormen daarmee een indicatie voor de bandbreedte van de invloed van historische bemesting op de stikstof- en fosforuitspoeling (Tabel 4).

4.2.2 Resultaten

Tabel 4 laat de resultaten van beide methoden voor schatten van de bijdrage van historische bemesting zien. De methode voor het schatten van de invloed van de historische bemesting op de actuele stikstof- en fosforuitspoeling blijkt nog niet robuust te zijn. Voor de stikstofuitspoeling onder grasland op zandgrond leiden de verschillende methoden tot een grote bandbreedte. De bandbreedte voor de fosforuitspoeling onder maïsland is nog groter. In het STONE-model is het landgebruik constant in de tijd en wordt aangenomen dat maïsgronden in het verleden sterk zijn overbemest. De hogere cijfers voor het aandeel van historische bemesting in de fosforuitspoeling naar het oppervlaktewater zijn volgens deskundigen niet onwaarschijnlijk.

Voor de stikstofuitspoeling van gras, maïs en akkerbouw op zandgrond en voor de fosforuitspoeling van gras, maïs en akkerbouw, evenals de fosfor-uitspoeling van maïs en akkerbouw op veengrond is de berekende bovengrens hoger dan het aandeel dat verklaard wordt door de nalevering uit de bodem. Bedacht moet worden dat het cijfer voor de nalevering uit de bodem berekend is op basis van een andere populatie STONE-plots dan het aandeel van historische bemesting berekend op basis van de onder 2 genoemde methode. In de afleiding van de coëfficiënten voor het lineaire model (par. 2.3) worden plots met een negatieve waarde voor bodemlevering uitgesloten.

Tabel 4

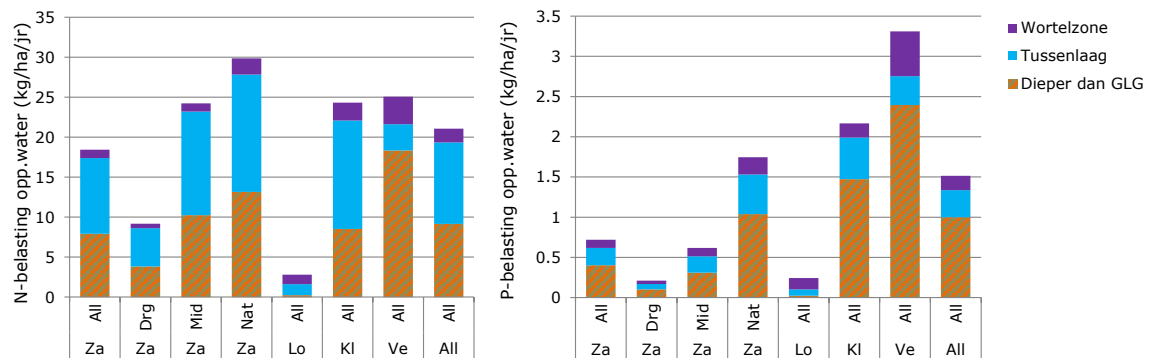
Aandeel (%) van historische bemesting in de afspoeling van stikstof en fosfor naar het oppervlaktewater berekend met twee methodes. Tussen haakjes is het aandeel van de 'huidige' nalevering uit de bodem aan de stikstof- en fosforuitspoeling weergegeven.

Grondsoort	Stikstof				Fosfor			
	Gras	Mais	Akkerbouw	Alle landbouwgrond	Gras	Mais	Akkerbouw	Alle landbouwgrond
Zandgrond	5 - 43 (14)	9 - 35 (21)	4 - 23 (17)	6 - 36 (16)	2 - 45 (4)	10 - 61 (14)	1 - 36 (23)	4 - 46 (13)
Kleigrond	7 - 19 (32)	12 - 18 (41)	5 - 13 (24)	6 - 16 (26)	10 - 21 (45)	0 - 45 (46)	1 - 11 (14)	4 - 16 (25)
Veengrond	4 - 13 (46)	10 - 24 (35)	3 - 14 (30)	5 - 13 (43)	13 - 37 (64)	20 - 68 (27)	16 - 58 (26)	16 - 41 (57)
Gemiddelde	7 - 28 (27)	10 - 32 (24)	4 - 16 (22)	6 - 24 (24)	11 - 36 (45)	11 - 59 (21)	4 - 21 (17)	9 - 33 (31)

4.3 Bronnen en routes

Bij de belasting van oppervlaktewater met stikstof en fosfor spelen zowel bronnen als routes en processen een rol. Bij de verdeling van de herkomst in paragraaf 3.1 is aangegeven in welke mate de processen bijdragen aan de belasting van het oppervlaktewater. De sterkte van een bron boven het maaiveld of in de actieve zone in de bodem die door landbouwkundig handelen wordt beïnvloed wordt niet direct vertaald in een bijdrage aan de herkomst van stikstof en fosfor in het uitspoelende water omdat tijdens het transport over het maaiveld, door de bodem en door het ondiepe grondwater (routes) nog reacties (processen) kunnen optreden. De transportroutes in het STONE-model worden bepaald door de verdeling van de waterstroming zoals die is berekend met de modellen waarmee de hydrologie voor STONE is berekend. Ook de geschatte initiële hoeveelheid en verdeling van stoffen in de bodem aan het begin van een modelsimulatie hebben invloed op de totale uitspoeling en de herkomst naar bronnen.

Figuur 18 geeft de bijdrage van drie verschillende bodemzones weer aan de belasting van het oppervlaktewater voor verschillende bodemtypes. Hierbij is de wortelzone onderscheiden die in STONE voor landbouwgewassen meestal 30 - 50 cm bedraagt, een tussenlaag tussen de wortelzone en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en een laag dieper dan de GLG. Er is geen onderscheid gemaakt naar gronden met buisdrainage en gronden zonder buisdrainage.



Figuur 18 Bijdrage van bodemzones aan de stikstof- en fosforbelasting van het oppervlaktewater voor zandgrond (za), lössgrond (Lo), kleigrond (Kl) en veengrond (Ve). Zand is onderverdeeld in droge (Drg), neutrale (Mid) en natte (Nat) gronden.

Voor stikstof wordt berekend dat op de zand- en kleigronden minder dan 10% van de stikstofafvoer afkomstig is uit de wortelzone. Voor de veengronden en de lössgronden ligt dit percentage hoger. Voor de zandgronden draagt de zone dieper dan de GLG voor meer dan 40% bij aan de stikstofbelasting en voor de veengronden is dit percentage hoger dan 70%. In veengronden is meestal de grondwaterstand ondiep en is daarmee de tussenlaag dunner dan in de zand- en kleigronden. In zand- en kleigronden draagt de tussenlaag voor meer dan 50% bij aan het stikstof-transport naar oppervlaktewater.

Voor fosfaat wordt berekend dat op de zand- en de veengronden minder dan 20% van de stikstofafvoer afkomstig is uit de wortelzone. Voor de kleigronden ligt dit percentage onder de 10%. De kleigronden zijn vaker van buisdrainage voorzien dan de zand- en de veengronden. Voor de zandgronden draagt de zone dieper dan de GLG voor 50 – 60% bij aan de fosforbelasting. Evenals voor stikstof is voor de veengronden dit percentage hoger dan 70%. In zand- en lössgronden draagt de tussenlaag voor ca. 30% bij aan het fosfor-transport naar oppervlaktewater. Voor veengronden wordt dit berekend op ca. 10%.

De bovenstaande resultaten laten zowel voor stikstof als voor fosfaat het relatief grote belang zien van de zone dieper dan de GLG. De reactiviteit in deze zone is laag, maar de verblijftijd bedraagt enkele jaren tot enkele tientallen jaren en daardoor kunnen bij een kleine reactiviteit toch stoffen zoals stikstof en fosfaat worden vrijgemaakt of worden vastgelegd die in het oppervlaktewater uitstromen.

4.4 Vergelijking met andere studies

In de studie van Van Boekel *et al.* (2008) is STONE versie 2.3 gebruikt voor de schatting van de procentuele bijdrage van bronnen aan de belasting van oppervlaktewater. Dit is gedaan door analoog aan Van der Bolt *et al.* (2007) steeds één of meer bronnen gelijk aan nul te stellen (en bij nulbemesting het landgebruik om te zetten in natuur) en door de resulterende verandering van stikstof- en fosforuitspoeling te relateren aan deze bronnen. Door de bronnen in verschillende combinaties te elimineren werd verondersteld dat de verschillende terugkoppelingsmechanismen in de relaties tussen de verschillende bronnen (via transport, processen en vastlegging) konden worden beschreven. De verschillende combinaties van bron-uitsluiting resulterende in verschillende resultaten en dat werd toegeschreven aan de niet-lineaire processen die een rol spelen bij gewasopname, omzetting en accumulatie van stikstof en fosfor in de bodem. Deze rekenwijze is in par. 2.2 besproken als de vierde methode. Voor wat betreft de methodiek laten de resultaten in het voorliggende rapport zich het best vergelijken met de variant 'actueel' in het rapport van Van Boekel *et al.* (2008). Enkele resultaten uit deze eerdere bronnenstudie zijn samengevat in Tabel 5.

Tabel 5

Procentuele bijdrage (%) van bronnen aan de belasting van oppervlaktewater in Nederland zoals gerapporteerd door van Boekel *et al.* (2008).

	Stikstof				Fosfor			
	Zand-gronden	Klei-gronden	Veen-gronden	Gemiddeld	Zand-gronden	Klei-gronden	Veen-gronden	Gemiddeld
Depositiesie	7 - 16	6 - 11	3 - 9	6 - 13	0	0	0	0
Landbouw	38 - 46	15 - 19	24 - 30	28 - 35	17 - 18	13 - 14	20 - 20	16 - 17
Kwel	4 - 4	2 - 2	7 - 7	3 - 3	3 - 3	3 - 3	2 - 2	3 - 3
Bodem	44	74	62	57	79	84	79	81

De levering vanuit de bodem werd in de studie van Van der Bolt *et al.* (2007) en in de studie van Van Boekel *et al.* (2008) veel hoger berekend dan in de voorliggende studie. De resultaten van Van der Bolt *et al.* (2007) waren gebaseerd op berekeningen met STONE2.1.1 en de resultaten van Van Boekel *et al.* (2008) waren afgeleid van rekenexperimenten met STONE2.2. Hoewel deze versies van het STONE-model verschilden van de versie 2.4 die voor deze studie is toegepast, lijkt het verschil in methode toch de belangrijkste reden dat in de onderliggende studie de bron 'actuele bemesting' een hoger aandeel heeft en de bron 'levering uit de bodem' een veel lager aandeel heeft. De oorzaak is vooral gelegen in de verschuiving in processen die het gevolg is van de grote verschillen in belasting tussen wel of niet bemesten. Daarnaast kunnen effecten van het braak leggen van het land bij niet bemesten alsook de geldigheid van de modelconcepten bij dergelijk extreme verkenningen een rol spelen.

Van der Bolt *et al.* (2007) en Boekel *et al.* (2008) hebben het lange termijneffect van rigoureuus aanpassen van de mestgiften op de uit- en afspoeling op lange termijn verkend door een berekening uit te voeren waarin vanaf 2011 tot 2040 het landbouwkundig gebruik is omgezet naar braak en de mestgift op nul is gesteld. De bron bemesten wordt hierbij volledig uitgeschakeld om een indicatie te krijgen van het effect op de uit- en afspoeling van nutriënten naar het regionaal oppervlaktewater i.e. welke maximale reductie in de uitspoeling naar het regionaal oppervlaktewater door uitsluiten van de verschillende bronnen kan worden bereikt. Van Boekel *et al.* berekenden een bijdrage aan de uit- en afspoeling van de bron bemesting van 28 tot 35% voor stikstof en van 16 tot 17% voor fosfor. Dit is, in vergelijking met de in deze studie berekende herkomst (57% voor stikstof en 61% voor P, Tabel 3) een stuk lager. Het bodemcomplex draagt in de berekeningen van Van der Bolt *et al.* (2007) en Van Boekel *et al.* (2008) zowel voor stikstof (57%) als voor fosfor (81%) het meeste bij aan de totale belasting naar het oppervlaktewater. De grote (door de mestgiften toegenomen) bodemvoorraad fungeert vooral voor fosfor als buffer waardoor minder bemesten niet onmiddellijk leidt tot een forse afname van de nutriëntenbelasting en de daarmee beoogde betere waterkwaliteit in regionaal oppervlaktewater.

In het EUROHARP-project (http://www.wise-rtd.info/sites/default/files/d-2007-08-29-report2-WEB_1.pdf) is de 'source apportionment (SA)' methode toegepast voor de schatting van de bijdrage van de bron 'landbouw' aan de belasting van oppervlaktewater. Deze methode is gebaseerd op de aanname dat het nutriëntentransport in een bepaald deel van het oppervlaktewater tot stand komt als de som van de nutriëntenstroom van puntbronnen, de nutriëntenverliezen van antropogene diffuse bronnen en de achtergrondbelasting van nutriënten i.e. de balans van het stroomgebied:

$$L_{OW} = L_P + L_D + L_B - R$$

Hierin is:

- L_{OW} nutriëntenuitstroom uit een oppervlaktewater deelsysteem
- L_P bijdrage door puntbronnen
- L_D bijdrage door antropogene diffuse bronnen
- L_B bijdrage door achtergrondbelasting
- R retentie in het oppervlaktewater

De nutriëntenuitstroom uit een oppervlaktewater deelsysteem wordt in de SA-methode geschat aan de hand van waarnemingen van de waterafvoer en concentraties in een monitoringspunt. De bijdrage

door antropogene diffuse bronnen is nader op te splitsen in de inspoeling in het oppervlaktewater via bodemroutes (L_{DS}) en de instroom met atmosferische depositie (L_{DA}). De puntbronnen kunnen worden onderscheiden in echte puntlozingen waarvan de geografische ligging bekend is ($L_{P,G}$) en lozingen van verspreid liggende boerenerven en huishoudens waarvan de geografische ligging niet bekend is ($L_{P,U}$). De stikstof- en fosfor-verliezen van landbouwkundig gebruik van de grond die via bodemroutes in het oppervlaktewater terecht komen wordt kan uiteindelijk geschat met:

$$L_{DS} = L_{OW} - (L_{P,G} + L_{P,U} + L_{DA} + L_B - R)$$

De lozingen van verspreid liggende boerenerven en huishoudens waarvan de geografische ligging niet bekend is ($L_{P,U}$) volgt uit HARP Guideline 5 (<http://www.klif.no/publikasjoner/vann/1759/ta1759.pdf>).

In Van Boekel *et al.* (2012) en Van der Bolt *et al.* (2012) zijn de resultaten van in deze studie berekende bijdrage van de bronnen aan de belasting van het oppervlaktewatersysteem gebruikt om analoog aan de source apportionment methode met de bijdrage van de bronnen op verschillende plekken in het watersysteem de uitstroom te bepalen.

4.5 Perspectieven van bronnenanalyses

Herkomst

Met de analyse van bronnen van de belasting van oppervlaktewater worden verschillende doelen nagestreefd. De resultaten in dit rapport zijn verkregen met een andere methode dan in eerdere studies van Van der Bolt *et al.* (2007) en Van Boekel *et al.* (2008) en geven een ander beeld van de bijdrage van actuele bemesting en de levering uit de bodem. De belangrijkste verschillen worden genoemd:

- De beide methoden werken in een ander bereik van het systeem: door de grote verschillen in belasting tussen wel of niet bemesten wordt een sterke verschuiving in de (niet lineaire) bodemprocessen gerealiseerd die doorwerkt in de berekende bijdragen van de bronnen.
- In de uitsluitmethode wordt het model toegepast buiten het bereik waarvoor het STONE-model is opgesteld en geparameteriseerd. Daarnaast kunnen effecten van het braak leggen van het land bij niet bemesten alsook de geldigheid van de modelconcepten bij dergelijk extreme verkenningen een rol spelen. De verschillen tussen de resultaten van de rekenruns worden toegeschreven aan het niet-lineaire gedrag van processen.
- In de methode waarin door lineaire regressie van resultaten van een lokale gevoeligheidsanalyse de coëfficiënten voor een lineair model worden bepaald, worden de bijdragen van de bronnen geschat door extrapolatie van dit lineaire model.

In paragraaf 2.2 is de methode benoemd waarin de lotgevallen van stikstof en fosfor uit verschillende bronnen worden gesimuleerd met zgn. virtuele isotopen. Deze methode lijkt de ultieme methode te zijn om de bijdrage van bronnen te kwantificeren. Omdat deze methode rekenintensief zal zijn kan ook hiervoor een metamodel worden afgeleid met een breder toepassingsbereik dan de tot nu toe ontwikkelde metamodellen.

In een vervolgfase zouden aan de twee hierboven genoemde bezwaren die aan de twee benaderingen voor bronnenanalyse kleven tegemoet gekomen kunnen worden door ze verder te combineren. Op basis van een reeks gerichte rekenexperimenten waarin de verschillende bronnen afzonderlijke en in combinatie worden gevarieerd, zijn de verbanden tussen de verschillende bronnen en verdwijntermen te beschrijven. Deze verbanden hoeven dan niet a priori als lineaire relaties beschouwd te worden. Wel dient het bereik waarvoor het STONE-model is opgesteld in acht te worden genomen. Door uit te gaan van een modelconcept waarin de verschillende bronnen en verdwijntermen aan elkaar gerelateerd zijn (Figuur 5) kan consistentie worden gewaarborgd. Het metamodel SIMPLE (Schoumans *et al.*, 2002) is een voorbeeld van een metamodel voor de uitspoeling van fosfaat naar het oppervlaktewater, waarin door middel van het uitschakelen van brontermen een indruk is te verkrijgen van de relatieve bijdrage van bronnen, maar waarin de consistentie tussen bronnen en verdwijntermen niet is gewaarborgd.

Stuurbaarheid

De stuurbaarheid kan nader onderzocht worden door een reeks rekenexperimenten uit te voeren met waarin toekomstige bemestings-, depositie-, en oppervlaktewater-concentratieniveaus worden gevarieerd binnen de bandbreedtes van het werkingsgebied van het model. Voor stikstofbemesting zou men een stikstofoverschotniveau van nul als ondergrens kunnen kiezen en voor fosfaat zou men kunnen kiezen voor fosforbemestingsniveau dat op lange termijn leidt tot Pw- en PAL-getallen die nog juist als voldoende worden beschouwd uit oogpunt van bodemvruchtbaarheid. Aan de hand van een dergelijke analyse kan men dan een beeld schetsen van wat nog maximaal aan reductie van stikstof- en fosforuitspoeling is te verwachten bij extreme reducties van mestgiften. Dergelijke informatie is nuttig in de discussies over de kosteneffectiviteit van maatregelen die gericht zijn op het behalen van KRW-doelstellingen.

Een verdere ontwikkeling van het hierboven bepleite metamodel waarin verschillende bronnen en verdwijntermen op consistente wijze aan elkaar zijn gerelateerd, zou zich behalve op het verklaren van de huidige belasting van oppervlaktewater, ook moeten richten op de voorspelling van de minimale uitspoelingsniveaus die uit landbouwgronden zullen blijven optreden (de achtergrondbelasting). Hierbij moet ook rekening gehouden worden met gewasrotatie en de mogelijkheid van een verandering van het landgebruik.

5 Conclusies en aanbevelingen

De relatieve bijdrage van verschillende bronnen aan de belasting van oppervlaktewater in 2010

Landelijk gemiddeld draagt de bemesting voor resp. 12.4 en 0.82 kg ha⁻¹ jr⁻¹ bij aan de stikstof- en fosforbelasting van het oppervlaktewater, draagt natte en droge depositie voor 2.1 kg ha⁻¹ jr⁻¹ bij aan de stikstofuitspoeling. De som van kwel en de infiltratie uit het oppervlaktewater heeft een heel geringe bijdrage van 0.7 en 0.1 kg ha⁻¹ jr⁻¹ bij aan de stikstof- en fosforbelasting van het oppervlaktewater en de vermindering van de voorraad in de bodem levert resp. 5.9 en 0.58 bij aan de stikstof- en fosforuitspoeling naar oppervlaktewater. Bemesting, depositie, kwel+infiltratie en de levering uit de bodem dragen voor resp. 58%; 10%; 4% en 28% bij aan de stikstofbelasting van het oppervlaktewater terwijl deze bronnen voor resp. 55%; 0%; 7% en 38% bijdragen aan de fosforbelasting van oppervlaktewater.

Het Centrale en het Zuidwestelijke zeeleigebied hebben de hoogste stikstofbelasting van het oppervlaktewater berekend, gevolgd door de veengebieden. De bemesting draagt in deze gebieden voor resp. 62, 62 en 64% bij aan de stikstofuitspoeling. De hoogste fosforbelasting van het oppervlaktewater wordt berekend voor de veengebieden, gevolgd door het Centrale en het Zuid-westelijke zeeleigebied. In de veengebieden draagt de bemesting voor 30% bij aan de fosforvrucht naar het oppervlaktewater en de levering uit de bodem voor 63%. Van de totale fosforuitspoeling in deze gebieden is 5% afkomstig van het water dat in de zomer vanuit sloten in de bodem is geïnfiltreerd.

Sturingsmogelijkheden voor het realiseren van grondwater- en oppervlaktewaterkwaliteitsdoelen met het landelijke mestbeleid

De sturingsmogelijkheid van mestniveaus is nagegaan door de vergelijking van de resultaten van rekenvarianten voor de Evaluatie Mestwetgeving 2012. Hiermee is het begrip 'sturingsmogelijkheid' beperkt tot wat beleidsmedewerkers aangeven als een maximale sturing vanuit politiek perspectief. De maximale reductie van stikstof- en fosforuitspoeling die op lange termijn vanuit de fysische en chemische kenmerken van het landbouwsysteem en de bodem mogelijk is, is niet bekeken. Op de korte termijn zijn op de zandgronden de grootste reducties haalbaar. Een vermindering van het stikstofoverschot met 10 kg ha⁻¹ op deze gronden leidt voor resp. grasland en mais+akkerbouw tot een vermindering van de stikstofuitspoeling met 1.7 en 2.1 kg ha⁻¹. Voor klei- en veengronden is de respons van een vermindering van het stikstofoverschot veel kleiner. Een vermindering van het stikstofoverschot met 10 kg ha⁻¹ op deze gronden leidt voor resp. grasland en mais+akkerbouw tot een vermindering van de stikstofuitspoeling met 0.13 en 0.60 kg ha⁻¹. Voor fosfaat wordt berekend dat een vermindering van het fosfaatoverschot op de korte termijn zal leiden tot een vermindering van slechts 2% van de overschotreductie.

Methode om de bronnen te kwantificeren

De kwantificeren van de bijdrage van de verschillende bronnen en de herkomst van de diffuse belasting van het oppervlaktewater is lastig, omdat deze niet rechtstreeks is te meten en alleen via modelberekeningen kan worden gekwantificeerd. De gehanteerde methodiek is een verbetering vergeleken met eerdere studies, maar vormt nog niet een onbetwiste werkwijze.

Aanbevolen wordt om:

1. de komende jaren verschillende methodieken naast elkaar te zetten en op basis van de opgedane kennis te verbeteren zodat in de volgende evaluatie een duidelijk protocol voorhanden is.
2. De lotgevallen van stikstof en fosfor uit verschillende bronnen te simuleren met zogenaamde virtuele isotopen. Een meta-model te ontwikkelen waarin de lotgevallen van stikstof en fosfor en de verschillende relaties tussen bronnen en verdwijntermen op consistente manier worden beschreven.
3. Met dit metamodel zowel een diagnose van de landbouwkundige herkomst van stikstof en fosfor in het oppervlaktewater uit te voeren als een prognose van de haalbare stikstof- en fosforuitspoelingsreducties door vermindering van stikstof- en fosforoverschotten.

Literatuur

- Bolt, F.J.E. v.d., 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.
- Groenendijk, P. & C.W.J. Roest, 1997. Stikstofuitspoeling, -verliezen en -overschotten door bemesting van graslandpercelen in het stroomgebied van de Beerze en de Reusel. DLO Staring Centrum, Wageningen. Rapport 484.
- Groenendijk, P., L.V. Renaud, E.M.P.M. van Boekel, C. van der Salm en O.F. Schoumans, 2013. Voorbereiding STONE2.4 op berekeningen voor de Evaluatie Meststoffenwet 2012. Wageningen, Alterra, Alterra-Voorbereiding STONE24 op berekeningen voor de Evaluatie Meststoffenwet. Alterra, Wageningen. Rapport 2462.
- Groenendijk, P., L.V. Renaud, J.G. Kroes, E.M.P.M. van Boekel en R.F.A. Hendrik, 2013. Typering en leeftijd van grondwater in het STONE model voor de schatting van initiële en randconcentraties. Alterra, Wageningen, Alterra Rapport in druk.
- Hendriks, R.F.A., 2003. Bemesting hoofdoorzaak van eutrofe veensloten? H twee O **36** (11) 33-36.
- Hendriks, R.F.A., R. Kruijne, J. Roelsma, K. Oostindie, H.P. Oosterom en O.F. Schoumans, 2002. Berekening van de nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater vanuit landbouwgronden in vier poldergebieden. Analyse van de bronnen. Alterra, Wageningen. Rapport 408.
- Hendriks, R.F.A., D.J.J. Walvoort and M.H.J.L. Jeuken, 2008. Evaluation of the applicability of the SWAP-ANIMO model for simulating nutrient loading of surface water in a peat land area. Calibration, validation, and system and scenario analysis for an experimental site in the Vlietpolder. Alterra, Wageningen. Report 619.
- Kroon, T, P. Finke, I. Peereboom en A. Beusen, 2001. Redesign STONE. De nieuwe schematisatie voor STONE: de ruimtelijke indeling en de toekenning van hydrologische en bodemchemische parameters. Lelystad, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer Afvalwaterbehandeling, Riza-rapport 2001.017.
- OECD, 2001. Environmental Indicators for Agriculture — Volume 3: Methods and Results, Publications Service, Paris, France
- Planbureau voor de Leefomgeving, 2008. Kwaliteit voor Later. Ex ante evaluatie Kaderrichtlijn Water. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Bilthoven. Publicatie 50014001/2008.
- Roelsma, J., B. van der Grift, H.M. Mulder en T.P. van Tol-Leenders, 2011. Nutriëntenhuishouding in de bodem en het oppervlaktewater van de Drentse Aa : bronnen, routes en sturingsmogelijkheden. Wageningen, Alterra, Rapport 2218.
- Schröder, J.J. and J.J. Neeteson, 2008. Nutrient management regulations in The Netherlands, *Geoderma* **144**, 418–425.
- Schoumans, O.F., J. Mol-Dijkstra, L.M. Akkermans and C.W.J. Roest, 2002. SIMPLE: assessment of non-point phosphorus pollution from agricultural land to surface waters by means of a new methodology. *Water Sci Technol.* **45** (9): 177 - 182.

-
- Van Boekel, E.M.P.M., L.V. Renaud, F.J.E. van der Bolt en P. Groenendijk, 2009. Bronnen van nutriënten in het landelijke gebied; Analyse van de bijdrage van de landbouw aan oppervlaktewaterkwaliteit met STONE 2.3 resultaten. Alterra, Wageningen. Rapport 1816.
- Van der Bolt, F.J.E., H.P. Oosterom, R.F.A. Hendriks en P. Groenendijk, 2007. Bronnen van nutriënten in het landelijke gebied. De bijdrage van landbouw aan oppervlaktewaterkwaliteit in perspectief. Alterra, Wageningen. Rapport 1483.
- Van der Bolt, F.J.E. en O.F. Schoumans (eds), 2012. Ontwikkeling van de bodem- en de waterkwaliteit. Evaluatie Meststoffenwet 2012: eindrapport ex-post. Alterra, Wageningen. Rapport 2318.
- Willigen, P. de, P. Cleij, H.P. Oosterom en C.G.J. Schotten, 2003. Lot van het stikstofoverschot. Analyse van STONE-berekeningen die zijn uitgevoerd in het kader van Evaluatie Meststoffenwet. Alterra, Wageningen. Rapport 732.



Alterra Wageningen UR
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wageningenUR.nl/alterra

Alterra-rapport 2328
ISSN 1566-7197



Alterra Wageningen UR is hét kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Alterra Wageningen UR
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 317 48 07 00
www.wageningenUR.nl/alterra

Alterra-rapport 2328
ISSN 1566-7197

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

