



Landelijk beeld van de fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater

Een analyse met het model PLEASE

Caroline van der Salm, Dennis Walvoort en Harry Massop



ALTERRA
WAGENINGEN UR

Landelijk beeld van de fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater

Een analyse met het model PLEASE

Caroline van der Salm, Dennis Walvoort en Harry Massop

Alterra Wageningen UR
Wageningen, november 2014

Alterra-rapport 2565
ISSN 1566-7197

Met het model PLEASE zijn kaarten gemaakt van de langjarig gemiddelde fosforuitspoeling naar het oppervlaktewater en de fosforconcentraties in het uitspoelende water. PLEASE berekent de P uitspoeling op basis van informatie over het fosfaatbindend vermogen, de fosfaattoestand en de hydrologie. Waarden voor het fosfaatbindend vermogen (oxalaat extraheerbaar Al+Fe gehalte) en de fosfaattoestand (Pw-getal) van de bovengrond en de ondergrond van Nederland zijn afgeleid uit het Bodemkundig Informatie Systeem van Alterra. Op basis van deze data zijn landdekkende kaarten gemaakt voor zowel de fosfaattoestand als het fosfaatbindend vermogen door relaties af te leiden tussen deze parameters en vlakdekkende informatie (bodemtype, Gt, landgebruik). Vervolgens zijn de verkregen kaarten verfijnd m.b.v., geostatistische simulaties waarbij gebruik gemaakt is van lokale meetgegevens. Gemiddeld voor heel Nederland (inclusief natuur) bedraagt de langjarig gemiddelde fosforuitspoeling 0,75 kg/ha/jr. De mediane waarde is circa 30% lager terwijl op 10% van de Nederlandse gronden de verliezen hoger zijn 1,7 kg/ha/jr. De gemiddelde concentratie in het uitspoelende water is 0,54 mg/l en de mediane waarde bedraagt 0,2 mg/l.

Maps of average long-term losses of phosphorus to surface waters have been made using the model PLEASE. PLEASE calculates the phosphorus losses using information on phosphate binding capacity of the soil, the phosphorus status and the hydrology. The phosphate binding capacity and the phosphorus status (water extractable P) of the topsoil and the subsoil were derived using data in the Dutch Soil Information System of Alterra. Relationships between the above parameters and map information (soiltype, groundwater table, land use) were derived and used to make maps of the phosphate binding capacity and P-status. These rough maps were refined by geostatistical simulations using local measurements. The average long-term phosphate loss to surface water in the Netherlands (including both nature and arable land) was 0.75 kg/ha/yr. Median values were 30% lower. Ten percent of the Dutch soils have losses of more than 1.7 kg/ha/yr. The average concentration in water leaching the soils was calculated to be 0.54 mg/l with a median value of 0.2 mg/l.

Trefwoorden: fosfaat, uitspoeling, Kader Richtlijn Water

Dit rapport is gratis te downloaden van www.wageningenUR.nl/alterra (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2013 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

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Het model PLEASE	9
3	Invoergegevens	11
3.1	Hydrologische gegevens	11
3.1.1	Grondwaterstands informatie	11
3.1.2	Neerslagoverschot en kwel	13
3.1.3	Aanwezigheid buisdrainage	18
3.2	Bodemkundige gegevens	19
3.2.1	Interpolatiemethodiek	19
3.2.2	Sorptieparameters	24
3.2.3	Achtergrondconcentraties	25
4	Fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater	27
4.1	Hydrologische gegevens	27
4.1.1	Waterafvoer naar het oppervlaktewater	27
4.2	Fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater	28
4.2.1	P-vrachten (totaal-P, ortho-P)	28
4.2.2	P concentraties (totaal-P, ortho-P)	32
5	Conclusies en aanbevelingen	35
	Literatuur	37

Samenvatting

De kwaliteit van het oppervlaktewater voldoet op veel plaatsen nog niet aan de in de Kader Richtlijn Water (KRW) gestelde normen. Dit geldt in het bijzonder voor de fosfaatconcentraties. In grote delen van Nederland is door een hoge bemesting in de afgelopen decennia fosfaat opgehoopt in de bodem (Schoumans, 2004a) wat leidt tot een verhoogde uitspoeling van fosfaat naar het oppervlaktewater. Door de grote fosfaatvoorraad in de bodem hebben de nu ingezette maatregelen, waarbij de mestgift is/wordt verminderd, op korte termijn maar beperkt effect op de uitspoeling van fosfaat. Binnen het Deltaplan Agrarisch Waterbeheer (DAW) wordt door waterschappen en het landbouwbedrijfsleven (LTO) gewerkt aan de implementatie van aanvullende maatregelen. Om dit proces efficiënt te laten verlopen is informatie nodig over de gebieden waar knelpunten (blijven) optreden met betrekking tot de waterkwaliteit (in het bijzonder P) bij het huidige en voorgenomen (5e Actieprogramma Nitraatrichtlijn) mestbeleid. In deze gebieden kan dan op basis van lokale kennis verder worden ingezoomd om hot-spots in beeld te brengen en om een dialoog te voeren met waterschappen en agrariërs om te bezien waar maatregelen zinvol en mogelijk zijn.

De emissies van fosfaat vanuit landbouwgronden naar het oppervlaktewater worden nu op landelijk schaal berekend met het nutriëntenemissiemodel STONE (Wolf *et al.*, 2005). In STONE wordt Nederland verdeeld in 6405 plots. De grootte van de plots varieert van 25 tot circa 21.500 ha (met een mediaanwaarde van 288 ha). De chemische eigenschappen van de 6405 plots zijn gebaseerd op maar 456 fysisch-chemische profielen. De informatie is hierdoor vrij grof en de ruimtelijke nauwkeurigheid is beperkt.

Door gebruik te maken van informatie uit het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) van Alterra kan met eenvoudige modellen met een beperkte databehoeft een gedetailleerder beeld worden geschetst waar zich knelpunten voordoen met betrekking tot fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater. De fosfaatverzadigingsgraad is een indicator voor het risico op hoge verliezen van fosfaat vanuit landbouwgronden. Gronden met een hoog risico worden aangeduid als 'fosfaatverzadigde gronden' (Van der Zee *et al.*, 1990 a en b; TCB, 1990; Breeuwsma en Schoumans, 1986; Reijerink en Breeuwsma, 1992; Schoumans *et al.*, 2004a). Met deze methodiek worden percelen of gebieden in kaart gebracht die een **potentieel** risico vormen voor de belasting van het oppervlaktewater. Afgelopen jaren is een eenvoudig model (PLEASE; Schoumans *et al.*, 2008, 2013) ontwikkeld waarmee de langjarig gemiddelde **actuele** fosfaatvrucht vanuit een perceel naar het oppervlaktewater kan worden berekend op basis van gegevens van het fosfaatbindend vermogen (oxalaat extraheerbaar Al+Fe; FeAl-ox), de fosfaattoestand van de bodem (Pw-getal) en enkele eenvoudige hydrologische kenmerken. Als geografisch gedifferentieerde gegevens van de fosfaattoestand voorhanden zijn, is het relatief simpel om met geringe rekentijd voor regio's of heel Nederland per 250x250m of 500x500m grid fosfaatvruchten te berekenen.

In dit project is een zo gedetailleerd mogelijk beeld vervaardigd van de actuele langjarig gemiddelde fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater door het model PLEASE toe te passen op basis van informatie uit het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS). In BIS zijn ruim 15.000 gegevens beschikbaar van het fosfaatbindend vermogen (FeAl-ox) verdeeld over 4000 locaties. Voor de fosfaattoestand (Pw-getal) zijn minder data beschikbaar (circa 4000 gegevens, 2000 locaties). Deze dataset kon echter worden vergroot door voor punten waar data ontbraken het Pw-getal af te leiden uit data over oxalaat extraheerbaar fosfaat (Chardon, 1994).

De geïnterpoleerde informatie uit het BIS is verwerkt in de vorm van landdekkende kaarten van het Pw-getal en het fosfaatbindend vermogen. Bij het afleiden zijn relaties opgesteld tussen het Pw-getal en FeAl-ox enerzijds en beschikbare landdekkende informatie (bodemtype, landgebruik, etc.). Hiervoor zijn zogenaamde 'random forests' (Breiman, 2001) gebruikt. Dit zijn niet-lineaire modellen die bekend staan om hun goede voorspellende eigenschappen. Het model voor het Pw-getal heeft de diepte, het bodemtype, het landgebruik en de GLG als invoer. Dit model verklaart circa 54% van de

variatie in het Pw-getal. Het model voor FeAl-ox heeft de diepte en het bodemtype als invoer. Dit model verklaart circa 31% van de variatie in FeAl-ox. Dit globale beeld van het Pw-getal en FeAl-ox is vervolgens verfijnd op basis van locatie-specifieke Pw en FeAl-ox gegevens. Om de nauwkeurigheid van de resulterende kaarten te maximaliseren wordt gebruik gemaakt van geostatistische simulatie. De specifieke methode die we gebruiken is een variant van sequentiële Gaussische simulatie met een externe drijvende kracht' (Goovaerts, 1997). Voor elke bodemeigenschap en diepte zijn 100 realisaties (kaartbeelden) gesimuleerd. De afzonderlijke realisaties zijn gebruikt als invoer voor PLEASE.

Het model PLEASE maakt naast de hier bovengenoemde kaarten gebruik van landdekkende informatie van het neerslagoverschot, kwel, grondwaterstanden en de aanwezigheid van buisdrainage. Het neerslagoverschot en de kwel zijn afgeleid uit de STONE-hydrologie (van Bakel et al, 2007). Grondwaterstanden (GHG en GLG) zijn gebaseerd op van der Gaast (2010). De aanwezigheid van buisdrainage is gebaseerd op gegevens in het NHI (Massop *et al.*, 2013).

De berekende langjarige gemiddelde fosforuitspoeling bedraagt 0,75 kg/ha/jr. De mediane waarde is circa 30% lager terwijl op 10% van de Nederlandse gronden de verliezen hoger zijn 1,7 kg/ha/jr. De langjarige gemiddelde totaal-P concentratie in het uitspoelende water is 0,54 mg/l en de mediane waarde bedraagt 0,2 mg/l. Bij de bovenstaande berekeningen is gebruik gemaakt van fosfaatsorptieparameters die gebruikt worden in het model STONE. Een recente analyse van sorptie proeven (Koopmans en van der Salm, 2011) geeft aan dat de sorptieparameters mogelijk lager zijn dan de waarden die nu in STONE worden gebruikt. Indien deze parameters gebruikt worden zijn de gevonden vrachten en concentraties circa 1,5 tot 2 maal hoger dan bij het gebruik van STONE parameters.

1 Inleiding

De kwaliteit van het oppervlaktewater voldoet op veel plaatsen nog niet aan de in de Kader Richtlijn Water (KRW) gestelde normen. Om de doelstellingen van de Kader Richtlijn Water te realiseren zijn in een deel van Nederland maatregelen noodzakelijk om de belasting van het oppervlaktewater vanuit de landbouw te verminderen. Dit geldt in het bijzonder voor de uitspoeling van fosfaat. In grote delen van Nederland is door een hoge bemesting in de afgelopen decennia fosfaat opgehoopt in de bodem (Schoumans, 2004a). Dit kan leiden tot een verhoogde uitspoeling van fosfaat naar het oppervlaktewater. Doordat fosfaat zich heeft opgehoopt in de bodem hebben de nu ingezette maatregelen, waarbij de mestgift is/wordt verminderd, op korte termijn maar beperkt effect op de uitspoeling van fosfaat. Binnen het Deltaplan Agrarisch Waterbeheer (DAW) wordt door waterschappen en het landbouwbedrijfsleven (LTO) gewerkt aan de implementatie van aanvullende maatregelen. Om dit proces efficiënt te laten verlopen is informatie nodig in welke gebieden er knelpunten (blijven) optreden met betrekking tot de waterkwaliteit (in het bijzonder P) bij het huidige en voorgenomen (5e Actieprogramma Nitraatrichtlijn) mestbeleid. In deze gebieden kan dan op basis van lokale kennis verder worden ingezoomd om hot-spots in beeld te brengen en om in dialoog te komen met de waterschappen en de lokale agrariërs om te bezien waar maatregelen zinvol en mogelijk zijn.

De emissies van fosfaat vanuit landbouwgronden naar het oppervlaktewater worden nu op landelijk schaal berekend met het nutriëntenemissiemodel STONE (Wolf *et al.*, 2005). In STONE wordt Nederland verdeeld in 6405 plots. De grootte van de plots varieert van 25 tot circa 21.500 ha (met een mediaanwaarde van 288 ha). De chemische eigenschappen van de 6405 plots zijn gebaseerd op maar 456 fysisch-chemische profielen. De informatie is hierdoor vrij grof en de ruimtelijke nauwkeurigheid is beperkt.

Een indicatie van de risico's op hoge verliezen van fosfaat vanuit landbouwgronden kan ook verkregen worden op basis van de verzadigingsgraad. Gronden met een hoog risico worden aangeduid als 'fosfaatverzadigde gronden' (Van der Zee *et al.*, 1990 a en b; TCB, 1990; Breeuwsma en Schoumans, 1986; Reijerink en Breeuwsma, 1992; Schoumans *et al.*, 2004a). Bij deze methodiek wordt de hydrologische situatie gekarakteriseerd aan de hand van de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG). De fosfaatverzadiging wordt in beeld gebracht door de minerale fosfaathopning in de bodem te relateren aan de maximale capaciteit van de bodem om fosfaat te binden (fosfaatbindend vermogen van de bodem). Voor kalkarme zandgronden is afgeleid dat de fosfaatconcentraties in het bovenste grondwater (GHG) op termijn hoger zal zijn dan 0,15 mg totaal-P L⁻¹ en 0,10 mg ortho-P L⁻¹ indien de fosfaatverzadigingsgraad van de bovengrond (maaierveld tot GHG) hoger is dan 25% (Van der Zee, 1990 a en b). Met deze methodiek worden percelen of gebieden in kaart gebracht die een potentieel risico vormen voor de belasting van het oppervlaktewater. Deze methode is in 2004 gebruikt voor het vervaardigen van landelijke kaarten voor fosfaatverzadigde gronden (Schoumans, 2004a). Hiervoor is gebruik gemaakt van data van 1392 locaties van de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK) waarop de fosfaattoestand en het fosfaatbindend vermogen zijn bepaald. Deze cijfers zijn geclusterd tot 95 strata (combinaties van bodemtype en grondwatertrap). De geografische differentiatie van deze kaart is dus zeer beperkt, immers er zijn slechts 95 waarden voor de fosfaattoestand als functie van de diepte in de bodem. Bovendien geeft deze methode slechts een beeld van de potentiële risico's en niet van de actuele verliezen van fosfaat naar het oppervlaktewater.

Afgelopen jaren is een eenvoudig model (PLEASE; Schoumans *et al.*, 2008, 2013) ontwikkeld waarmee de actuele fosfaatvrucht vanuit een perceel naar het oppervlaktewater kan worden berekend op basis van gegevens van de fosfaattoestand van de bodem en enkele eenvoudige hydrologische kenmerken. Door de geringe rekentijd en beperkte databehoeft is het relatief simpel om met dit soort modellen in te zoomen naar de regionale schaal en uitspraken te doen op bijvoorbeeld 250*250m of 500*500 m indien het model gevoed wordt met geografisch gedifferentieerde data van de fosfaattoestand.

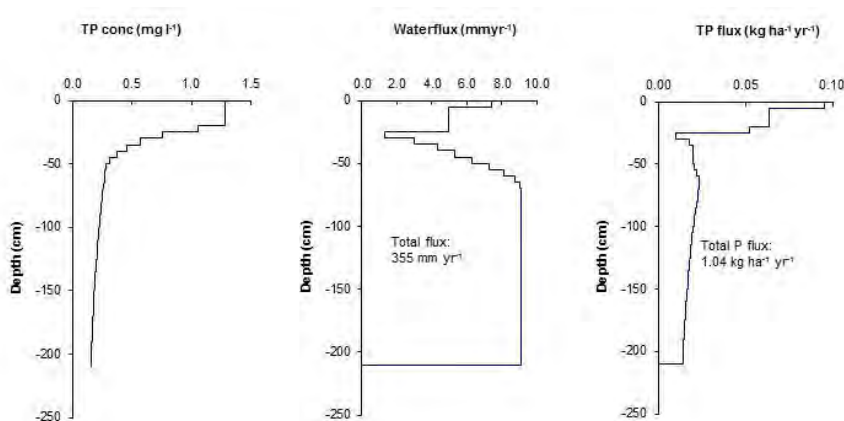
Om een beter en zo gedetailleerd mogelijk beeld te krijgen van de fosfaattoestand van de bodem kan gebruik gemaakt worden van geavanceerde geostatistische simulatietechnieken (Goovaerts, 1997). Met deze methode kan een veel gedetailleerder beeld worden verkregen dan met traditionele stratificatietechnieken doordat de data niet geclusterd worden, zoals noodzakelijk was voor het produceren van de kaart van fosfaatlekkende gronden. Hierdoor kan de variatie in de ruimte veel beter worden verdisconteerd. Bovendien kunnen naast de data uit de Landelijke Steekproef Kaarteenheden ook andere data gebruikt worden die in het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) van Alterra aanwezig zijn. Het totaal aantal locaties waarop de kaart gebaseerd kan worden neemt hierdoor toe van de ruim 1300 locaties in de LSK naar een totaal van circa 3000 tot 4000 locaties.

Voor het vervaardigen van een zo gedetailleerd mogelijk beeld van de actuele fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater is in dit project gekozen voor het maken van een kaart van de fosfaatuitspoeling met het model PLEASE op basis van informatie uit het Bodemkundig Informatie Systeem.

In hoofdstuk twee zal een korte toelichting worden gegeven op de werking van het model PLEASE. In hoofdstuk drie wordt beschreven op welke wijze de benodigde invoergegevens zijn verkregen. In hoofdstuk vier worden de geconstrueerde kaarten gepresenteerd en worden de verkregen resultaten toegelicht.

2 Het model PLEASE

Het model PLEASE (Phosphorus Leaching from Soils to the Environment) is een statisch model dat de langjarige gemiddelde fosfaatbelasting van het oppervlaktewater berekent. Het model maakt gebruik van eenvoudig te meten perceelskenmerken, zoals grondwaterstand, fosfaattoestand (bodemvruchtbaarheid) en fosfaatbindend vermogen van de bodem. Het model is gebaseerd op het feit dat 70-90% van het fosfaat in de bodem in anorganische vorm aanwezig is als gevolg van de hoge fosfaatbelasting van de bodem in het verleden. Op basis hiervan is aangenomen dat de fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater beschreven kunnen worden aan de hand van: 1) de sorptie van fosfaat aan de bodem; 2) een eenvoudige empirische relatie voor het bepalen van organisch opgelost fosfaat in de bodem; 3) en een eenvoudig model dat het laterale watertransport door de bodem beschrijft. De procesformulering voor de binding van anorganisch fosfaat is volledig gebaseerd op de formulering voor evenwichtssorptie zoals deze ook in het nationale nutriënten-emissiemodel STONE (Wolf *et al.*, 2005) wordt gebruikt. Hierbij wordt dus impliciet verondersteld dat de tijdsafhankelijke sorptieprocessen zoals die in STONE worden beschreven een verwaarloosbare invloed hebben op de gemiddelde lange termijn fosfaatconcentraties bij een bepaalde fosfaattoestand van de bodem. De concentraties van organisch fosfaat worden berekend met een simpele regressievergelijking (Chardon *et al.*, 2007).



Figuur 1 Voorbeeld van de met PLEASE berekende verloop van de P-totaal concentraties, de waterflux en de afvoerflux van fosfaat naar het oppervlaktewater.

PLEASE berekent de fosfaatvrucht uit een perceel naar de perceelssloot door het verloop van de fosfaatconcentratie met de diepte in de bodem te combineren met de waterafvoer uit de verschillende bodemlagen naar het oppervlaktewater (figuur 1). Voor de berekening van het verloop van de fosfaatconcentraties met de diepte wordt gebruik gemaakt van de fosfaattoestand van de bodem (Pw-getal van de bodemlaag van 0-20 cm en de laag van 20-50 cm) en het fosfaatbindend vermogen van de bodem en de achtergrondconcentratie van fosfaat op een diepte van 1 meter onder de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). Voor de bovenste bodemlaag (0-20 cm) wordt aangenomen dat deze homogeen is door regelmatige grondbewerking, mestinjectie en bioturbatie. De fosfaatconcentratie in deze bodemlaag kan berekend worden uit het Pw-getal en het fosfaatbindend vermogen door gebruik te maken van de procesformulering voor de sorptie van fosfaat (Langmuir vergelijking). Voor de ondiepe ondergrond (20-50 cm) wordt, gezien de sterke binding van fosfaat in de bodem, verondersteld dat de fosfaatconcentratie exponentieel afneemt met de diepte. De mate van afname wordt bepaald aan de hand van de fosfaattoestand van de tweede bodemlaag. Beneden de 50cm

neemt de fosfaatconcentratie verder exponentieel af totdat de concentratie gelijk is aan de achtergrond concentratie.

De waterafvoer naar het oppervlaktewater is gelijk aan het netto neerslagoverschot plus de kwel en wegzijging (negatief). De waterafvoer wordt verdeeld met de diepte op basis van grondwaterstandsduurlijnen (Van der Sluijs, 1982). Deze duurlijnen geven aan hoe lang de grondwaterstand gedurende het jaar zich op een bepaalde diepte bevindt. Op basis van dit grondwaterstand verloop kunnen de waterfluxen als functie van de diepte worden berekend (Schoumans *et al.*, 2008). De uiteindelijke fosfaatafvoer wordt berekend door voor elke bodemlaag de waterflux te vermenigvuldigen met de berekende concentraties.

Een uitgebreide beschrijving van het model wordt gegevens in Schoumans *et al.*, 2008 en Schoumans *et al.*, 2013. Het model is uitgebreid getoetst op veldschaal (van der Salm *et al.*, 2011) en daarnaast zijn de modeluitkomsten vergeleken met de lange termijn resultaten van STONE (van der Salm en Schoumans, 2010).

3 Invoergegevens

Voor het berekenen van de P uitspoeling met PLEASE zijn de volgende gegevens nodig:

Hydrologische gegevens:

1. Grondwaterstands informatie: GHG en GLG.
2. Netto neerslagoverschot (langjarig gemiddelde).
3. Kwel (langjarig gemiddelde).
4. De aanwezigheid en de diepteligging van drainage buizen.

Bodem gegevens:

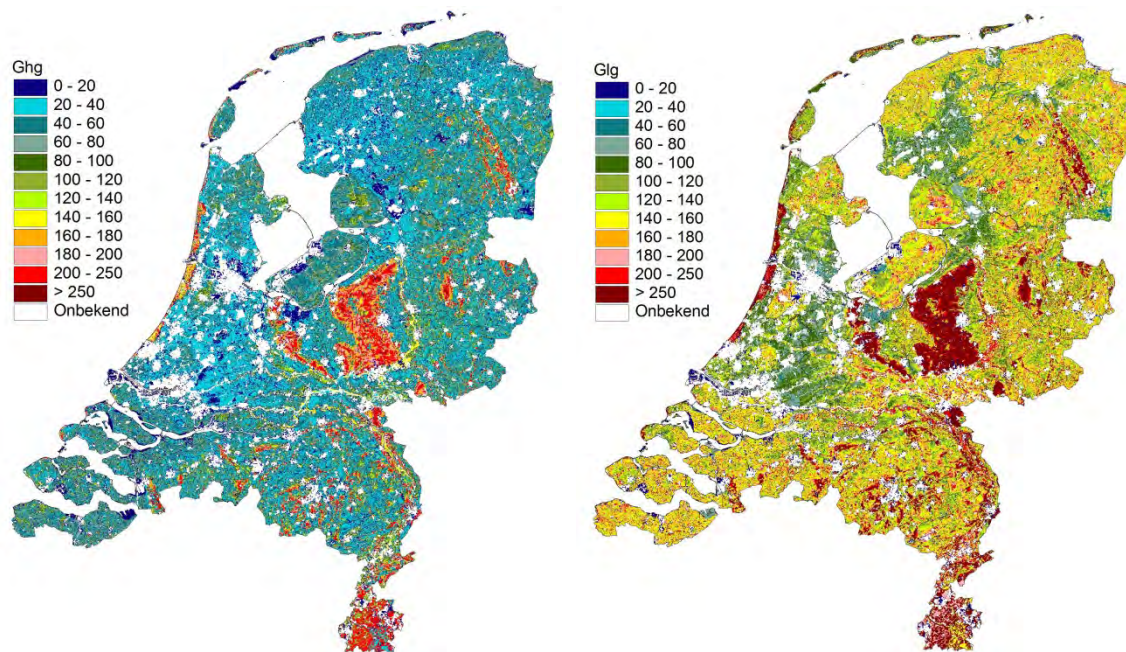
1. Bulkdichtheid van de bodem als functie van de diepte (0-20 cm, 20-50 cm en 50 cm-GLG+1m).
2. Achtergrondconcentratie van P in grondwater op 1 meter onder de GLG.
3. Kaart van fosfaatbindend vermogen (Al+Fe gehalte) als functie van de diepte (0-20 cm, 20-50 cm en 50cm-GLG+1m).
4. P-toestand (Pw-getal) als functie van de diepte (0-20 cm, 20-50 cm).

De gegevens zijn beschikbaar of afgeleid in de vorm van kaarten met een resolutie van 250 x 250 m. Daarnaast zijn gegevens nodig van de sorptiekarakteristieken van de bodem voor fosfaat.

3.1 Hydrologische gegevens

3.1.1 Grondwaterstands informatie

De noodzakelijke grondwaterstands informatie kan worden onderscheiden in de Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand (GHG), de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) en de grondwatertrap (GT). Door Van der Gaast *et al.* (2010) zijn op basis van de kansverdeling (gemiddelde en standaarddeviatie) van de GHG en de GLG binnen een bodem-GT-vlak, in combinatie met de hoogteverdeling van de AHN1, 25 m gridkaarten afgeleid voor de GHG en GLG in cm-mv. Uit de GHG en GLG is vervolgens de GT bepaald. Bij de kansverdeling voor de GHG en de GLG is ook een stukje verdroging meegenomen, doordat niet de zogenaamde tabel van Van der Sluis (1990) is gebruikt, maar een nieuwe tabel is afgeleid. Voor een aantal gebieden ontbrak grondwaterstandinformatie, zoals voor de uiterwaarden. Om toch een schatting te hebben voor de bodems waarvoor geen GT is gekarteerd, is door een bodemkundige (H. Vroon) een schatting gemaakt van de bijbehorende GT. Als GHG en GLG is vervolgens het klassenmidden genomen. Voor Zuid-Limburg ontbreekt de GT in de bodemkaart, voor dit gebied heeft Van der Gaast al een inschatting gemaakt van de GHG, GLG en GT (Van der Gaast *et al.*, 2010). De opgeschaalde GHG- en GLG-waarden zijn weergegeven in figuur 2.



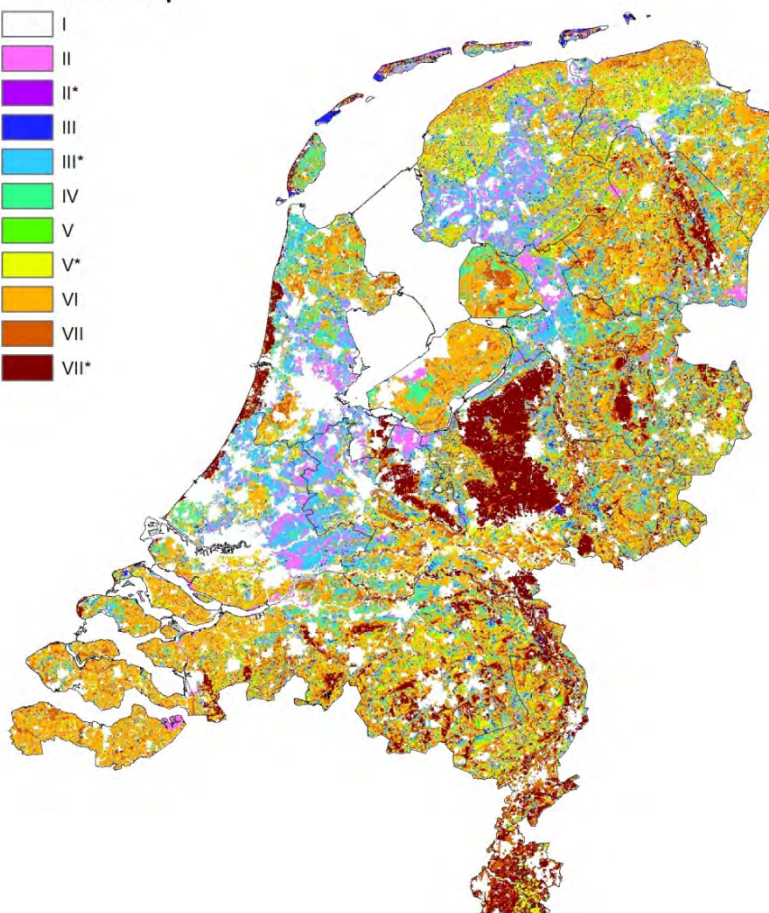
Figuur 2 GHG en GLG

De GHG en GLG zijn vertaald naar een grondwatertrap (figuur 3).

Legenda

Grondwatertrap

- I
- II
- II*
- III
- III*
- IV
- V
- V*
- VI
- VII
- VII*



Figuur 3 Grondwatertrappen.

3.1.2 Neerslagoverschot en kwel

Gegevens over neerslagoverschot en kwel zijn ontleend aan STONE (Kroon *et al.*, 2001). STONE is het nutriëntenuitspoelingsmodel dat in samenwerking tussen Alterra, RIZA en RIVM is ontwikkeld. Hiertoe is een ruimtelijke schematisatie van het topsysteem gemaakt, o.a. op basis van meteodistrict en landgebruik en bodem en worden 6405 plots onderscheiden. Voor deze plots zijn hydrologische berekeningen, incl. gemiddeld jaarlijks neerslagoverschot en kwel, beschikbaar (van Bakel *et al.*, 2007).

De grootte van het neerslagoverschot wordt onder andere bepaald door het landgebruik, de complete hydrologische situatie (GT) en de meteoregio. Voor het gebruik van de STONE gegevens in PLEASE zijn de resultaten van STONE geclusterd naar landgebruik, GT klasse en meteodistrict zodat voor elke PLEASE grid van 250 x 250 m een zo goed mogelijk koppeling gelegd kon worden tussen de lokale omstandigheden (landgebruik, GT, meteo) en de hydrologie.

In STONE worden de volgende landgebruiksvormen onderscheiden:

- Gras
- Mais
- Akkerbouw
- Loofbos
- Naaldbos
- Heide (Overig natuur)

De verdeling van neerslag en referentiegewasverdamping in Nederland is niet uniform. Aan de kust is de verdamping groter dan landinwaarts en zijn er qua neerslag drogere (bijv. Oost-Brabant) en nattere gebieden (Veluwe) te onderscheiden waartussen de gemiddelde jaarlijkse neerslag meer dan 150 mm per jaar kan verschillen (Sluijter *et al.*, 2011). Om rekening te houden met de ruimtelijke verschillen voor de meteo is gebruik gemaakt van de KNMI-districtsindeling van Nederland in 15 districten. Bij de hydrologische parameterisering van de 6405 plots zijn meteo-data toegekend onderscheiden naar KNMI-districten; hierbij is het Waddendistrict opgesplitst en gedeeltelijk samengevoegd met district Noord-Holland en gedeeltelijk met Friesland.

Voor deze studie zijn de rekenresultaten van STONE over 30 jaar (1981-2010) voor 6405 plots geclusterd op basis van landgebruik, meteoregio en Gt. Voor deze clusters is de grondwateraanvulling en de kwel op 1m – GLG-niveau afgeleid uit de STONE-berekeningen.

In tabel 1 is een voorbeeld gegeven van kwel, grondwateraanvulling en drainage afgeleid uit STONE berekeningen voor enkele clusters gelegen binnen meteoregio 2 (Friesland), met landgebruik gras voor verschillende GT's.

Tabel 1

Voorbeeld van de grootte van de gemiddelde jaarlijkse kwel, grondwateraanvulling en drainage voor ruimtelijke clusters van meteodistrict-landgebruik-GT.

Meteodistrict	Landgebruik	GT	Kwel mm / jaar	Grondwater- aanvulling mm / jaar	Drainage mm / jaar
2	gras	I	170	400	584
2	gras	II	-1	364	396
2	gras	II*	164	345	542
2	gras	III	-59	346	305
2	gras	III*	152	341	497
2	gras	IV	148	342	492
2	gras	V	-78	336	261
2	gras	V*	-87	329	244
2	gras	VI	-143	351	211
2	gras	VII	-161	336	182
2	gras	VII*	-332	356	20

De bovenstaande informatie over het neerslagoverschot en de kwel kan gekoppeld worden aan kaarten van het meteodistrict, landgebruik en Gt.

Meteodistrict

Om de ruimtelijke variatie in neerslag en referentiegewasverdamping mee te nemen is aangesloten bij de KNMI-districtsindeling. Het KNMI onderscheidt 15 districten. Er is geen GIS-kaart beschikbaar met de KNMI-districtsindeling. Voor het NHI is een indeling in 14 districten (figuur 4) beschikbaar die goed overeenkomt met de KNMI-districtsindeling (en vergelijkbaar is met de indeling die bij de schematisatie van STONE is gebruikt). Alleen is het Waddendistrict opgesplitst en gedeeltelijk samengevoegd met district Noord-Holland en voor het overige deel met Friesland. Het bestand is een 250 m grid, dit komt overeen met de resolutie voor PLEASE.

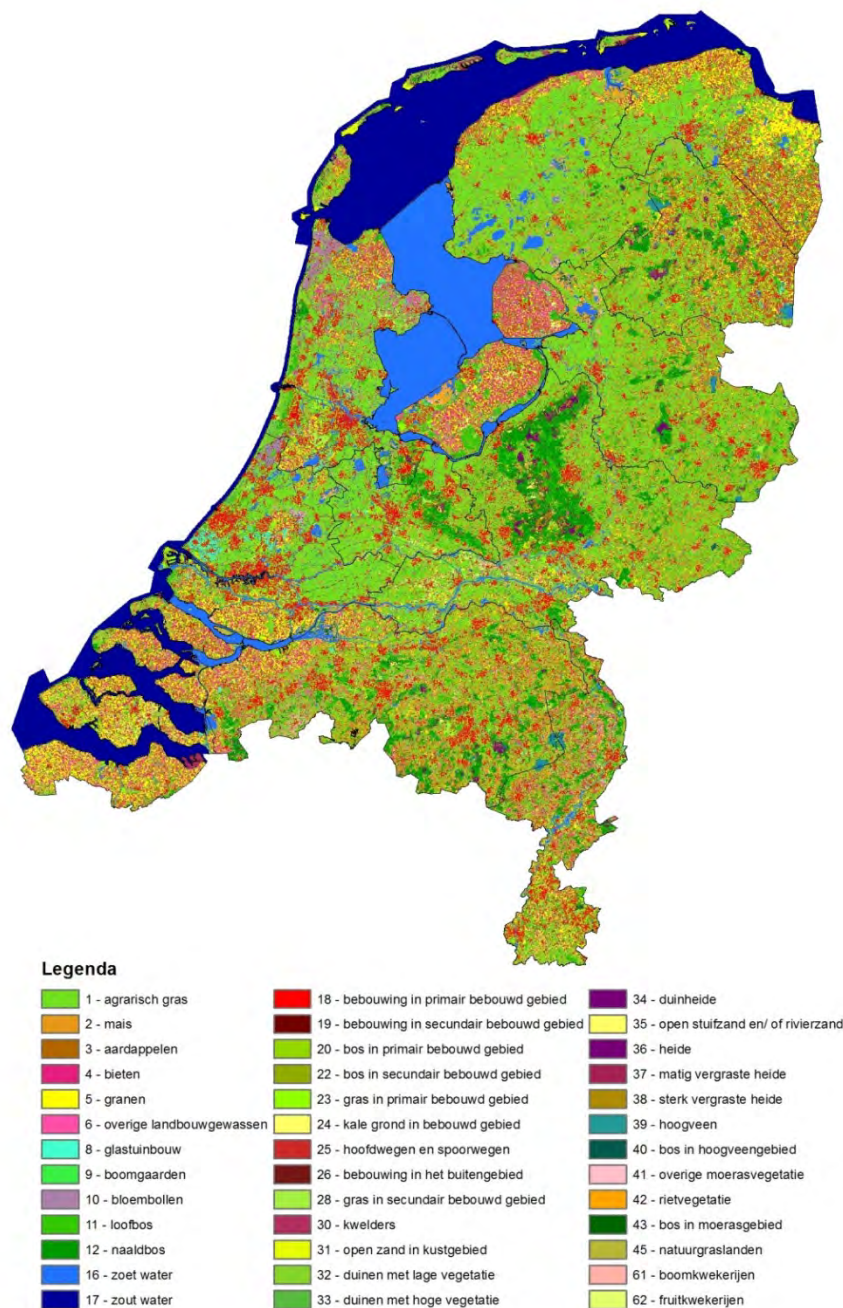


Figuur 4 Indeling in meteodistricten

Landgebruik

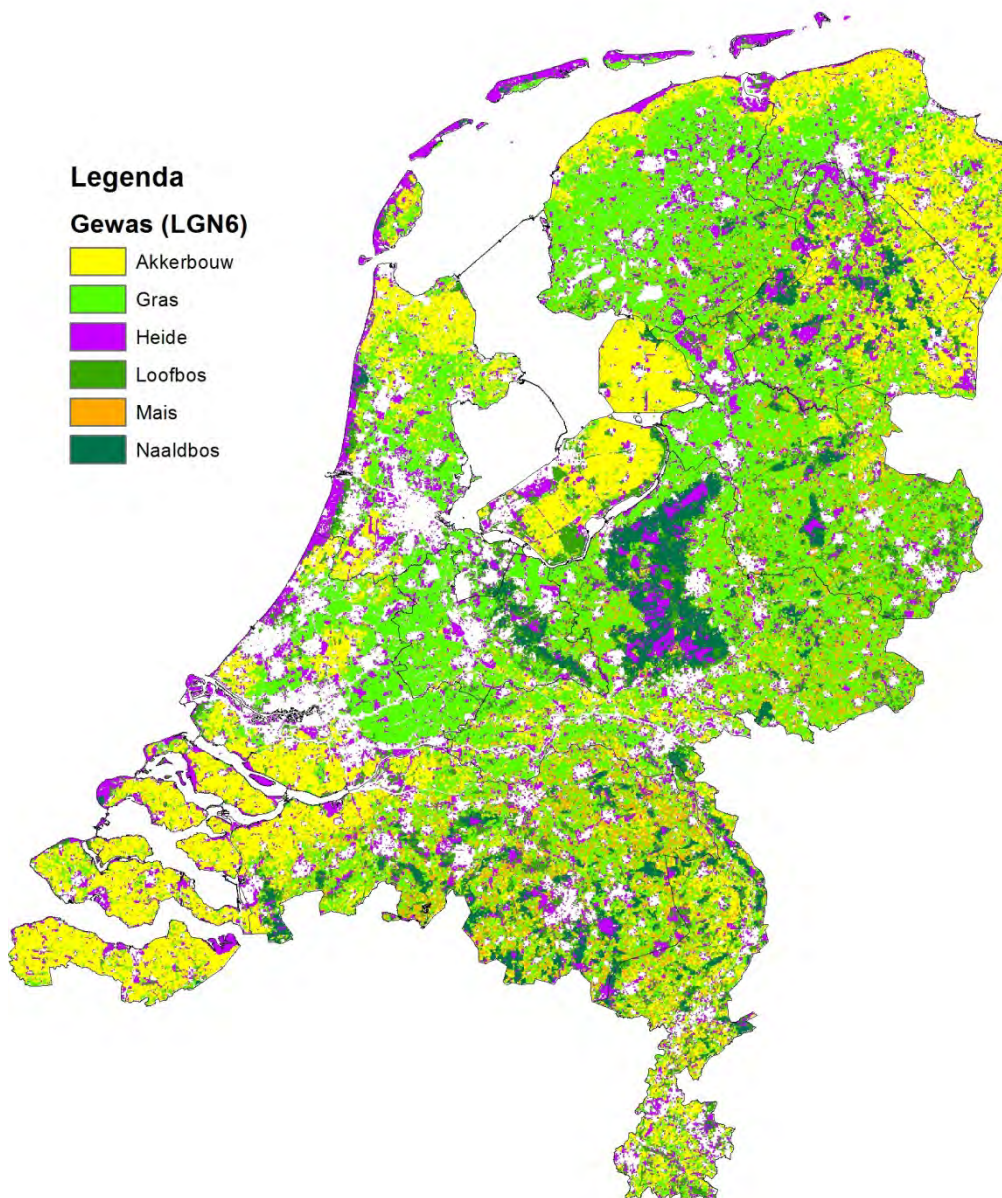
Voor het landgebruik kan gebruik gemaakt worden van LGN6 dat gebaseerd is op satellietbeelden uit 2007/2008 (Hazeu *et al.* 2010). LGN6 onderscheidt 39 typen landgebruik (figuur 5), deze zijn geclusterd tot de zes landgebruikstypen die in STONE zijn onderscheiden, nl. gras, mais, akkerbouw, loofbos, naaldbos, natuur (heide). Daarnaast worden stedelijk gebieden en water onderscheiden, deze worden verder niet meegenomen. LGN6 is een 25 m grid. Voor PLEASE wordt gerekend met 250 m grids, daarvoor is het landgebruik opgeschaald naar 250 m grids. Bij de toekenning van het landgebruik aan een 250 m gridcel wordt in principe uitgegaan van het dominante landgebruik. Bij deze aanpak komt de landelijke verdeling van het areaal volgens de oorspronkelijke kaart, 25 m grid, niet overeen met het hieruit afgeleide 250 m grid. Om de arealen in overeenstemming te brengen is voor een beperkt aantal gridcellen niet het dominante landgebruik toegekend. De landgebruiksvormen

met een tekort aan areaal zijn aangevuld ten koste van de vormen van landgebruik die te veel areaal hebben. Voor de aanvulling van het areaal zijn gridcellen geselecteerd met een relatief groot aandeel van het betreffende landgebruik maar net iets kleiner dan het dominante landgebruik. Op deze wijze is een klein deel van het landgebruik aangepast, zodat het landelijk areaal van de onderscheiden landgebruiksvormen op basis van het LGN6 25m grid overeenkomt met het 250 m grid.



Figuur 5 LGN6, de basiskaart voor clustering naar 6 landgebruiksvormen.

Het resultaat van de vertaling van LGN6 naar 6 landgebruiksvormen en vervolgens de opschaling naar grids van 250 m is weergegeven in figuur 6.



Figuur 6 Ruimtelijke ligging van de zes onderscheiden landgebruiksvormen.

Tabel 2

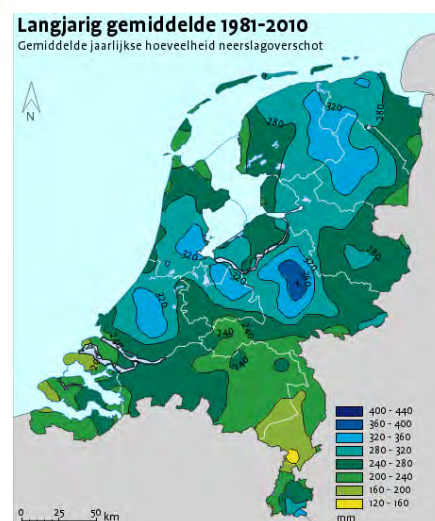
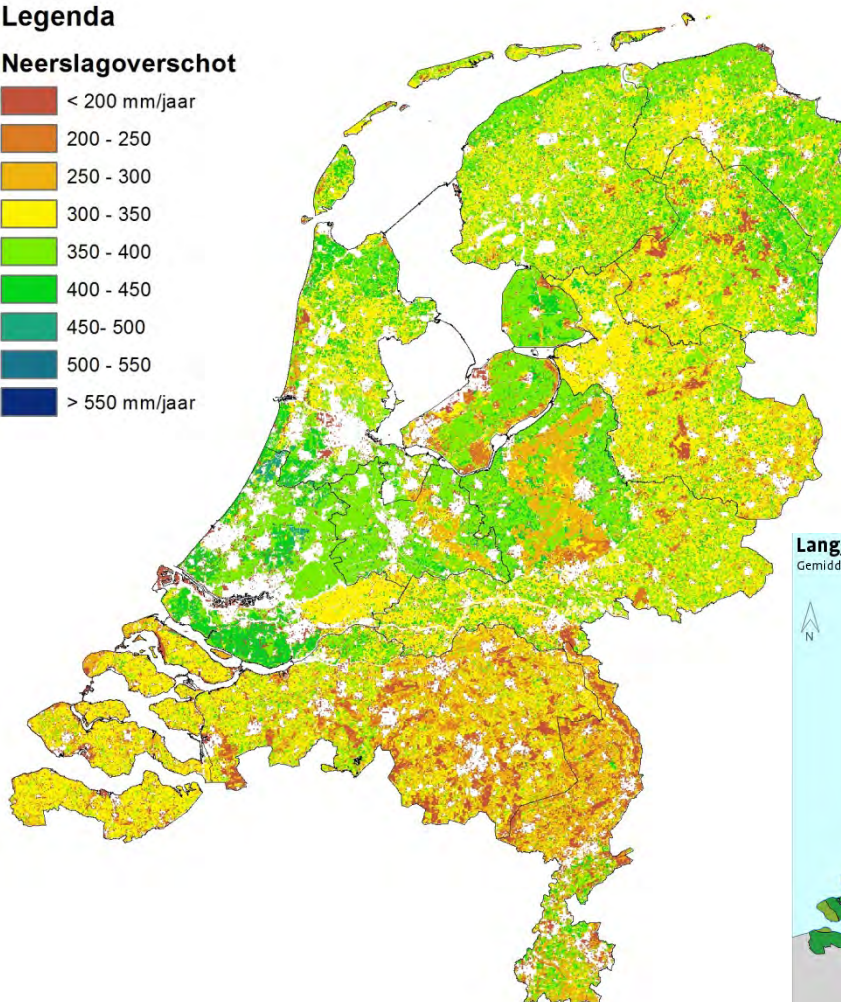
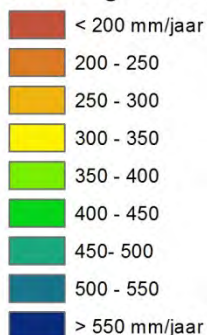
Verdeling landgebruik over zes onderscheiden landgebruiksvormen.

Herklassificatie_LGN6	ha
Akkerbouw	703027
Gras	1153563
Loofbos	201584
Loofbos	32613
Mais	266336
Naaldbos	152821
Natuur (heide)	461325
Totaal	2971269

Voor het neerslagoverschot wordt gebruik gemaakt van de modelresultaten van STONE (tabel 1). Met behulp van de kaarten uit figuur 3, 4 en 6 is per gridcel de combinatie meteodistrict-landgebruik-GT af te leiden. Door koppeling met de modelresultaten zoals weergegeven in tabel 1 is een kaart gemaakt van het neerslagoverschot (figuur 7).

Legenda

Neerslagoverschot



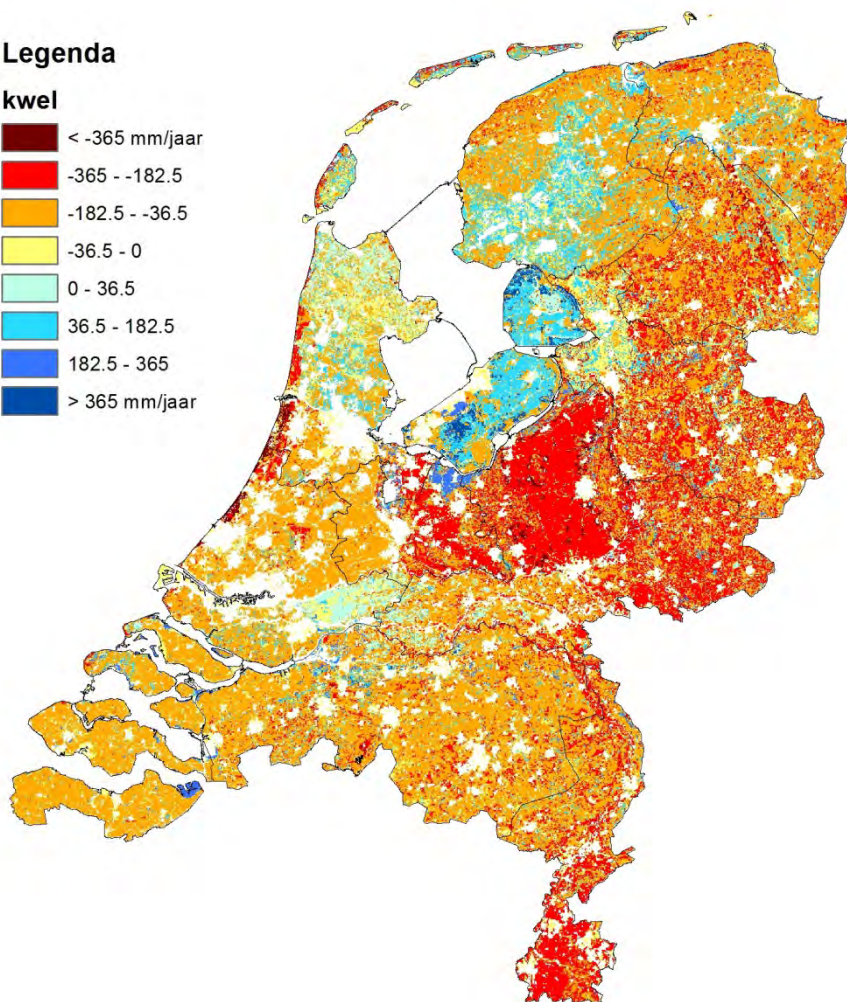
Figuur 7 Neerslagoverschot berekend met STONE en toegekend aan de ruimtelijke schematisatie zoals gebruikt in PLEASE (links) en de verdeling van het langjarig gemiddelde neerslagoverschot (Sluijter et al., 2011).

De laagste grondwateraanvullingen (< 200 mm/jaar) worden gevonden bij landgebruiksvorm naaldbos. Verder valt op de geringere grondwateraanvulling in Oost-Brabant en Noord-Limburg, dit is het gebied waar de minste neerslag in Nederland valt.

Op dezelfde wijze als voor het neerslagoverschot zijn de waarden voor de kwelfluxen uit STONE ruimtelijk toegekend (figuur 8). Voor dit doel zijn de kwelfluxen in STONE berekend op een diepte van 1 m – GLG niveau. Het grootste deel van Nederland laat infiltratie zien. In de stuwvalgebieden van de Veluwe, Utrechtse Heuvelrug en het lössgebied van Zuid-Limburg zijn weinig drainagemiddelen en wordt het neerslagoverschot grotendeels via dieper grondwater afgevoerd. Opvallend is de grote wegzijging (negatieve waarden) in het oostelijk deel van Nederland. Kwel komt vooral voor in de IJsselmeerpolders, Noord-Holland, Friese veenweidegebied en de Alblasserwaard en Vijfheerenlanden.

Legenda

kwel

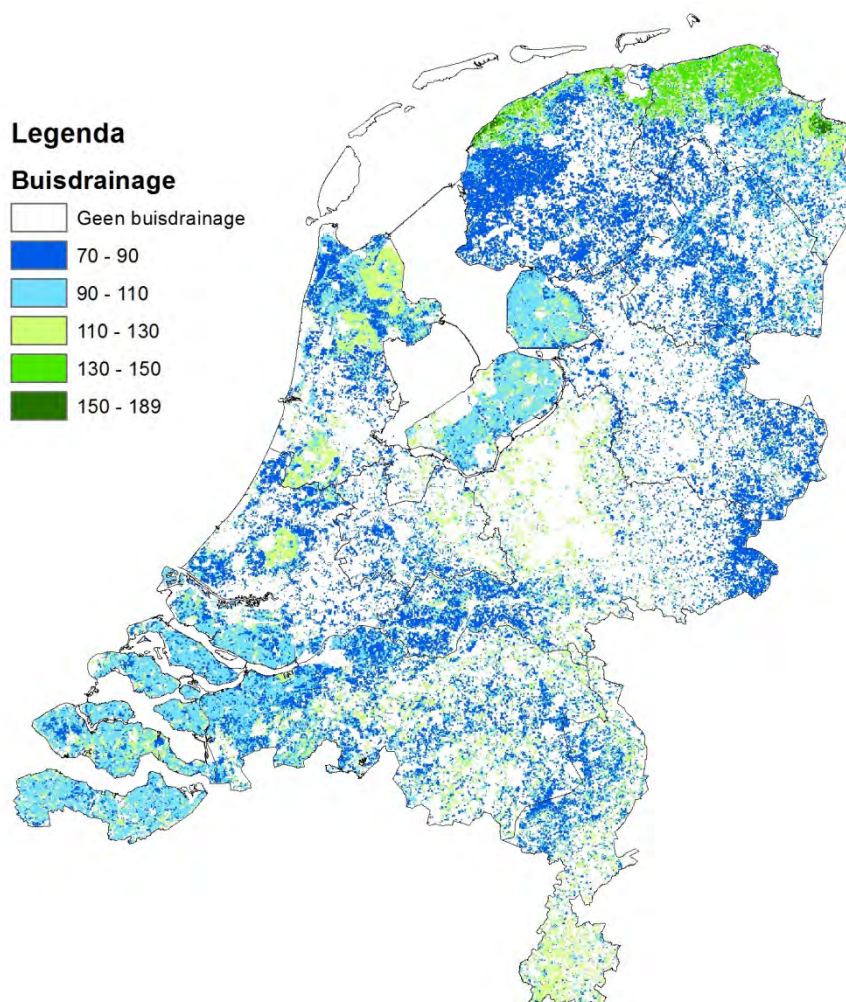


Figuur 8 Kwel berekend met STONE en toegekend aan de ruimtelijke schematisatie zoals gebruikt in PLEASE. Negatieve getallen duiden op wegzijging.

3.1.3 Aanwezigheid buisdrainage

De aanwezigheid van buisdrainage is een belangrijk kenmerk voor het berekenen van de P-uitspoeling naar het oppervlaktewater. Voor de bepaling of een perceel is gedraineerd is gebruik gemaakt van de buisdrainagekaart uit het NHI (figuur 9). Deze kaart is afgeleid van de recent afgeleide buisdrainagekaart op basis van de metingen van 2010 (Massop *et al.*, 2013). De buisdrainagekaart in het NHI geeft buisdrainage voor grids van 250 x 250 m. De diepte van de buisdrainage in het NHI is gegeven in m +NAP, de diepte is met behulp van het maaiveldhoogtebestand van het NHI omgerekend naar een diepte t.o.v. maaiveld. Voor een aantal gridcellen worden uit het NHI zeer ondiepe draindiepten afgeleid. Voor deze gridcellen is de draindiepte op 70 cm-mv gesteld.

Buisdrainage komt vooral voor in kleigebieden, in het Oostelijk Zandgebied en in gebieden met ondiepe slecht doorlatende lagen zoals Drenthe (keileem), Noord-Brabant (beekleem) en Oost-Nederland (ondiepe geohydrologische basis). Vooral in de zeekleigebieden in Friesland en Groningen worden grotere draindiepten (> 120 cm-mv) toegepast.



Figuur 9 Voorkomen en diepte buisdrainage.

3.2 Bodemkundige gegevens

Het PLEASE model heeft vlakdekkende invoerbestanden nodig van water-extraheerbaar fosfor (Pw-getal, mg/l, P_2O_5) en oxalaat-extraheerbaar ijzer en aluminium (FeAl-ox, mmol/kg). Het Pw-getal is een maat voor het voor het gewas gemakkelijk beschikbare fosfaat in de bodem. FeAl-ox is bepalend voor het fosfaatbindend vermogen van de bodem.

3.2.1 Interpolatiemethodiek

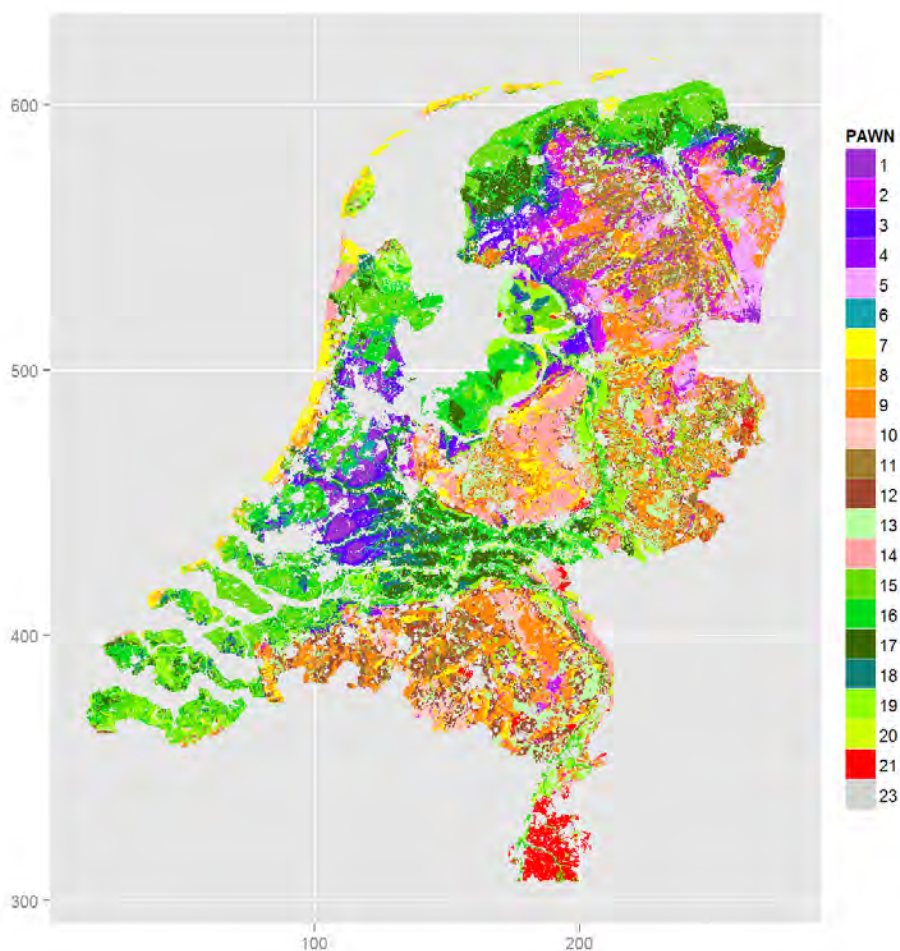
Gegevens over het fosfaatbindend vermogen (FeAl-ox) en de fosfaattoestand (Pw-getal) zijn voor een groot aantal locaties in Nederland bepaald en opgeslagen in het bodemkundig informatiesysteem van Alterra (de Vries *et al.*, 2008). Deze locaties zijn gegeven in figuur 10. Tevens bevat het bodemkundig informatiesysteem bepalingen van het totaal gehalte aan mineraal fosfor (oxalaat extraheerbaar fosfor, P-ox). Dit zijn interessante bepalingen omdat het Pw-getal hieruit kan worden afgeleid (Chardon, 1994).

Bovenstaande bepalingen zijn verricht aan bodemmonsters die op specifieke locaties en dieptetrajecten zijn genomen. Dit worden puntgegevens genoemd. Voor het PLEASE model moeten deze puntgegevens echter voor heel Nederland beschikbaar zijn, en voor drie dieptetrajecten (0-20, 20-50, 50-GLG-100 cm). De puntgegevens worden daarom voor deze dieptes geïnterpoleerd naar een 250 m x 250 m grid.

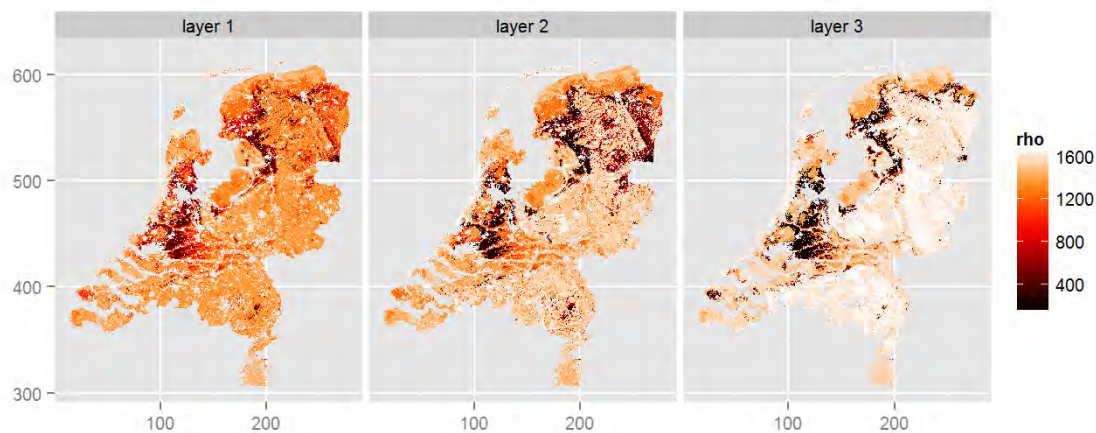
Om de nauwkeurigheid van de interpolatie te verbeteren is gebruik gemaakt van vlakdekkende informatielagen (GIS-kaarten). Voor het Pw-getal is hiervoor gebruik gemaakt van de bodemkaart, (figuur 11, d.w.z. de PAWN-kaart volgens Wösten *et al.*, 2012), en de eerder beschreven landgebruikskaart (figuur 6), en GLG –kaart (figuur 2). Voor FeAl-ox is gebruik gemaakt van de bodemkaart (figuur 11, PAWN-kaart volgens Wösten, 2012). Van Wösten *et al.* (2012) is ook de droge bulkdichtheid van de bodem afkomstig (figuur 12). De droge bulkdichtheid is niet alleen nodig als invoer voor PLEASE, maar ook om gegevens zoals FeAl-ox om te rekenen van massabasis naar volumebasis. Dat laatste is nodig om de gegevens correct te kunnen aggregeren en interpoleren.



Figuur 10 Ligging van de meetlocaties waar het Pw-getal is bepaald (links), oxalaat-extraheerbaar P (midden), en de som van oxalaat-extraheerbaar Fe en Al (rechts).



Figuur 11 PAWN-bodemkaart (Wösten *et al.*, 2012).

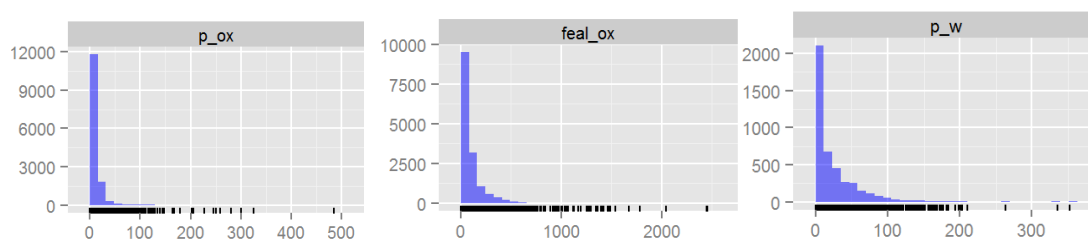


Figuur 12 Droge bulkdichtheid (kg/m^3) van de bodem voor de lagen 0-20 cm (layer 1), 20-50 cm (layer 2), 50-100 cm (layer 3) (Wösten et al., 2012).

3.2.1.1 Exploratieve data-analyse

Voordat de bodemchemische kaarten kunnen worden gemaakt moeten de afzonderlijke componenten worden geharmoniseerd zodat de naamgeving en eenheden consistent zijn. Vervolgens is gekeken of er extreme waarden (uitschieters) voorkomen. Hoewel zeer hoge waarden voor het Pw-getal voorkwamen, zagen we geen reden om deze waarden uit de dataset te verwijderen. Het feit dat zich geen echte uitschieters voordeden komt doordat de gegevens in het bodemkundig informatie systeem in het verleden al uitvoerig zijn gecontroleerd.

De histogrammen van het Pw-getal, P-ox, en FeAl-ox laten zien dat de gegevens scheef verdeeld zijn (figuur 13). Er zijn relatief veel lage waarden en een gering aantal hoge waarden. Voor de interpolatiemethodiek die zal worden gebruikt is het wenselijk dat de gegevens de normale verdeling benaderen. Dat kan worden bewerkstelligd door de gegevens logaritmisch te transformeren.



Figuur 13 Histogrammen van oxalaat-extraheerbaar P (mmol/kg), de som van oxalaat extraheerbaar Fe en Al (mmol/kg) en het Pw-getal ($\text{mg/l P}_2\text{O}_5$).

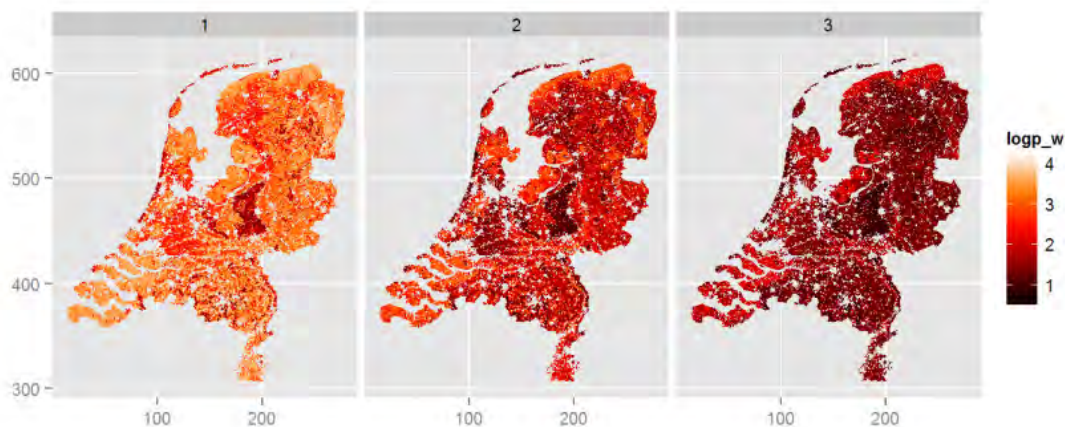
3.2.1.2 Simulaties

PLEASE gebruikt als invoer, kaarten van het Pw-getal en FeAl-ox op twee respectievelijk drie verschillende diepten. Gegevens van het Pw-getal en FeAl-ox zijn echter maar op een beperkt aantal meetlocaties voorhanden. Om op alle gewenste locaties en dieptes een waarde te krijgen moeten we de waarden op de meetlocaties ruimtelijk interpoleren naar de knooppunten van een $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ grid. Hierbij is als volgt te werk gegaan:

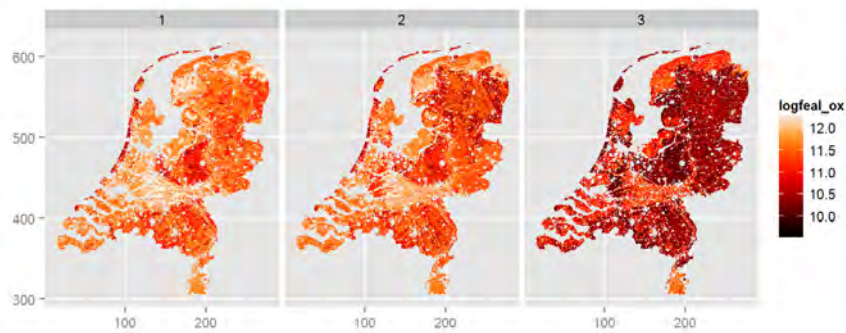
1. Eerst worden modellen opgesteld die de relatie tussen het Pw-getal en FeAl-ox enerzijds en de genoemde GIS-lagen in paragraaf 3.2.1 anderzijds beschrijven. We maken daarvoor gebruik van zogenaamde 'random forests' (Breiman, 2001). Dit zijn niet-lineaire modellen die bekend staan om hun goede voorspellende eigenschappen. Het model voor het Pw-getal heeft de diepte, het

bodemtype, het landgebruik en de GLG als invoer. Dit model verklaart circa 54% van de variatie in het Pw-getal. Het model voor FeAl-ox heeft de diepte en het bodemtype als invoer. Dit model verklaart circa 31% van de variatie in FeAl-ox. Het is belangrijk om te vermelden dat deze percentages zijn berekend op basis van *validatie*. Met andere woorden, deze data zijn niet gebruikt voor het fitten van de modellen. De resulterende kaartjes voor de verschillende dieptes zijn gegeven in figuur 14 en figuur 15. Deze kaartjes kunnen worden gezien als een eerste ruwe voorspelling van het Pw-getal en FeAl-ox. In de volgende stappen gaan we deze kaartjes lokaal verfijnen door gebruik te maken van locatie-specifieke gegevens.

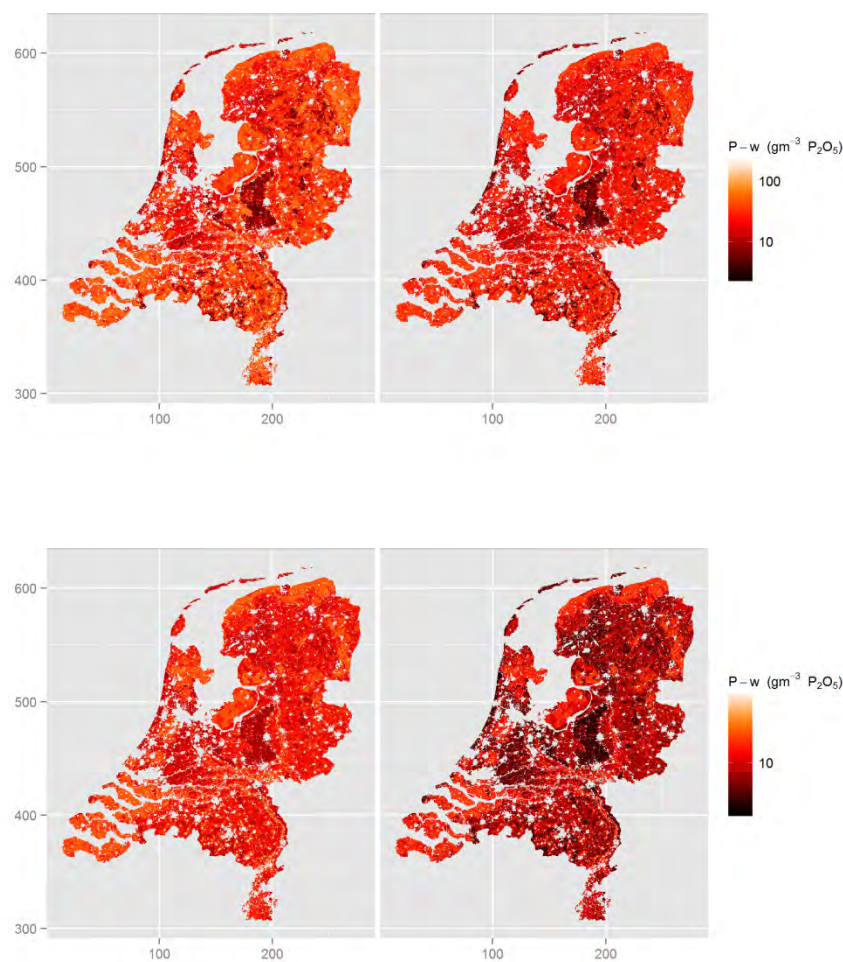
2. Uit figuur 10 blijkt dat P-ox en FeAl-ox op veel meer plaatsen zijn gemeten dan het Pw-getal. Chardon (1994) geeft een relatie waarmee het Pw-getal kan worden berekend op basis van P-ox en FeAl-ox. Op locaties waar het Pw-getal ontbreekt, hebben we deze relatie toegepast als P-ox en FeAl-ox waren gemeten. Omdat dit met een statistisch model gebeurt, kan ook de betrouwbaarheid van het geschatte Pw-getal worden berekend. Deze betrouwbaarheid gaan we in de volgende stap gebruiken.
3. Het globale beeld van het Pw-getal en FeAl-ox gaan we vervolgens verfijnen op basis van locatie-specifieke Pw en FeAl-ox gegevens. Om de nauwkeurigheid van de resulterende kaarten te maximaliseren wordt gebruik gemaakt van geostatistische simulatie. We volgen daarbij de aanbevelingen in Walvoort *et al.* (2010). De specifieke methode die we gebruiken is een variant van 'sequentiële Gaussische simulatie met een externe drijvende kracht' (Goovaerts, 1997). Omdat we zowel te maken hebben met gemeten als berekende waarden voor het Pw-getal nemen we de betrouwbaarheid van deze waarden expliciet mee bij de simulatie. Op deze wijze zullen nauwkeurige waarden meer aan het uiteindelijke kaartbeeld bijdragen dan onnauwkeurige waarden. De simulaties zijn uitgevoerd met de geostatistische softwarebibliotheek 'gstat' (Pebesma, 2004). Voor elke bodemeigenschap en diepte zijn 100 realisaties (kaartbeelden) gesimuleerd. De verschillen tussen deze realisaties representeren onze onzekerheid over het Pw-getal en FeAl-ox (zie Goovaerts, 1997 voor meer details). Het gemiddelde van de 100 realisaties is weergegeven in figuur 16 voor het Pw-getal, en in figuur 17 voor FeAl-ox. De afzonderlijke realisaties zijn gebruikt als invoer voor PLEASE. Door te werken met de afzonderlijke realisaties kan expliciet rekening worden gehouden met het niet-lineaire karakter van PLEASE en is het eenvoudiger om met getransformeerde data om te gaan.



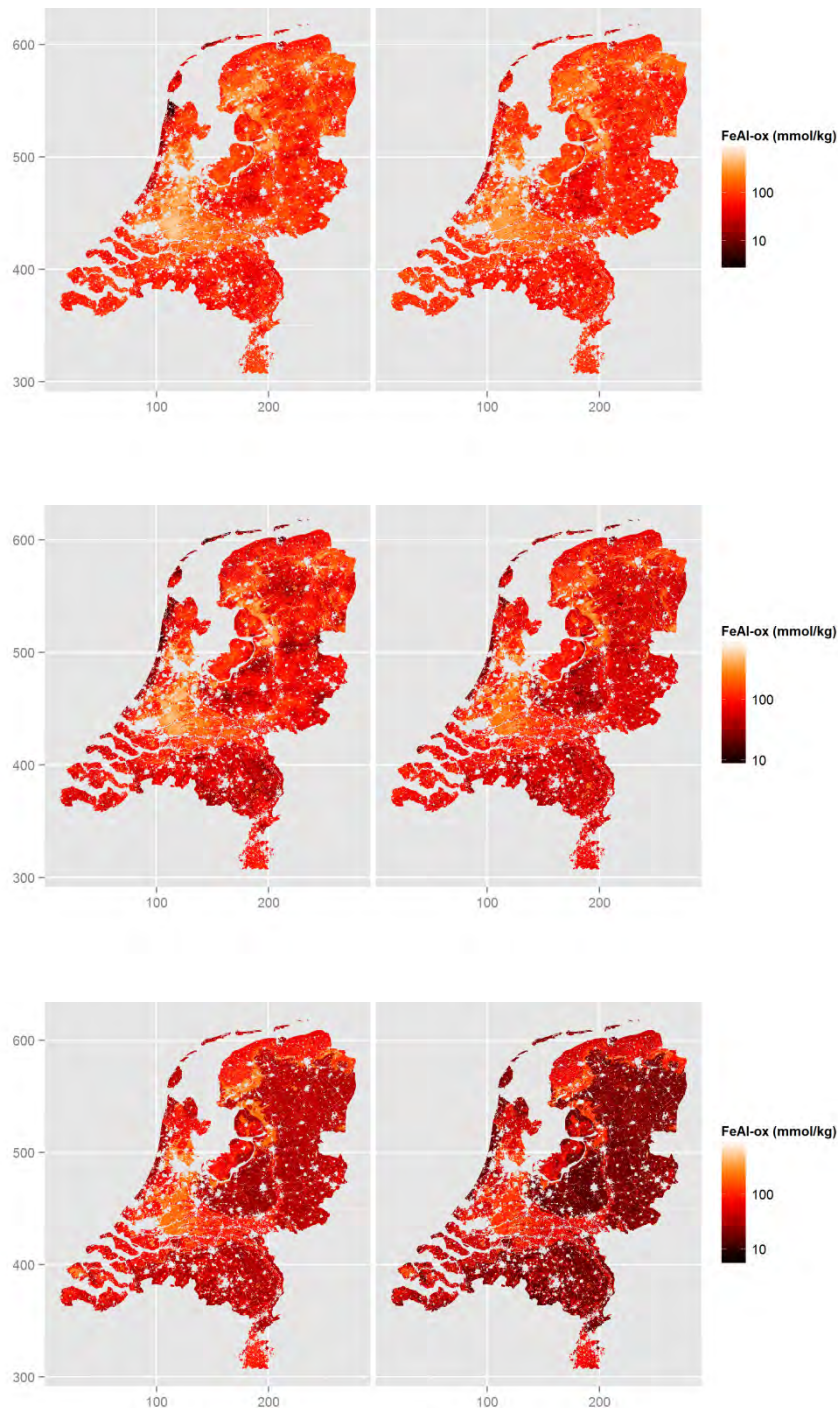
Figuur 14 Kaartjes van het Pw-getal (log-schaal) voor de lagen 0-20 cm (links), 20-50 cm (midden), en 50-GLG-100 cm (rechts). Deze figuren zijn berekend op basis van een random forest model en geven de eerste ruwe kaartjes (trend) van de ruimtelijke verdeling van het Pw-getal.



Figuur 15 Kaartjes van het FeAl-ox gehalte (log-schaal) voor de lagen 0-20 cm (links), 20-50 cm (midden), en 50-GLG-100 cm (rechts). Deze figuren zijn berekend op basis van een random forest model en geven de eerste ruwe kaartjes (trend) van de ruimtelijke verdeling van het FeAl-ox gehalte.



Figuur 16 Kaarten van het Pw-getal (g/m^3) voor de lagen 0-20 cm (boven) en 20-50 cm (onder). Rechts staat de basiskaart op basis van het random forest model, links de locatie-specifieke verfijning daarvan op basis van geostatistische simulatie.



Figuur 17 Kaarten van FeAl-ox (mmol/kg) voor de lagen 0-20 cm (boven), 20-50 cm (midden), en 50-100 cm (onder). Rechts staat de basiskaart op basis van het random forest model, links de locatie-specifieke verfijning daarvan op basis van geostatistische simulatie.

3.2.2 Sorptieparameters

PLEASE heeft voor alle grids waarvoor gerekend wordt drie sorptieparameters nodig. Dit zijn de Langmuir sorptieparameter K (mmol l^{-1}), de Langmuir desorptieparameter k_d (d^{-1}), en de maximale adsorptiefractie (β). Wij gebruiken twee sets sorptieparameters (tabel 3).

1. De sorptieparameters die ook voor STONE 2.1 (Groenendijk *et al.*, 2013) worden gebruikt.
2. De sorptieparameters die door Koopmans en van der Salm (2011) zijn gerapporteerd.

Beide sets zijn gekoppeld aan zogenaamde bodemfysische bouwstenen (Wösten *et al.*, 2001). Deze staan model voor bodemcompartimenten van de boven- of ondergrond en worden gekenmerkt door een specifieke textuur (leem- en lutumgehalte), organische stofgehalte, en mediaan van de zandfractie. Door gebruik te maken van de BOFEK2012 data kan een ruimtelijk beeld van de sorptieparameters worden verkregen.

Tabel 3

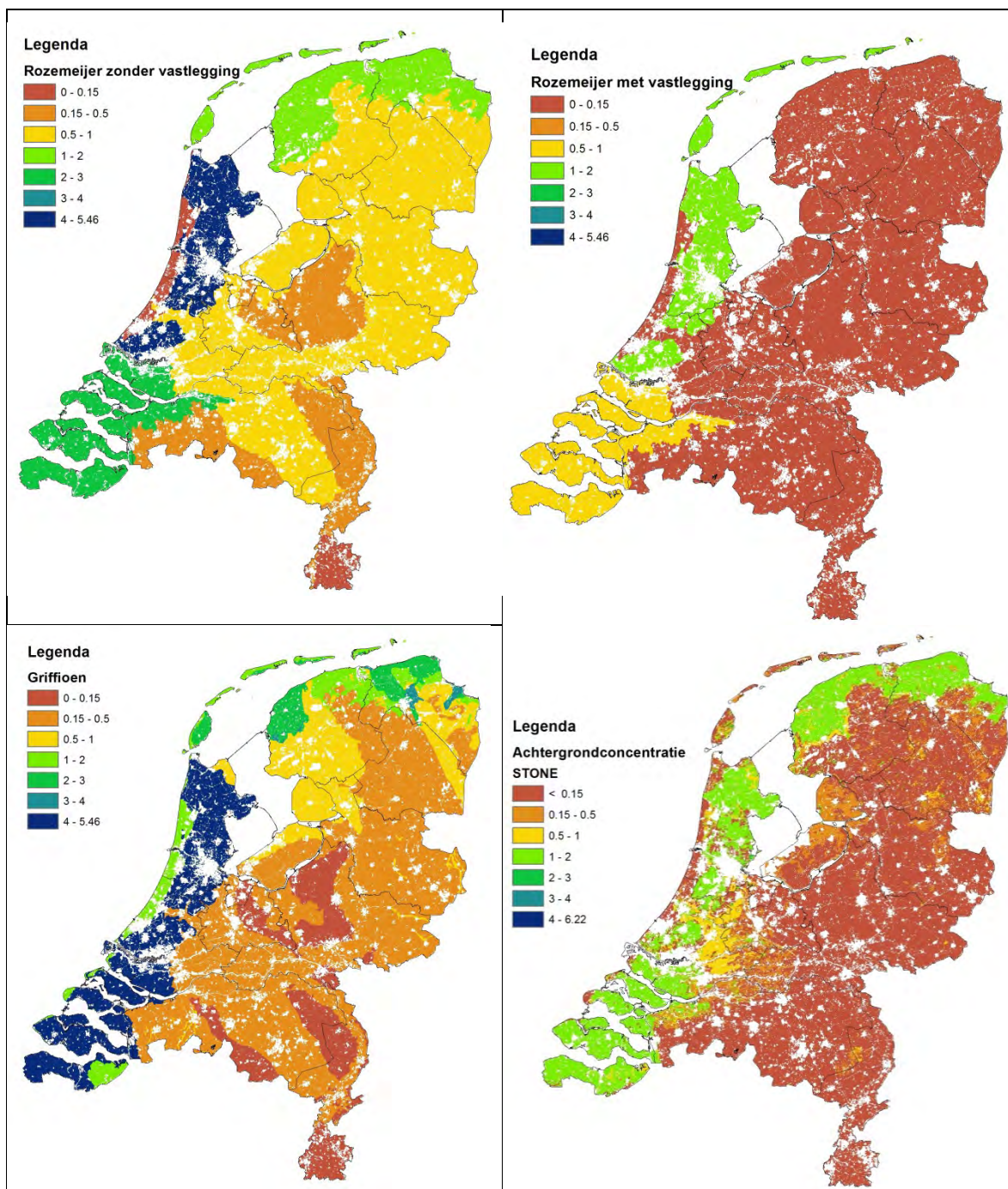
Sorptiekaracteristieken volgens STONE 2.1 en Koopmans en van der Salm, 2011.

Grondsoort	STONE			Koopmans en Van der Salm		
	K ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$)	kd (d^{-1})	β (-)	K ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$)	kd (d^{-1})	β (-)
Minerale gronden	35	0.2	0.167	15	0.13	0.13
Veen	9.3	0.2	0.153	4.1	0.11	0.08

3.2.3 Achtergrondconcentraties

De fosfaatconcentratie in de bodemlaag tussen 50 en 150 cm wordt bepaald door een geleidelijk verloop van de berekende concentratie op 50 cm diepte naar de achtergrondconcentratie van fosfaat. In twee studies van Deltares (Griffioen *et al.*, 2006 en Rozemeijer *et al.*, 2005), zijn voor deelgebieden (Griffioen onderscheid 34 deelgebieden en Rozemeijer 14 deelgebieden) van Nederland fosfaatconcentraties afgeleid uit analyses van watermonsters. De studie van Griffioen is uitgevoerd ten behoeve van de parameterisering van concentraties in het kwelwater in het STONE model, de kaart is landdekkend. De studie van Rozemeijer is iets ouder, maar maakt onderscheid in de P-concentratie zonder en met vastlegging door oxidatie. Rozemeijer heeft kaarten afgeleid die niet landdekkend kunnen worden toegepast omdat Zuid-Limburg ontbreekt. De kaarten bij de rapportages zijn niet in GIS beschikbaar. Zowel de data van Griffioen als die van Rozemeijer hebben betrekking op concentraties in het diepere grondwater (> 5m diep). PLEASE maakt gebruik van concentraties op een diepte van 1m onder GLG. De concentraties die daar heersen, hangen af van de fosfaatevenwichtconcentraties in het moedermateriaal, de ligging van het kwelvlak en de hierboven genoemde achtergrondconcentraties. IN STONE worden voor alle 6405 plots de concentraties van fosfaat op 1 meter onder de GLG berekend waarbij gebruik gemaakt wordt van de data van Griffioen en de achtergrondconcentraties in de verschillende sedimenten (zeeklei, veen, mariene klei, zand) (Groenendijk *et al.*, 2013). Voor deze studie is gebruik gemaakt van deze berekende concentraties van de STONE plots.

De resultaten van de kaarten na koppeling van de tabellen van Griffioen en Rozemeijer en de volgens STONE gebruikte achtergrondconcentraties zijn weergegeven in figuur 18.



Figuur 18 PO_4 -achtergrondconcentratie van de kwel volgens Rozemeijer met vastlegging aan Fe en Ca mineralen (linksboven), idem zonder vastlegging (rechtsboven), volgens Griffioen (linksonder) en op basis van STONE (rechtsonder).

Rekening houden met vastlegging van P aan Fe en Ca mineralen heeft een duidelijk effect op de achtergrondconcentratie. Verder verschillen de kaarten van Griffioen en Rozemeijer enigszins.

4 Fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater

4.1 Hydrologische gegevens

4.1.1 Waterafvoer naar het oppervlaktewater

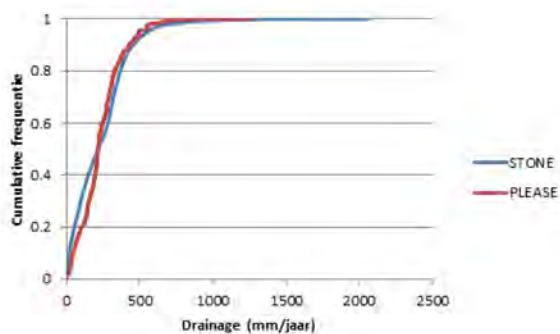
De waterafvoer in PLEASE wordt berekend uit de som van neerslagoverschot plus kwel of wegzijging. In figuur 19 staat de berekende kaart weergegeven. De stuwwallen en Zuid-Limburg zijn gebieden met weinig drainagemiddelen en daarmee ook weinig drainage. In het Oostelijk Zandgebied worden gebieden met weinig drainage (gele gebieden) afgewisseld met gebieden met meer drainage. In Brabant en Limburg is de drainage overwegend gering, dit kan gedeeltelijk worden verklaard omdat er minder neerslag valt (zie figuur 7). De meeste drainage zien we in laag Nederland, waarbij gebieden met veel kwel, zoals de IJsselmeerpolders, eruit springen.



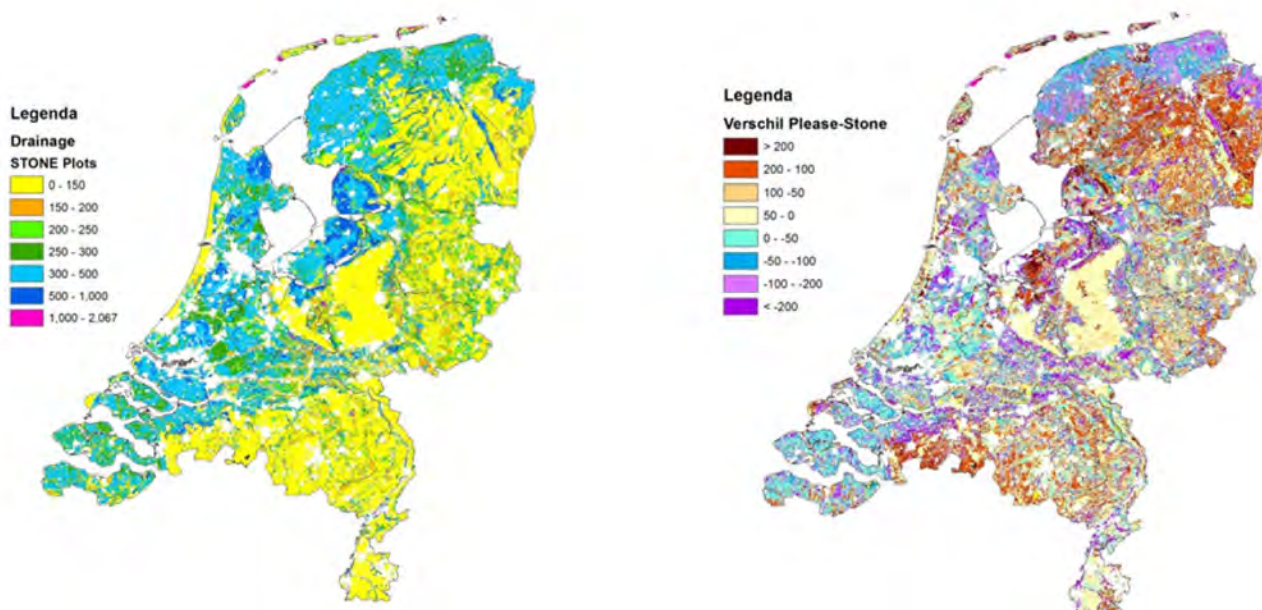
Figuur 19 Drainage (mm/jaar) berekend met PLEASE.

De gemiddelde drainage, berekend als afvoer door de bodem tussen maaiveld en 1 m onder GLG, bedraagt in PLEASE 233 mm/jr en in STONE 235 mm/jr. De mediane drainageflux (215 mm) is eveneens vrijwel gelijk aan de mediane afvoer van PLEASE (216 mm; figuur 20). In de PLEASE hydrologie komen iets minder extremen voor. Dit komt voort uit het feit dat als invoer voor PLEASE gemiddelden zijn gebruikt voor meteo-landgebruik-Gt clusters, waardoor extremen wegvallen.

De drainagekaart die door PLEASE is berekend komt in grote lijnen overeen met de drainagekaart van STONE (figuur 21). In een aantal delen van Nederland wijken de cijfers echter duidelijk van elkaar af: de drainage is volgens de berekening van PLEASE in Zeeland, delen van Friesland en Groningen iets lager dan door STONE wordt berekend. In andere delen van Nederland; Flevopolders, Zuidoost Groningen, Noord Drenthe berekent PLEASE juist hogere drainagefluxen.



Figuur 20 Cumulatieve frequentieverdeling van drainage fluxen (mm/jaar) berekend met PLEASE en STONE.

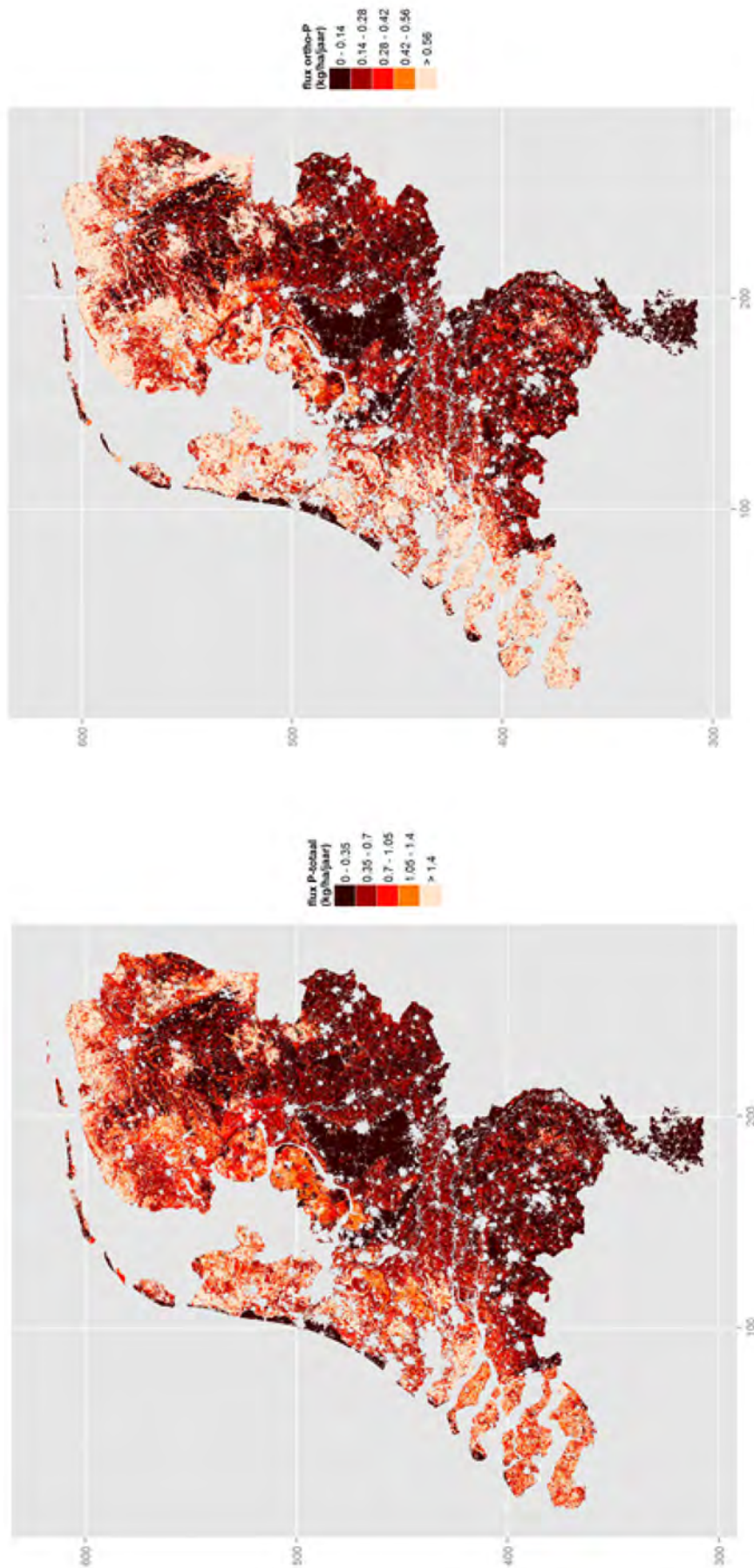


Figuur 21 Drainage fluxen STONE (mm/jaar) vanuit de bodemlaag tot 1 m –GLG (links) en verschillen met de in PLEASE berekende drainagefluxen (rechts).

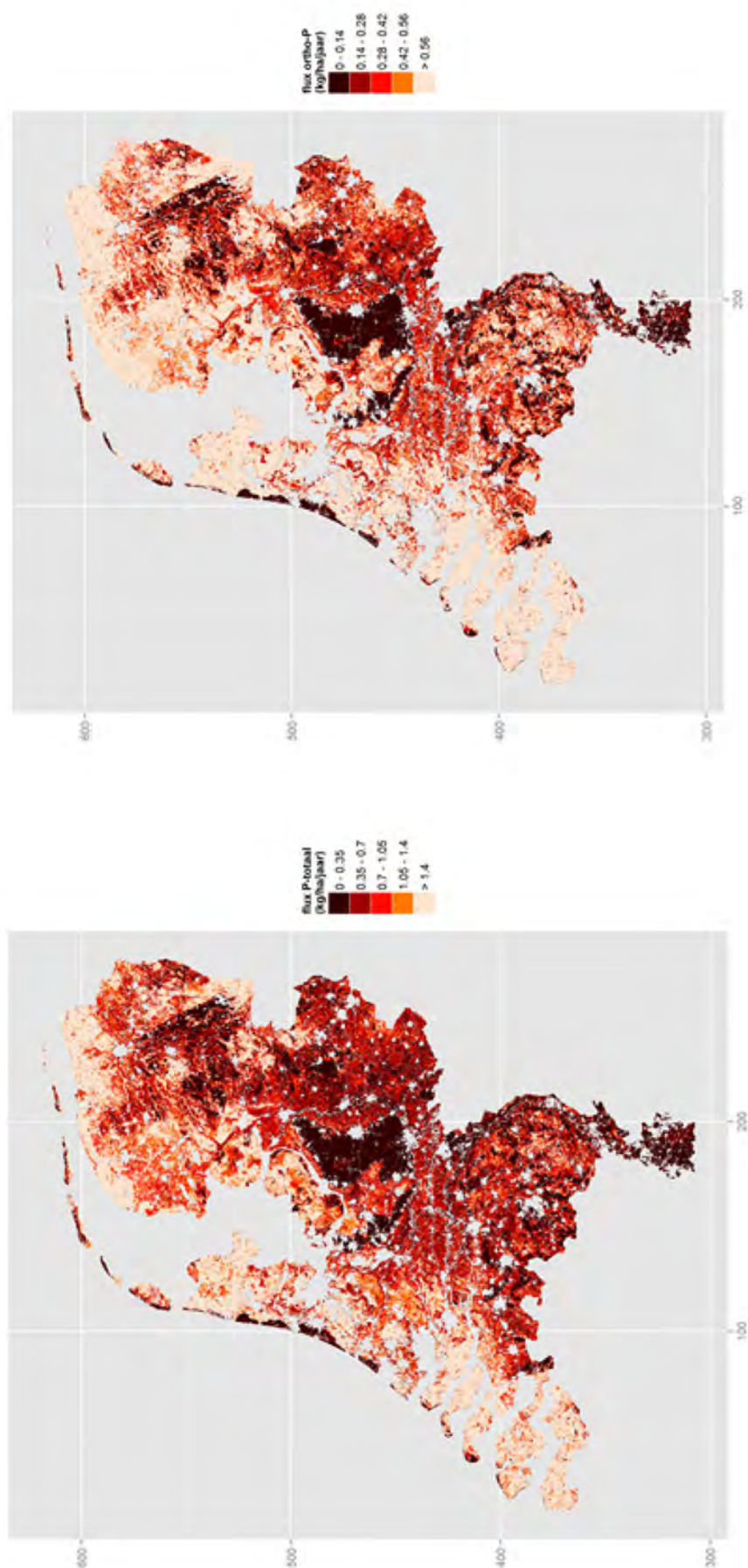
4.2 Fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater

4.2.1 P-vrachten (totaal-P, ortho-P)

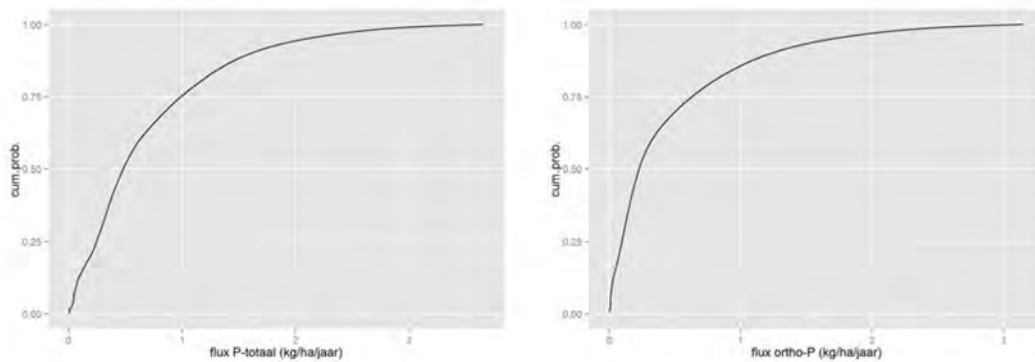
Figuur 22 toont de met PLEASE berekende P verliezen naar het oppervlaktewater. In het westelijke deel van Nederland worden op grote schaal hoge P-vrachten berekend. Deze hoge P-vrachten zijn voor een belangrijk deel te verklaren uit de hoge achtergrondconcentraties (figuur 10) en de hoge drainagefluxen (figuur 14) in dit deel van het land. In de overige delen van Nederland worden in bepaalde regio's (bv. Gelderse Vallei, Oost Brabant, IJsseldal, Achterhoek) zeer hoge P-vrachten berekend door het fosfaat in de bodem (figuur 16) in combinatie met ondiepe grondwaterstanden (figuur 2 en 3). Lage P-vrachten komen vooral voor in gebieden met diepe grondwaterstanden.



Figuur 22 Gesimuleerde mediane vrachten van totaal-P (kg P/ha/jr.) en ortho-P (kg P/ha/jr.) berekend met PLEASE bij gebruik van sorptieparameters uit STONE 2.1.



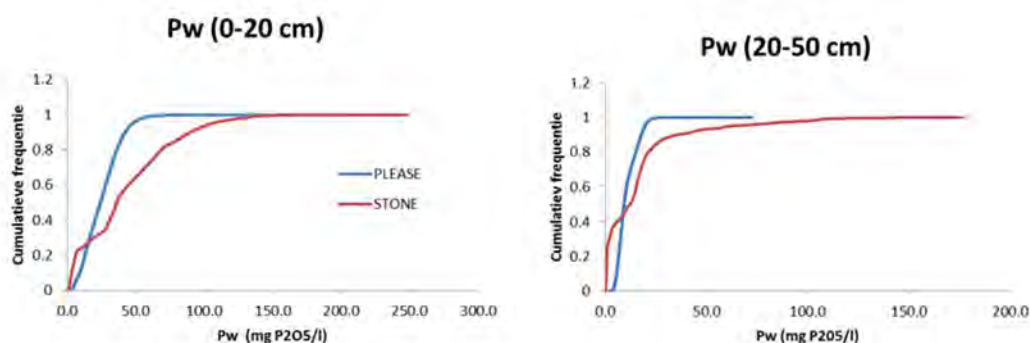
Figuur 23 Gesimuleerde vrachten van totaal-P (kg P/ha/jr.) en ortho-P (kg P/ha/jr.) berekend met PLEASE bij gebruik van sorptieparameters volgens Koopmans.



Figuur 24 Cumulatieve frequentieverdeling van de berekende totaal-P en ortho-P vracht naar het oppervlaktewater.

De gemiddelde afvoer van totaal-P bedraagt in Nederland 0,75 kg/ha/jr. De gemiddelde afvoer van ortho-P bedraagt 0,5 kg/ha/jr. De frequentieverdeling van de fosfaatfluxen naar het oppervlaktewater is scheef verdeeld (figuur 24). Lage afvoeren komen relatief meer voor dan hoge afvoeren. De mediane afvoer van totaal-P naar het oppervlaktewater bedraagt 0,5 en is dus een derde lager dan de gemiddelde totaal-P afvoer. Voor ortho-P bedraagt de mediane waarde 0,2, meer dan de helft lager dan het gemiddelde. Het 90% percentiel voor totaal-P en ortho-P bedraagt resp. 1,7 en 1,3 kg/ha/jr.

De door PLEASE berekende gemiddelde vrachten van ortho-P en totaal-P zijn resp. 20 en 29% lager dan STONE berekent voor de periode 1981-2010 voor de fosfaatverliezen uit de bodemlaag tot 1m - GLG. Naar verwachting komen deze verschillen vooral voort uit een verschil in invoer. Een vergelijking van beide modellen waarbij gebruik gemaakt is van dezelfde invoerdata (van der Salm en Schoumans, 2010) liet namelijk juist een lichte overschatting van de fosfaatfluxen door PLEASE zien. Naast de in H4.1 besproken verschillen in waterafvoer spelen naar verwachting vooral verschillen in de fosfaatgehalten in de bodem en de ruimtelijke spreiding van de fosfaatophoping binnen NL een rol. Beide modellen gebruiken hiervoor andere data. In de PLEASE berekening zijn de fosfaatgehalten en de ruimtelijke verschillen binnen Nederland gebaseerd op metingen (zie H 2). De gehalten in STONE zijn gesimuleerd en gevalideerd op een frequentieverdeling van de ophoping van oxalaat-extraheerbaar P in Nederland (Schoumans *et al.*, 2004).



Figuur 25 Cumulatieve frequentieverdeling van het Pw-getal in STONE en in PLEASE voor de bodemlagen 0-20 cm en 20-50 cm.

De gemiddelde en mediane Pw waarden die PLEASE gebruikt liggen vooral in de bovengrond lager dan die door STONE worden gesimuleerd (Figuur 25). Voor de bodemlaag van 0-20 cm geeft PLEASE een

gemiddelde van 25 mg P_2O_5 l⁻¹ en een mediane waarde van 24 mg P_2O_5 l⁻¹. STONE berekent voor deze laag een gemiddelde waarden van 36 mg P_2O_5 l⁻¹ en mediaan van 42 mg P_2O_5 l⁻¹. De meetwaarden die in PLEASE gebruikt worden voor akkerbouwgronden zijn vergelijkbaar met de waarden die BLGG heeft gemeten in akkerbouwgronden (Reijneveld *et al.* 2010) in de periode 1984-1988. Reijneveld geeft een mediane waarden van 46 mg P_2O_5 l⁻¹ voor monsters uit deze periode. De voor de invoer van PLEASE gebruikte data hebben een mediane waarde van 47 mg P_2O_5 l⁻¹. Reijneveld *et al.* (2010) rapporteert wel een stijging van het Pw-getal in de tijd. De mediane Pw waarde in 2000 bedraagt volgens BLGG 53 mg P_2O_5 l⁻¹. Dit geeft aan dat de PLEASE kaart, die grotendeels gebaseerd is op metingen uit de jaren '90, mogelijk de huidige P toestand en dus de P verliezen enigszins onderschat. Voor gras is een dergelijke controle niet mogelijk omdat het BLGG op grasland het P-AL getal hanteert en bemonstering beperkt is tot de laag van 0-5 of 0-10 cm.

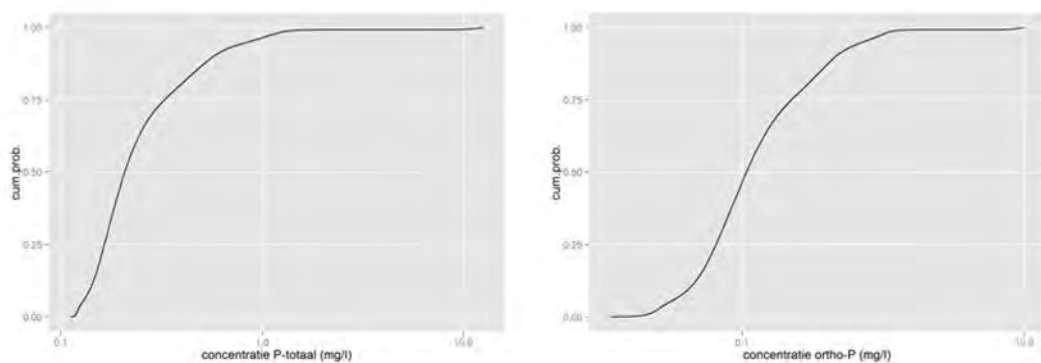
Ook in de laag van 20-50 cm zijn verschillen aanwezig tussen de Pw waarden van PLEASE en STONE. Deze verschillen zijn echter veel geringer: de gemiddelde Pw voor deze laag is 11 mg P_2O_5 l⁻¹ volgens de meetdata achter PLEASE en 16 mg P_2O_5 l⁻¹ volgens de STONE berekeningen. Het verschil in de mediane waarden bedraagt slechts 1,5 eenheid. De Pw waarden in deze laag zijn veel bepalender voor de totale P belasting van het oppervlaktewater dan de waarden van de bovengrond, omdat in de meeste (landbouw)gronden de GHG dieper ligt dan 20 cm.

Het model PLEASE is ontwikkeld om de belasting van P van een perceel naar het aangrenzende oppervlaktewater te voorspellen en houdt daarom geen rekening met eventuele afvoer van fosfaat via de diepere ondergrond (> GLG – 1 meter) naar het oppervlaktewater. STONE berekent dat deze diepe route gemiddeld 30% bijdraagt aan de totale fosfaatafvoer.

Voor de kaarten in figuur 22 is gebruik gemaakt van de sorptieparameters uit STONE 2.1. Indien de sorptieparameters volgens Koopmans gebruikt worden is de gemiddelde uitspoeling van totaal-P en ortho-P ongeveer 1,5 tot 2 maal hoger dan bij gebruik van de STONE parameters. (figuur 23). Deze hogere waarden houden verband met de lagere adsorptieconstanten zoals die door Koopmans zijn afgeleid.

4.2.2 P concentraties (totaal-P, ortho-P)

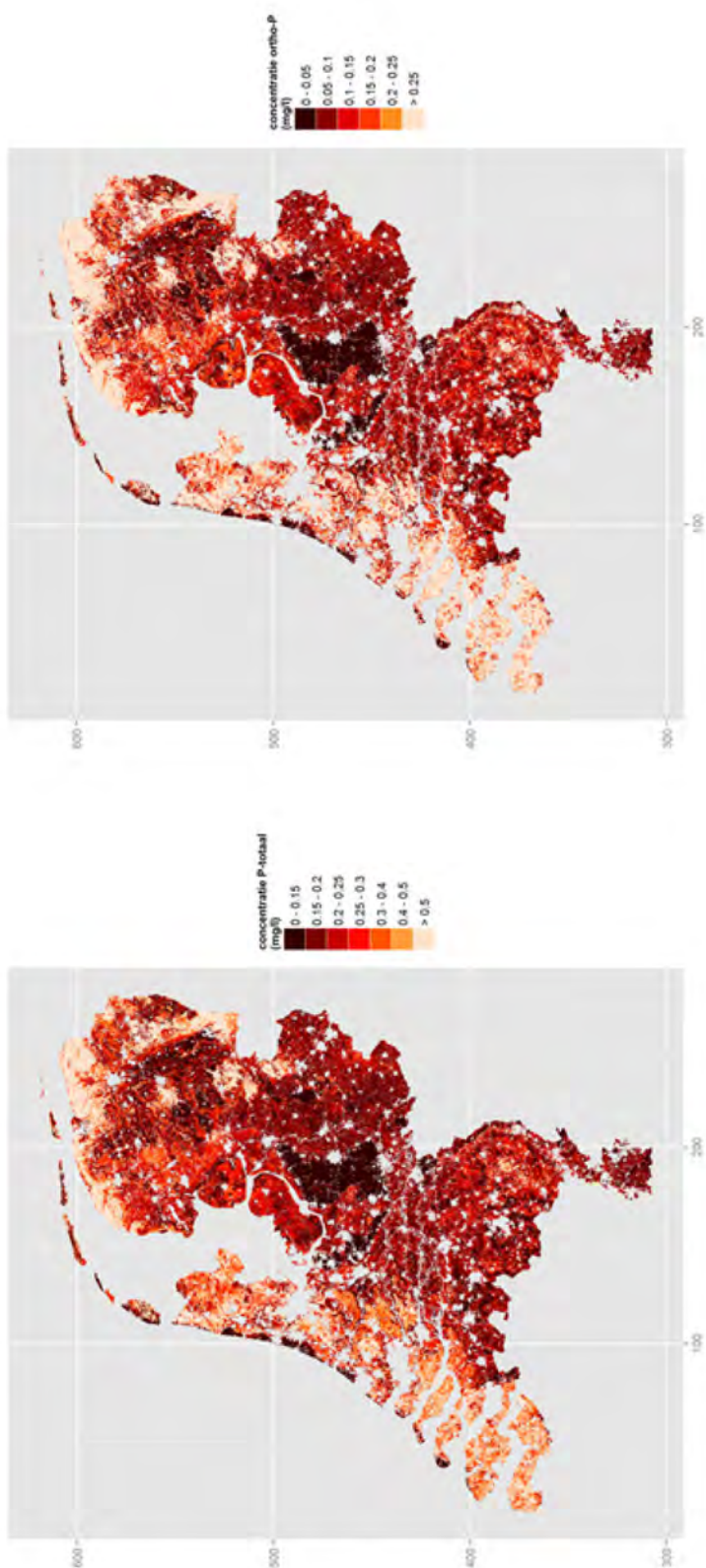
De gesimuleerde flux gewogen fosforconcentraties (figuur 27) van het water dat uitspoelt naar het oppervlaktewater vertoont een beeld dat vrij vergelijkbaar is met het beeld van de fosforfluxen. Hoge concentraties in het westen en noorden van Nederland en lagere concentraties op de zand- en rivierkleigronden in midden en oost Nederland samenhangend met de ter plaatse heersende achtergrondconcentraties (figuur 18). Ook in dit beeld zijn duidelijk hoge concentraties te zien in delen van de Gelderse Vallei, Oost Brabant, IJsseldal en Achterhoek als gevolg van de ophoping van fosfaat in landbouwbodems. De gemiddelde totaal-P en ortho-P concentratie bedragen resp. 0,54 en 0,28 mg/l. De mediane waarden liggen aanzienlijk lager (figuur 26) en bedragen resp. 0,21 en 0,11 mg/l. Het 90% percentiel van de fosfaatconcentratie ligt op resp. 0,6 en 0,49 mg/l voor totaal-P en ortho-P.



Figuur 26 Cumulatieve frequentieverdeling van de berekende totaal-P en ortho-P concentraties in het naar het oppervlaktewater uitspoelende water.

De gemiddelde ortho-P concentraties in het uitspoelende water zijn 36% hoger dan in STONE berekend en voor totaal-P is het verschil 17%. De mediane waarden liggen daarentegen aanzienlijk lager dan in STONE.

Indien de sorptieparameters van Koopmans gebruikt worden in de PLEASE berekeningen zijn de concentraties ca. 1,5 tot 2 maal hoger dan berekend met de sorptieparameters van STONE.



Figuur 27 Gesimuleerde concentraties van totaal-P (kg P/ha/jr.) en ortho-P (kg P/ha/jr.) in het uitspoelende water berekend met PLEASE bij gebruik van sorptieparameters volgens STONE.

5 Conclusies en aanbevelingen

Met het model PLEASE zijn kaarten gemaakt van de langjarig gemiddelde fosforuitspoeling naar het oppervlaktewater en de fosforconcentraties in het uitspoelende water. PLEASE berekent de P uitspoeling op basis van informatie over het fosfaatbindend vermogen, de fosfaattoestand en de hydrologie. De informatie over het fosfaatbindend vermogen en de fosfaattoestand zijn afgeleid uit meetgegevens in het Bodemkundig Informatie Systeem van Alterra. Deze gegevens zijn met behulp van geostatistische simulaties omgezet naar landdekkende kaarten. De hydrologische informatie voor het model PLEASE is gebaseerd op de hydrologie van STONE.

De langjarig gemiddelde afvoer van totaal-P bedraagt in Nederland 0,75 kg/ha/jr. De gemiddelde afvoer van ortho-P bedraagt 0,5 kg/ha/jr. De frequentieverdeling van de fosfaatvrachten naar het oppervlaktewater is scheef verdeeld (figuur 24). Lage vrachten komen relatief meer voor dan hoge vrachten. De mediane vrachten van totaal-P naar het oppervlaktewater bedraagt 0,5 en is dus een derde lager dan de gemiddelde totaal-P flux. Voor ortho-P bedraagt de mediane waarde 0,2, meer dan de helft lager dan het gemiddelde. Het 90% percentiel voor totaal-P en ortho-P bedraagt resp. 1,7 en 1,3 kg/ha/jr. Hoge vrachten worden op grote schaal gevonden in de westelijke helft van Nederland. Deze hoge vrachten zijn voor een belangrijk deel te verklaren uit de hoge achtergrondconcentraties en de hoge drainage fluxen in dit deel van het land. In de overige delen van Nederland worden in bepaalde regio's (bv. Gelderse Vallei, Oost Brabant, IJsseldal, Achterhoek) zeer hoge vrachten berekend door de ophoping van fosfaat in de bodem in combinatie met ondiepe grondwaterstanden. Lage vrachten komen vooral voor in gebieden met diepe grondwaterstanden.

Door de geostatistische opschaling van de meetgegevens van het fosfaatbindend vermogen en de fosfaattoestand geven de gemaakte kaarten een zo gedetailleerd mogelijk beeld van de regionale differentiatie van langjarig gemiddelde P-vrachten naar het oppervlaktewater. Op basis hiervan kan een dialoog gevoerd worden in welke gebieden extra maatregelen voor het terugdringen van de fosfaatbelasting nuttig of gewenst zijn. Doordat de onzekerheid in het fosfaatbindend vermogen en de fosfaattoestand bekend zijn kunnen eveneens uitspraken gedaan worden over de onzekerheid in de fosfaatvrachten. Op basis van deze informatie kan geconcludeerd worden of aanvullende bodemanalyses in een gebied zinvol zijn om de onzekerheid terug te dringen.

Op basis van de PLEASE berekeningen wordt een gedetailleerder ruimtelijk gedifferentieerd beeld gegeven dan tot nu toe beschikbaar was op basis van het nationale emissiemodel STONE. De door PLEASE berekende vrachten zijn echter gemiddeld lager dan met STONE wordt berekend. Deze verschillen worden veroorzaakt door de begrenzing van het systeem en de gebruikte gegevens. Het model PLEASE is ontwikkeld om de belasting van P van een perceel naar het aangrenzende oppervlaktewater te voorspellen en houdt daarom geen rekening met eventuele afvoer van fosfaat via de diepere ondergrond (> GLG – 1 meter) naar het oppervlaktewater. STONE berekent dat deze diepe route gemiddeld 30% bijdraagt aan de totale fosfaatafvoer. De afvoer van fosfaat door de ondiepe ondergrond (<GLG – 1 meter) is volgens de PLEASE berekeningen eveneens wat lager (20% voor ortho-P en 29% voor totaal-P) dan door STONE wordt berekend. Deze verschillen worden veroorzaakt door verschillen in hydrologie en verschillen in P-toestand. De P-toestand in STONE berust op berekeningen waarbij tevens rekening gehouden wordt met verandering in P-overschotten in de tijd. De P-toestand in PLEASE is gebaseerd op metingen. Metingen voor diepere bodemlagen, die sterk bepalend zijn voor de berekende afvoer, zijn schaars. In deze studie zijn alle beschikbare metingen gebruikt en het is dus niet mogelijk om op basis van vergelijking met andere datasets te concluderen of de door PLEASE berekende verliezen worden onderschat. Een grove vergelijking van de in PLEASE gebruikte metingen voor de bovengrond (0-20 cm) met data van akkerbouwgronden van BLGG geven aan dat de waarden uit het Bodemkundig Informatie Systeem vergelijkbaar zijn met de BLGG waarden uit de periode 1984-1988. BLGG rapporteerde op akkerbouwgronden een stijging in P-toestand in de tijd. Dit duidt er op dat de huidige fosfaattoestand mogelijk hoger is dan uit het Bodemkundig Informatie Systeem blijkt en dat PLEASE de P uitspoeling iets onderschat.

De hier gepresenteerde kaarten van P vrachten geven een zo goed mogelijk beeld van ruimtelijke differentiatie in langjarige gemiddelde P-vrachten op basis van de beschikbare gegevens. In veel gebieden zal de onzekerheid van de berekeningen echter nog te groot zijn voor lokaal en/of regionaal gebruik. De beschikbaarheid van voldoende actuele gegevens van de fosfaattoestand vormt hierin een factor. Voor de huidige kaart kon gebruik gemaakt worden van ruim 2000 waarnemingen van het Pw getal voor de bovengrond en ruim 1000 waarnemingen voor de ondergrond. Deze waarnemingen zijn aangevuld met bijna 4000 waarnemingen van oxalaat extraheerbaar P voor zowel de boven- als ondergrond. Om de kwaliteit verder te verbeteren zijn extra gegevens nodig. De P-toestand van de bovengrond wordt regelmatig gemeten voor bemestingsadviezen en het aanvragen van derogatie. Gegevens over de ondergrond worden echter nauwelijks verzameld. De fosfaattoestand van deze laag is echter sterk bepalend voor de fosfaatvracht naar het oppervlaktewater omdat op veel gronden een groot deel van de waterafvoer plaats vindt door deze lagen.

Een tweede belangrijke factor voor de onzekerheid van het ruimtelijke beeld van de fosfaatvrachten naar het oppervlaktewater is de hydrologie. Op dit moment is de waterafvoer gebaseerd op neerslagoverschotten uit STONE in combinatie met kaartgegevens van de grondwaterstanden. Het gebruik van lokale hydrologische modellen of gebruik van het NHI kan mogelijk leiden tot meer detail en/of een grotere nauwkeurigheid van de berekeningen. Daarnaast is er onzekerheid over de bijdrage van de ondergrond (onder GLG-1m) aan de belasting van het oppervlaktewater

Tenslotte bestaat er onzekerheid over de omvang van de fosfaatsorptieparameters. Deze onzekerheid heeft vooral invloed op de absolute waarde van de fosfaatverliezen en veel minder op de regionale differentiatie. Regionale verschillen zouden echter kunnen ontstaan doordat de variatie in sorptiekarakteristieken groter is dan nu wordt verondersteld op basis van een indeling in zand, veen en klei.

Gezien de hierboven genoemde onzekerheden is het aan te bevelen de in dit rapport gepresenteerde beelden van de fosfaatvrachten en concentraties in het uitspoelende water te combineren met de kennis die beschikbaar is over de waterkwaliteit in de verschillende stroomgebieden.

Literatuur

- Bakel, P.J.T. van, T. Kroon, J.G. Kroes, J. Hoogewoud, R. Pastoors, H.T.L. Massop en D.J.J. Walvoort, 2007. Reparatie voor STONE 2.1: beschrijving reparatie-acties, analyse resultaten en beoordeling plausibiliteit. Wageningen, Alterra, WOT-document 81.
- Breeuwsma, A., & O.F. Schoumans, 1986. Fosfaatophoping en -uitspoeling in de bodem van mestoverschotgebieden. Bodembeschermingsreeks, nummer 74. Staatsuitgeverij 's-Gravenhage.
- Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45: 5-32
- Chardon, W.J., 1994. Relationship between phosphorus availability and phosphorus saturation index. DLO Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek, Haren. Rapport 19.
- Chardon, W.J, G. Mol, C. van der Salm & F. Sival., 2007. De sorptie van ortho-PO₄ in veengronden en kalkrijke zandgronden en het belang van organisch gebonden P. Alterra rapport 1480, Alterra, Wageningen.
- Gaast J.W.J. van der, H.R.J. Vroon en H.Th.L. Massop, 2010. Grondwaterregime op basis van karteerbare kenmerken. Amersfoort, STOWA-rapport 41.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York, 483 pp
- Griffioen J., R. Heerdink, L. Maring, S. Vermooten, D. Maljers en J. Hettelaar, 2006. Enkele lithologische en (hydro)geochemische karakteristieken van de ondergrondparametrisering in het landelijk nutriëntenemissiemodel STONE. Utrecht, TNO rapport 2006-U-R0161/A.
- 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 Wageningen UR), Alterra-rapport 2462.
- Hoekstra, C. en J.N.B. Poelman, 1982. Dichtheid van gronden gemeten aan de meest voorkomende bodemeenheden in Nederland. Wageningen. Stichting voor Bodemkartering, rapport nr. 1582.
- Hazeu, G.W., C. Schuiling, G.J. Dorland, J. Oldengarm en H.A. Gijsbertse, 2010. Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland versie 6 (LGN6); Vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2012.
- Koopmans, G.F. & C. van der Salm. 2011, Binding van ortho-fosfaat aan de bodem: Het parameteriseren van de snelle reversibele bindingsreactie van ortho-fosfaat. Interne notitie, Alterra, Wageningen.
- Kroon, T., P. Finke, I. Peereboom en A. Beuzen, 2001. Redesign STONE. De nieuwe schematisatie voor STONE: de ruimtelijke indeling en de toekenning van hydrologische en bodemchemische parameters. Lelystad, RIZA rapport 2001.017.
- Massop, H.Th.L., C. Schuiling en A.A. Veldhuizen, 2013. Buisdrainagekaart 2012. Update landelijke buisdrainagekaarten voor het NHI op basis van de landbouwmetingen 2010. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2381.
- Pebesma, E. J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. Computers & Geosciences 30 : 683-691

-
- Reijerink, J.G.A. en A. Breeuwsma, 1992. Ruimtelijk beeld van de fosfaatverzadiging in mestoverschotgebieden. Wageningen. Staring Centrum, Rapport 222.
- Reijneveld, J.A., P.A.I. Ehlert, A.J. Termorshuizen en O. Oenema, 2010. Changes in soil phosphorus status in agricultural land during the 20th century. *Soil use and Management* 26: 399-411.
- Rozemeijer, J., J. Griffioen & H. Passier, 2005. De concentratie van fosfaat in regionaal kwelwater in Nederland. TNO rapport 005.105B0710, TNO, Utrecht.
- Schoumans, O.F., 2004a. Inventarisatie van de fosfaatverzadiging van landbouwgronden in Nederland. Alterra rapport 730.4, Alterra, Wageningen.
- Schoumans, O.F., L. Renaud, H.P. Oostrom & P. Groenendijk, 2004b. Lot van het fosfaatoverschot. Rapport 730.5. Alterra, Wageningen
- Schoumans, O.F., P. Groenendijk, C. van der Salm, M. Pleijter. 2008. Methodiek voor het karakteriseren van fosfaatlekkende gronden. Beschrijving van het instrumentarium PLEASE. Alterra-rapport 1724. Alterra. Wageningen.
- Schoumans, O.F., C. van der Salm and P. Groenendijk, 2013. PLEASE: A simple model to determine P losses by leaching. *Soil Use & Management*, 29:138-146.
- Salm, C. van der en O.F. Schoumans, 2010. Vergelijking van het model PLEASE met uitkomsten van het nationale nutriënten-emissiemodel STONE. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1968-1.
- Salm, C. van der, R. Dupas, R. Grant, G. Heckrath, B. V. Iversen, B. Kronvang, C. Levi, G. H. Rubaek, and O. F. Schoumans, 2011. Predicting Phosphorus Losses with the PLEASE Model on a Local Scale in Denmark and the Netherlands. *J. Environ. Qual.* 40:1617–1626.
- Sluis, P. van der, 1990. Hoofdstuk 11: Grondwatertrappen. In: Locher, W.P. en H. de Bakker (red.). *Bodemkunde van Nederland deel 1: Algemene bodemkunde*. Malmberg, Den Bosch.
- Sluijter, R., H. Leenaers en M. Camarosa, 2011. De bosatlas van het klimaat. Noordhoff Uitgevers.
- Vries, F. de, G. Mol, M.J.D. Hack-ten Broeke, G.B.M. Heuvelink & F. Brouwer, 2008. Het Bodemkundig Informatie Systeem van Alterra. Overzicht van het gebruik en wensen voor verbetering van de informatie. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1709
- Walvoort, D. J. J.; Brus, D. J.; Salm, C. v. d.; Pleijter, M. & Tol-Leenders, T. P. v., 2010. Kwantificering van de fosfaattoestand in de bodem van vier stroomgebieden. Wageningen, Alterra, Alterra rapport 1958
- Wolf, J., A.H.W. Beusen, P. Groenendijk, T. Kroon, R. Rötter & H. van Zeijts, 2005. The integrated modeling system STONE for calculating nutrient emissions from agriculture in the Netherlands. *Environmental Modeling and Software* 18, 597-617.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153
- Wösten, J.H.M.; Vries, F. de; Hoogland, T.; Massop, H.T.L.; Veldhuizen, A.A.; Vroon, H.R.J.; Wesseling, J.G.; Heijkers, J.; Bolman, A., 2012. BOFEK 2012, de nieuwe bodemfysische schematisatie van Nederland. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2387
- Zee, S.E.A.T.M. van der, W.H. van Riemsdijk & F.A.M. de Haan, 1990a. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel I: Toelichting. Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding. Landbouwuniversiteit Wageningen.

Zee, S.E.A.T.M. van der, W.H. van Riemsdijk & F.A.M. de Haan, 1990b. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel II: Technische Uitwerking. Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding. Landbouwniversiteit Wageningen.

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

Alterra-rapport 2565
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 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wageningenUR.nl/alterra

Alterra-rapport 0000
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.

