

Onderzoeksresultaten en -noden in het kader van de fosforproblematiek in de landbouw gelinkt aan de waterkwaliteitsdoelstellingen

Onderzoeks- en voorlichtingsplatform Duurzame bemesting 14/05/2014

Achtergrond	1
Proces.....	1
1. Onderzoeksresultaten in het kader van de fosforproblematiek in de landbouw gelinkt aan de waterkwaliteitsdoelstellingen.....	2
1.1. Inleiding	2
1.2. Fosfor in de bodem en transportwegen van fosfor naar grond- en oppervlaktewater	3
a. Verschillende vormen van fosfor in de bodem	3
b. Transportwegen van fosfor naar grond- en oppervlaktewater	5
1.3. Mitigatiemaatregelen	6
a. Mitigatiemaatregelen op bedrijfsniveau	8
b. Mitigatiemaatregelen op perceelsniveau.....	13
c. Mitigatiemaatregelen op bekkenschaal	16
d. Mitigatiestrategieën in het aquatisch systeem	17
2. Kennishiaten en onderzoeksnoden in het kader van de fosforproblematiek in de landbouw gelinkt aan de waterkwaliteitsdoelstellingen van MAP IV ter voorbereiding van MAP V	18
2.1. Inleiding	18
2.2. Fosfor in de bodem en transportwegen van fosfor naar grond- en oppervlaktewater	18
2.3. Mitigatiemaatregelen	19
a. Mitigatiemaatregelen op bedrijfsniveau	19
b. Mitigatiemaatregelen op perceelsniveau.....	20
c. Mitigatiemaatregelen op bekkenniveau.....	21
Afkortingen	22
Lijst van figuren	22
Referenties	23

Achtergrond

Ondanks de reeds geleverde inspanningen die de kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater al gevoelig verbeterd hebben, wordt in Vlaanderen de norm van 50 mg nitraat per liter van de Europese Nitraatrichtlijn (91/676/EEC) en de waterkwaliteitsnormen voor fosfor voor verschillende watertypen van de Kaderrichtlijn Water (2000/60/EG) in verschillende regio's nog steeds niet gehaald. Om een verdere vermindering van nutriëntenverliezen vanuit de plantaardige productie te kunnen realiseren, werden, naast andere maatregelen, de bemestingsnormen in het vierde mestactieplan (MAP IV) verstrengd. MAP IV heeft als gevolg dat de land- en tuinbouwers extra inspanningen en aanpassingen van hun bedrijfsvoering moeten uitvoeren. Om de land- en tuinbouwers maximaal te kunnen bijstaan zodat zij binnen de nieuwe normen en randvoorwaarden hun bedrijf op een rendabele manier kunnen blijven uitbaten, zonder dat de milieudoelstellingen in het gedrang komen, werden flankerende maatregelen bij MAP IV gelanceerd. Er zijn echter nog een aantal kennishiaten zowel naar het bereiken van de milieudoelstellingen, een optimale opbrengst en kwaliteit als naar behoud van bodemkwaliteit.

In het kader van dit flankerend beleid van MAP IV werd het Onderzoeks- en voorlichtingsplatform Duurzame bemesting opgericht. Praktijkcentra, universiteiten, hogescholen, onderzoeksinstituten en overheden zijn lid van het onderzoeksplatform. De specifieke taken van het platform zijn het inventariseren van prioritaire onderzoeksnoden, het vastleggen van onderzoeks- en sensibiliseringsthema's, het uitwerken van een onderzoeksstrategie m.b.t. duurzame bemesting met vertaling naar de praktijk, en het adviseren van de beleidsvoorbereidende overheid.

Proces

Er werd door het Onderzoeks- en voorlichtingsplatform Duurzame bemesting een visietekst over prioritair onderzoek in het kader van de nutriëntenproblematiek in de landbouw opgemaakt. De geïdentificeerde prioritaire onderzoeksnoden zijn (Onderzoeks- en voorlichtingsplatform Duurzame bemesting, 2012):

- Fosforproblematiek
- Bodemorganische stof op peil houden binnen de huidige wetgeving
- Nutriëntenopname en dosis-responscurven van land- en tuinbouwteelten
- Bufferstroken

Om de prioritaire onderzoeksnoden in het kader van de fosforproblematiek duidelijker te kaderen, werd de tekst 'Onderzoeksresultaten en -noden in het kader van de fosforproblematiek in de landbouw gelinkt aan de waterkwaliteitsdoelstellingen' opgesteld. Op de vergadering van 24 april 2014 van het onderzoeksplatform werd deze tekst bediscussieerd en gefinaliseerd.

1. Onderzoeksresultaten in het kader van de fosforproblematiek in de landbouw gelinkt aan de waterkwaliteitsdoelstellingen

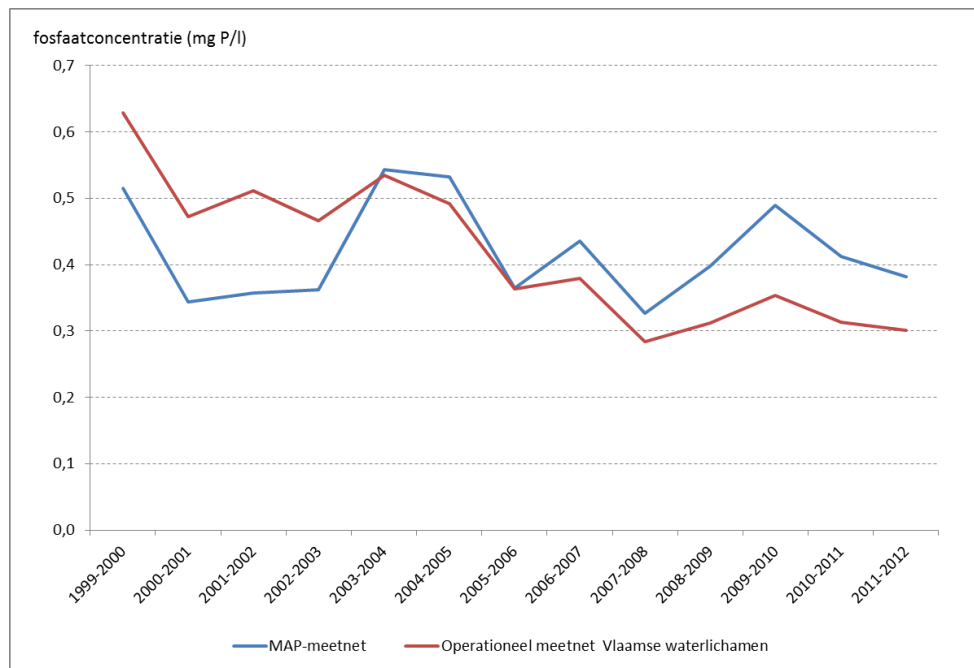
1.1. Inleiding

Jarenlange fosfaatoverschotten hebben geleid tot een groot areaal fosfaatverzadigde landbouwbodems, hoge fracties van fosfaat in oplossing en verhoogde verliezen van fosfor (P) naar grond- en oppervlaktewater in Europa, USA, Canada en Nieuw-Zeeland. In deze landen is eutrofiëring of algengroei door verliezen van P en stikstof (N) uit de landbouw een belangrijk probleem wat resulteert in een daling van de waterkwaliteit, zowel voor het gebruik ervan als drinkwater, recreatiewater en/of industriewater.

De relatieve concentratie van N en P geeft een indicatie welk nutriënt beperkend is voor eutrofiëring: voor zoetwater kan bij een verhouding $\leq 4,5N$ de beperkende factor voor algengroei zijn, 4,5-6 zijn intermediaire condities en indien ≥ 6 kan P de beperkende factor zijn. Voor mariene systemen worden de volgende verhoudingen aangenomen, ≤ 5 , 5 -10 en ≥ 10 (EC, 2002; Schoumans *et al.*, 2014). In zoetwatersystemen is P meestal de limiterende factor (Herath, 1997; Carpenter, 2008) terwijl N meestal limiterend is in mariene systemen (Anderson *et al.*, 2002). Deze bevindingen moeten met voorzichtigheid worden geïnterpreteerd, aangezien andere factoren o.a. licht, redox en pH eutrofiëring beïnvloeden (Schoumans *et al.*, 2014). Eutrofiëring is ook afhankelijk van de aanwezige P-vormen en hun biobeschikbaarheid (Van Moorleghem, 2013).

De landbouwsector wordt momenteel geconfronteerd met een steeds strenger wordende nutriëntenwetgeving, en de aandacht verschuift meer en meer van de nitraat- (NO_3^-) naar de fosfaatproblematiek. Dit is logisch aangezien de gemiddelde NO_3^- -concentratie in de MAP-meetpunten ongeveer 20 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ bedraagt (norm 50 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$) terwijl de gemiddelde concentratie aan orthofosfaat (ortho-P) (= anorganische P) in de MAP-meetpunten schommelt rond 0,4 mg ortho-P l^{-1} terwijl de norm voor kleine beken 0,1 mg ortho-P l^{-1} bedraagt. De continu afnemende P-input in de landbouw gedurende de laatste jaren vertaalt zich alsnog niet echt in een gestaag dalende trend van concentraties in bv. oppervlaktewater (Fig. 1). Dit is ook niet abnormaal aangezien met de huidige fosfaat- (P_2O_5) bemestingsnormen er hoogstens gemiddeld 5 kg P_2O_5 (ha.j)⁻¹ supplementair aan de bodem onttrokken wordt. Bij een verdere P-uitmijning zal de fosfaatvoorziening van gewassen geleidelijk aan meer afhankelijk van de fosfaatlevering vanuit de bodem worden (Russchen *et al.*, 2011).

Op dit moment liggen de ortho-P-concentraties in het oppervlaktewater van de Vlaamse MAP-meetpunten dus gemiddeld ongeveer 4 maal hoger dan de gehanteerde norm voor kleine beken. Tevens dient aangestipt dat tot het winterjaar 2002-2003 de ortho-P-concentraties in het Operationeel Meetnet Vlaamse Waterlichamen gemiddeld hoger waren dan in het MAP-meetnet. Meer zuiveringsstations, grotere P-verwijdering in deze installaties, afkoppeling van rioleringen die rechtstreeks loosden in het oppervlaktewater, ... hebben er toe geleid dat de gemiddelde ortho-P-concentraties in het Operationeel Meetnet Vlaamse Waterlichamen gedaald zijn. De ortho-P-concentraties in de MAP-meetpunten liggen vanaf het winterjaar 2003-2004 systematisch hoger dan deze in het Operationeel Meetnet Vlaamse Waterlichamen. **Dit houdt in dat P uit de landbouw meer en meer verantwoordelijk wordt voor de ortho-P-concentratie in ons oppervlaktewater, zowel in de kleine beken als in grote waterlichamen** (Bogestrand *et al.*, 2005; VMM, 2013).



Figuur 1 Evolutie van de orthofosfaatconcentratie in het MAP-meetnet en in het Operationeel Meetnet Vlaamse Waterlichamen (Bron: VMM, 2013)

Naast de milieuproblemen veroorzaakt door een inefficiënt gebruik van P, stimuleert ook de eindige reserve van de wereldvoorraad fosfaat en de toenemende kostprijs van minerale fosfaadmeststoffen het efficiënter P-gebruik en het sluiten van de P-kringloop (Russchen *et al.*, 2011).

1.2. Fosfor in de bodem en transportwegen van fosfor naar grond- en oppervlaktewater

a. Verschillende vormen van fosfor in de bodem

In landbouwgrond is circa 1.500 tot 10.000 kg P per hectare aanwezig. Deze P is aanwezig in anorganisch vorm nl. in fosfaathoudende bodemmineralen, geadsorbeerd aan ijzer- (Fe), aluminium- (Al) hydroxiden, calcium (Ca), magnesium (Mg) en kleiplaatjes en in organische vorm ingebouwd in bodemorganische stof (BOS). Organisch P maakt 30 tot 65% van de totale P in de bodem uit en is afkomstig van afgestorven planten, dieren en micro-organismen en van organische producten als mest en compost. Het vastleggen en vrijkomen van P in en uit de verschillende pools is een gecompliceerd proces dat afhankelijk is van tal van factoren, waarvan pH wellicht de belangrijkste is (Russchen *et al.*, 2011; Shen *et al.*, 2011; Kröger *et al.*, 2013).

Anorganisch en organisch P dat in de bodemoplossing (bepaald via filtering) aanwezig is, is voor een groot deel beschikbaar voor opname door de plant (Dekker & Postma, 2008). De belangrijkste vorm, waarin P uit de bodemoplossing wordt opgenomen, is orthofosfaat (HPO_4^{2-} en H_2PO_4^-). In de bodemoplossing is in de bouwvoor van 25 cm meestal minder dan 1 kg P ha⁻¹ aanwezig (Dekker & Postma, 2008).

De meting van opgeloste P in grond- en oppervlaktewater suggereert dat in Vlaanderen oppervlaktewater-P grotendeels bestaat uit ortho-P en P geassocieerd met colloïdale partikels terwijl opgeloste organische P-vormen een groter belang hebben in grondwater (Van Moorleghem, 2013). Bij bodems waarbij in het verleden frequent organische mest werd toegediend, kan een substantieel deel van de P als opgelost organische P aanwezig zijn. Dit opgelost organische P is een potentieel belangrijke P-bron voor eutrofiëring van het oppervlaktewater (Chardon *et al.*, 1997; Salomez *et al.*, 2008).

Het niet-opgeloste P in de bodem kan worden opgedeeld in een stabiele en een labiele pool. Het labiele organische en anorganische P is in evenwicht met de bodemoplossing en kan vrij snel P naleveren. Tot de labiele anorganische P-verbindingen behoren bijvoorbeeld geadsorbeerd P en snel mineraliseerbaar organisch P. De stabiele pool van fosfaathoudende mineralen zoals P gebonden in sesquioxiden en apatiet is zeer slecht oplosbaar en de bijdrage van deze pool aan de P-voorziening van het gewas is dan ook zeer gering (Dekker & Postma, 2008; Russchen *et al.*, 2011; Kröger *et al.*, 2013).

In de bodem vinden 3 processtypes plaats (Russchen *et al.*, 2011; Shen *et al.*, 2011):

1. Oplossen en neerslaan van mineralen

Bij een lage bodem-pH worden slecht oplosbare Fe- en Al-fosfaten gevormd. Bij een hoge pH worden vooral slecht oplosbare Ca-fosfaten gevormd. Bij een neutrale pH worden redelijk oplosbare Ca- en Mg-fosfaten gevormd.

2. Adsorptie en desorptie

Fosfaat kan geadsorbeerd worden aan positief geladen deeltjes/oppervlakten in de bodem. Deze binding is niet sterk, zodat dit fosfaat weer beschikbaar kan komen in oplossing (desorptie). Bij een relatief lage pH adsorbeert fosfaat voornamelijk aan Fe- en Al-hydroxiden. Op kleigronden kan fosfaat adsorberen aan de randen van kleideeltjes. Bij een hoge pH speelt adsorptie en desorptie van fosfaat aan koolzure kalk een rol. Op zandgronden met een lage pH kunnen in de bodem nogal veel organische Fe- en Al-complexen voorkomen.

3. Mineralisatie en immobilisatie

Bij de afbraak van organische stof door micro-organismen kan fosfaat vrijkomen. Of er daadwerkelijk fosfaat vrijkomt, is afhankelijk van de C:P-verhouding van de organische stof en de mate van afbreekbaarheid. Organisch fosfaat is in circa 30 verschillende vormen in de bodem aanwezig. De belangrijkste organische vormen van fosfaat in de bodem zijn inositolfosfaat, fosfolipiden en nucleïnezuren.

Fosfaat is vrij immobiel in de bodem. Meer dan 92% van de opgenomen fosfaat komt bij de wortel door diffusie van fosfaat in de bodem. Circa 5% van de opgenomen fosfaat komt bij de wortel door massastroming ontstaan door de wateropname van de planten. Interceptie door wortelgroei naar het fosfaat is de minst belangrijke factor waardoor plantenwortels met fosfaat in de bodem in aanraking komen (Dekker & Postma, 2008).

Het doctoraat van Van Moorleghem (2013) trachtte de P-fractie in de opgeloste fase ($< 0,45 \mu\text{m}$) biologisch beschikbaar voor algengroei in bodemporiewater, grondwater en oppervlaktewater in Vlaanderen te kwantificeren en in verband te brengen met de P zoals die gedetecteerd wordt met gebruikelijke analytische methoden. Hieruit bleek dat niet alle gemeten opgeloste P biobeschikbaar is voor algen (Van Moorleghem, 2013).

Een typisch landbouwgewas neemt 40-100 kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ op. Om het gewas van voldoende P te voorzien zal de opgeloste fosfaat in de bodemoplossing voortdurend moeten worden aangevuld vanuit de labiele fractie van de bodemvoorraad (Schoumans *et al.*, 2008; Russchen *et al.*, 2011).

b. Transportwegen van fosfor naar grond- en oppervlaktewater

In het verleden werden **diffuse P-verliezen naar het milieu dikwijls “algemeen” gezien als erosie van partikels waaraan P gebonden is**. Deze werden verder getransporteerd via oppervlakkige afspoeling. Dit is ook **het dominerende mechanisme en de hydrologische weg voor P-transport van akkerbouwpercelen in hellende gebieden** (Salomez *et al.*, 2008; McDowell, 2012).

Op basis van sedimentafzettingen in 13 wachtbekkens begrooten Verstraeten & Poesen (2002) de totale P-verliezen door erosie tussen 1,8 en 39,7 kg P $(\text{ha}\cdot\text{j})^{-1}$. Worden deze waarden vergeleken met het verlies dat kan optreden uit een fosfaatverzadigde bodem nl. 0,3 mg totaal P l^{-1} bij een neerslagoverschot van 300 mm j^{-1} stemt overeen met een verlies van 0,9 kg P $(\text{ha}\cdot\text{j})^{-1}$, dan is het duidelijk dat de P-verliezen door erosie vaak hoger kunnen zijn dan de P-uitloging uit fosfaatverzadigde bodems (Salomez *et al.*, 2008). Bovendien kan door het opleggen van strengere P_2O_5 -bemestingsnormen op fosfaatverzadigde bodems een herverdeling van de mestoverschotten naar omliggende gebieden plaatsvinden en dit kan daar in een aantal gevallen aanleiding geven tot grotere P-verliezen door run-off en erosie (Schiettecatte *et al.*, 2007).

De P die via run-off verloren gaat, is het grootst in het plant- en zaaiseizoen, bij hevige regen, bij hoge P_2O_5 -bemesting en bij minimale bedekking van de bodem (Sharpley *et al.*, 1994; Salomez *et al.*, 2008; McDowell, 2012).

In vlakke gebieden is oppervlakkige run-off echter van ondergeschikt belang. **In vlakke gebieden speelt P-transport door het profiel de dominante rol**, hetgeen kan leiden tot P-aanrijking van het grond- en oppervlaktewater (Salomez *et al.*, 2008). In vlakke gebieden met bodems sterk aangerijkt met P kunnen de verliezen door uitloging aanleiding geven tot concentraties in het drainwater van 1-2 mg ortho-P l^{-1} (Baert *et al.*, 1997) hetgeen 10 tot 20 maal hoger is dan de norm van 0,1 mg ortho-P l^{-1} in kleine beken. Opgelost organische P-fractie is van belang bij P-verliezen na de toediening van dierlijke mest, aangezien deze fractie het grootste deel uitmaakt van de totale P in de bodemoplossing onder een diepte van 50 cm (Chardon *et al.*, 1997; Salomez *et al.*, 2008). Het langetermijn effect van verschillende types organische bemesting op de P-vormen in de bodem en het risico op P-verliezen wordt in het doctoraat van Thijs Vanden Nest (03/11/2010 - 31/10/2014) onderzocht.

De hoge P-gehalten in zure zandbodems maken deze bodems gevoelig voor uitloging. Een onderzoek naar de fosfaatverzadigingsgraad van zure zandbodems toonde aan dat in Vlaanderen de fosfaatverzadigingsgraad tussen de meetperiode 1995-2005 en meetperiode 2009-2010 significant is toegenomen. Daarnaast is er een grote verschuiving van de bovenste naar de diepere lagen (De Bolle *et al.*, 2013a).

Bij gedraineerde percelen verbetert de aanwezigheid van drainagebuizen de stabiliteit van de bodemstructuur door het sneller verwijderen van het overtollige water op de percelen. Maar dit heeft het omgekeerd effect op de waterkwaliteit aangezien de bodem onvoldoende tijd heeft om het water te filteren en er de nutriënten uit te halen. Fosfor wordt samen met het drainwater van de bodem naar de beek of sloot waarin de drainagebuis eindigt, afgevoerd (Salomez *et al.*, 2008).

De patronen van P-belasting in het effluent van de drainagebuizen zijn gerelateerd aan bepaalde factoren zoals type en tijdstip van bemesting, voorafgaande vochtcondities, bodemtype en managementpraktijken, ... (Salomez *et al.*, 2008).

Door Brookes *et al.* (1997) werd voor Vlaamse landbouwbodems een verband gegeven tussen de procentuele fosfaatverzadiging (tot 90 cm) en de ortho-P-concentratie in drainagebuizen.

Opgeloste anorganische P wordt algemeen aanzien als de grootste fractie van de totale hoeveelheid opgeloste P in het drainagewater en wordt beschouwd als direct opneembaar voor de algen in het oppervlaktewater. Maar studies toonden aan dat opgeloste ortho-P niet noodzakelijk de grootste fractie is, aangezien er hoge concentraties opgeloste organische P in de bodemoplossing en in het uitgespoelde water kunnen gevonden worden (Chardon *et al.*, 1997; Salomez *et al.*, 2008).

De review van Doody *et al.* (2013) geeft aan dat P tijdens de opslag van dierlijke mest via run-off en uitloging verloren gaat. De verliezen zijn kleiner bij het overdekken van mesthopen (Doody *et al.*, 2013). Bij anaerobe omstandigheden stijgt de P-beschikbaarheid sterk (Vandecasteele *et al.*, 2014).

Het doctoraat van Dries Verheyen (01/10/2010 - 30/09/2014) onderzoekt het transport van opgelost organische P uit percelen naar oppervlaktewater in Vlaanderen en heeft als doelstelling om een mechanistisch model te ontwikkelen dat de hydrologische processen beschrijft op de schaal van een stroombekken.

[1.3. Mitigatiemaatregelen](#)

Oplossingen om P-verliezen vanuit de landbouwgrond te verminderen, zijn een efficiëntere P-bemesting en een vertraagde P-afvoer (Kröger *et al.*, 2013). De eerste groep van maatregelen zijn ecologisch en economisch duurzaam in landbouwbodems in het algemeen (Kronvang *et al.*, 2005; McDowell, 2010, 2012). De tweede groep zijn eerder maatregelen toepasbaar in regio's met een hoog risico van P-verlies aangezien ze vaak duur zijn.

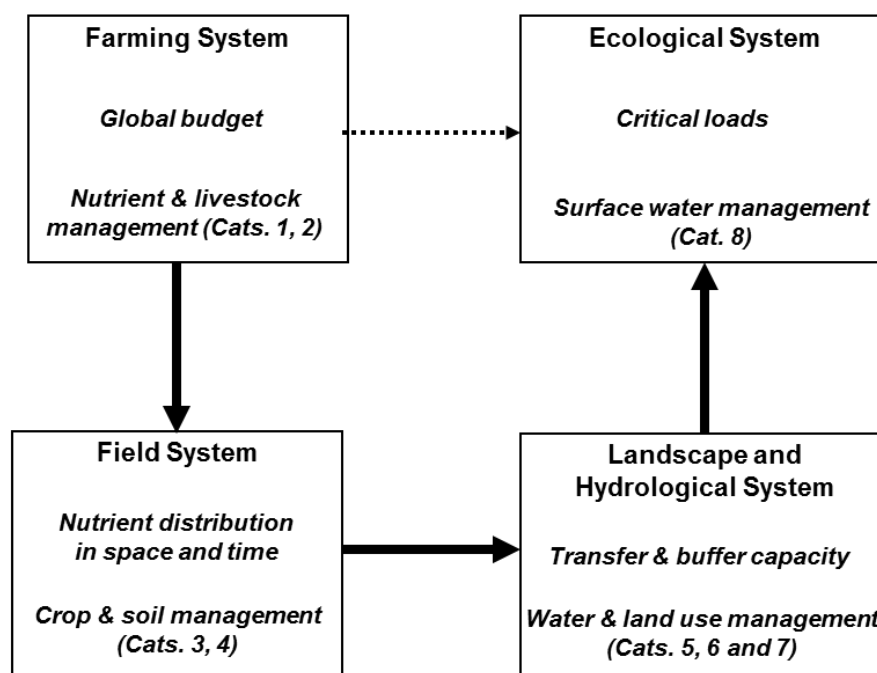
Algemene maatregelen zijn gericht op het verlagen van de bodem P-status door het verminderen van de P-input naar het agrarisch gebied en/of door het verbeteren van de P-opname. De verminderde P-input in de bodem zal de P-status verlagen maar dit heeft echter weinig of geen direct effect op de feitelijke P-verliezen uit landbouwgronden naar het oppervlaktewater, hoewel het effect op langetermijn van cruciaal belang zal zijn (Kronvang *et al.*, 2005).

In de P-cyclus in de bodem kunnen echter snelle transformaties van de ene P-vorm naar de andere plaatsvinden als reactie op veranderingen in de bodem (bv. redox, pH). Sommige van deze transformaties brengen P in het milieu in biologisch beschikbare vormen. Daarom is het beheer van P complex en vereist een goede kennis van de dominerende processen binnen het landschap. Verschillende technieken kunnen bepaalde P-vormen (d.w.z. ophoping van sediment en particulier P) behouden, terwijl ze tegelijkertijd de voorwaarden voor de afgifte van andere P-vormen creëren (bv. reductie van ijzer en desorptie van fosfaatanion) (Kröger *et al.*, 2013).

Een globaal overzicht van mitigatiemaatregelen wordt gegeven door Schoumans *et al.* (2014). Deze omhelzen:

1. **Maatregelen op het niveau van het bedrijf.** Dit houdt vooral maatregelen in op het niveau van nutriënten- en dieren-“management”.
2. **Maatregelen op het niveau van het perceel.** Hierbij wordt vooral gedacht aan wijzigingen in bodembeheer, bodembewerkingen en het aanpassen van de gewasrotatie.
3. **Maatregelen op het niveau van het bekken.** Hierbij zijn het landschap en de hydrologische omstandigheden in een bepaalde regio belangrijk.
4. **Maatregelen op het niveau van het aquatisch ecosysteem.** Hierbij wordt gedacht aan onderhoud en/of restauratie van rivierbeddingen en meren, de restauratie of het aanleggen van “wetlands”, ...

Dit kan schematisch als volgt voorgesteld worden (Fig. 2):



Figuur 2 Schematische voorstelling van de vier systemen bepalend voor P-verliezen naar het oppervlaktewater met de verschillende categorieën van mitigatiemaatregelen (Bron: Schoumans *et al.*, 2014)

Maatregelen 1 zijn hoofdzakelijk gericht op het beperken van de P-input in de bodem en het optimaliseren van de P-status van de bodem terwijl de andere maatregelen vooral focussen op het verminderen van de P-concentratie in het water.

a. Mitigatiemaatregelen op bedrijfsniveau

Door een goede keuze van het type meststof, de plaatsing en het tijdstip van de bemesting en het nemen van stalen van bodem en mest kan de efficiëntie van de P-bemesting verhoogd worden.

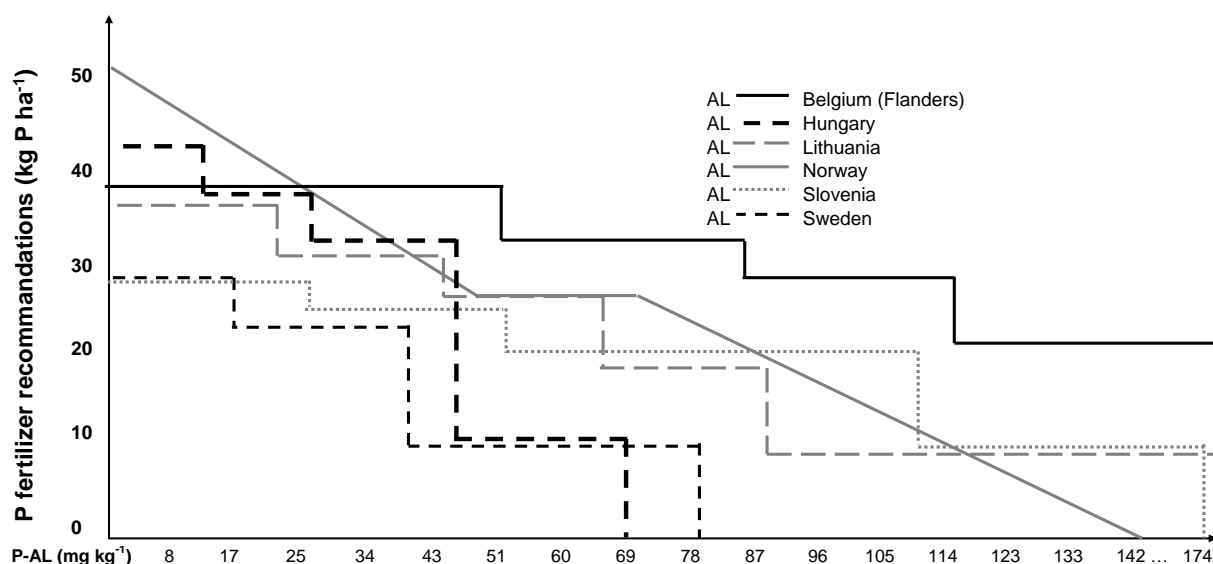
✓ **Bemestingsadvies**

De efficiëntie van P-bemesting kan verhoogd worden door zowel rekening te houden met het risico op P-verliezen als analyses van bodem en mest. Voor een economisch en ecologisch duurzaam P-beheer is het belangrijk om de P-niveaus in de bodem te identificeren die tot milieuproblemen kunnen leiden (Sharpley *et al.*, 1994). Het **P₂O₅-bemestingsadvies moet bodem- en gewasgericht** zijn (Van Dijk *et al.*, 2007).

Er zijn veel verschillende extractiemethoden om P te bepalen. Bij extractiemiddelen kan een onderscheid worden gemaakt tussen de zwakke middelen, die een maat zijn voor de fosfaatintensiteit van de bodem, en de sterke middelen, die een maat zijn voor de fosfaatcapaciteit van de bodem. De fosfaatintensiteit is de hoeveelheid ortho-P die in de bodemoplossing aanwezig is en geeft een indicatie van de hoeveelheid P die direct beschikbaar is voor het gewas gedurende een korte periode. De fosfaatcapaciteit is een maat voor de hoeveelheid ortho-P die in de vaste fase aanwezig is en die een bijdrage levert aan het weer aanvullen van de P in de bodemoplossing, indien deze voorraad teruggelopen is. De fosfaatcapaciteit geeft een indicatie van de hoeveelheid P die over een langere periode (meerdere jaren) beschikbaar kan komen (Dekker & Postma, 2008; van Rotterdam-Los, 2010).

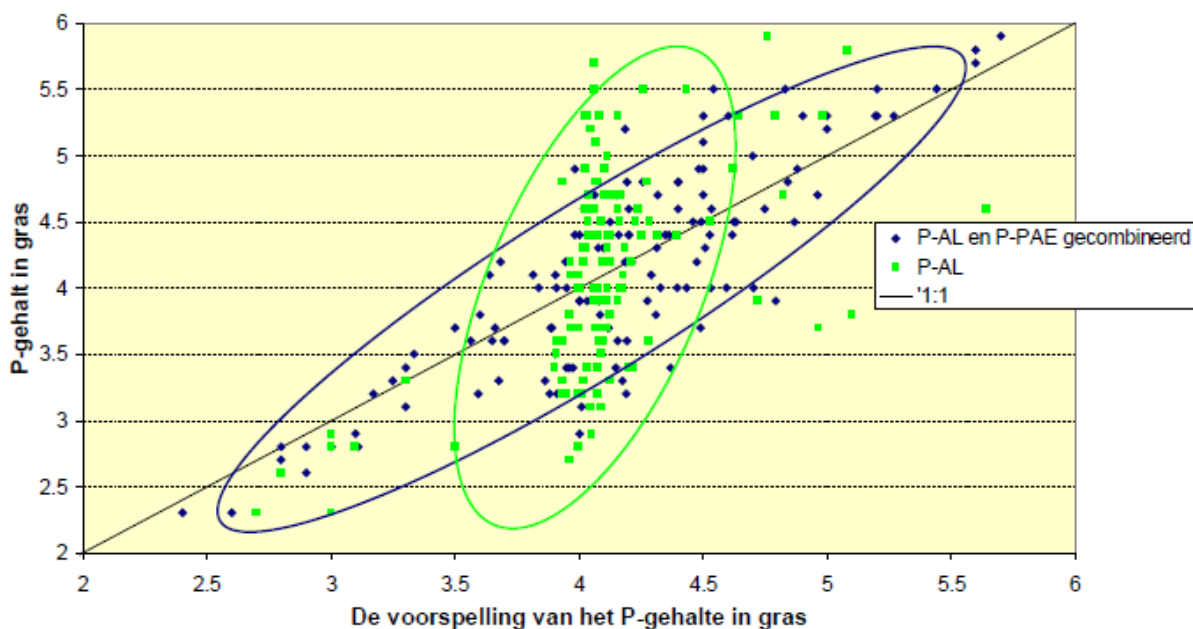
Voor het bepalen van P₂O₅-bemestingsadviezen wordt er meestal alleen gekeken naar de plantbeschikbaarheid of fosfaatcapaciteit en niet naar potentiële verliezen (Sharpley *et al.*, 1994; Jordan-Meille *et al.*, 2012). Vooral bij bodems die gevoelig zijn aan P-verliezen is het belangrijk dat de **labo-analyses en bijhorende P₂O₅-bemestingsadviezen niet alleen gebaseerd zijn op landbouwkundige overwegingen maar op het risico op P-verliezen** (Sharpley *et al.*, 1994).

De grote variatie in extractiemethoden leidt tot grote verschillen in adviezen (Jordan-Meille *et al.*, 2012). Uit de publicatie van Jordan-Meille *et al.* (2012) blijkt dat de streefwaarden in België zeer hoog liggen t.o.v. de ons omringende buurlanden (Fig. 3). **Een herevaluatie van de optimale P-gehalten en de P₂O₅-bemestingsadviezen in onze Vlaamse bodems lijkt dan ook aangewezen. Tevens is een differentiatie van de maximale toegelaten P-bemesting in functie van de P-toestand van de bodem (en eventueel de gevoeligheid van het gewas voor P-beschikbaarheid) te overwegen zoals dit het geval is in Nederland en Ierland** (Amery & Schoumans, 2014).



Figuur 3 P_2O_5 -bestedingsadviezen voor wintertarwe (6,5 ton per ha – 85% droge stof) (Jordan-Meille *et al.*, 2012)

In Nederland gaan laboratoria meer en meer over van het meten van de fosfaatcapaciteit naar intensiteit of een combinatie van beide (Russchen *et al.*, 2011). Via proeven op Nederlandse praktijkpercelen werd het concept $P-CaCl_2 + P-AL/P-CaCl_2$ voor graslanden (Fig. 4) en maïspcelen getoetst (van Rotterdam-Los, 2010; Bussink *et al.*, 2011a,b). $P-CaCl_2$ is een maat voor de directe beschikbaarheid, de $P-AL/P-CaCl_2$ -verhouding is een maat voor het nalevergedrag van de bodem. Het combineren van de twee P-kengetallen leidt tot lagere P_2O_5 -bestedingsadviezen die economisch verantwoord zijn. **Het uittesten van de meerwaarde van deze aanpak lijkt aangewezen.**



Figuur 4 Meting van 2 P-kengetallen als basis van bestedingsadvies voor grasland in Nederland (Bron: Bussink, 2013)

Het opstellen van een P-balans op bedrijfsniveau, rekening houdend met eventueel aangepaste P₂O₅-bestedingsnormen, is één van de prioriteiten om de P-problematiek in kaart te brengen.

Bijzondere aandacht moet worden besteed aan “hot spots” in de bodem vb. gebieden waar dieren samenkomen, zoals drinkbakken, voederplaatsen. Op dergelijke plaatsen zullen uitwerpselen vaak terecht komen. Het is daarom aan te raden om drink- en eetplaatsen met regelmatige intervallen te verplaatsen (Wilcock *et al.*, 1999; Schoumans *et al.*, 2014). Dit wordt nog belangrijker als deze “hot spots” samenvallen met gunstige transportfactoren.

Alleen het bepalen van de P-status van de bodem geeft geen informatie over het risico op P-verliezen naar oppervlakte- en grondwater. Daarom werd in een aantal landen en/of regio's een P-index opgesteld die het mogelijk maakt om de impact van P-bemesting en teelttechnieken in functie van een mogelijk P-verlies (in functie van P-status en transportwegen) op perceelsniveau te evalueren (Salomez *et al.*, 2008; Nelson & Shober, 2012). Een dergelijke P-index laat toe om te beslissen om al of niet te bemesten bij een individuele landbouwer (Salomez *et al.*, 2008). Een vergelijking van 17 verschillende indices op dezelfde set van percelen resulteerde in grote verschillen in de beoordeling van de percelen. Deze verschillen worden mee verklaard door het verschillend gewicht die aan de verschillende factoren vb. erosiegevoeligheid gegeven wordt en het feit dat het risico op P-verliezen niet voor alle indices onder veldomstandigheden werd bepaald. Ondanks het feit dat een kritische evaluatie van de indices noodzakelijk is, resulteerde het gebruik in een daling van de gebruikte dierlijke mest (Nelson & Shober, 2012). Een dergelijke P-index is waarschijnlijk minder geschikt voor vlakke gebieden waar de P-transport voornamelijk plaatsvindt door uitspoeling (Schoumans *et al.*, 2013).

✓ *Verhogen van efficiëntie van gebruikte meststoffen*

- Meststofkeuze

Voor de P-bemesting dient een keuze te worden gemaakt tussen minerale meststoffen en dierlijke mest of producten die vrijkomen na de bewerking van dierlijke mest (Dekker & Postma, 2008). Ook het gebruik van P gerecupereerd uit afvalwater van huishoudens en industrie en in organisch-biologische afvalstoffen (OBA) (in groente-, fruit- en tuinafval (GFT-afval), groenafval en organische bedrijfsafvalstoffen) als P-meststof wordt belangrijk in het kader van het sluiten van kringlopen en de beperkte P-voorraad.

Het is belangrijk dat de N:P-verhouding van de toegediende mest aansluit bij de N:P-verhouding van de plant. De gemiddelde N:P-verhouding van dierlijke mest en compost varieert vaak tussen 2 en 4 (Eghball, 1998; Maguire *et al.*, 2006). Aangezien de N:P-verhouding van de belangrijkste granen varieert van 4,5 tot 9 wordt vaak teveel P toegediend en neemt P in de bodem toe (Schoumans *et al.*, 2014). **Mestscheiding en/of mengen van mesten biedt mogelijkheden voor het optimaal gebruik ervan.** Ook via **co-composteren** kan de N:P-verhouding beter op de gewasbehoefte afgestemd worden (Vandecasteele *et al.*, 2014). Door de veranderde N:P-verhouding zijn de producten na de bewerking van dierlijke mest potentieel interessant als meststof. Na scheiding van dierlijke mest wordt een vloeibare fractie met een hoge N:P-verhouding en een vaste fractie met lage N:P-verhouding bekomen. Eerste proeven onder veldomstandigheden waarin de P-efficiëntie van de

nieuwe meststoffen vergeleken worden met die van de gangbare meststoffen liggen in Vlaanderen aan (vb. Arborproject, Doctoraat Thijs Vanden Nest).

Voor het (her)gebruik van P gerecupereerd uit afvalwater en in organisch-biologische afvalstoffen in of als meststof of bodemverbeterend middel, moet voldaan worden aan voorwaarden rond samenstelling en graad van verontreiniging. Ook dienen de afvalstoffen een hygiënisatie te ondergaan alvorens men deze kan toepassen als meststof of bodemverbeterend middel.

- Plaatsing en tijdstip

Aangezien fosfaat weinig mobiel in de bodem is, speelt de transportafstand tot de wortel een belangrijke rol. Daarom is de bewortelingsintensiteit belangrijk voor de beschikbaarheid van fosfaat voor het gewas. Vooral in situaties waarin de beworteling (nog) niet intensief is, bijvoorbeeld tijdens de beginfase van de groei van gewassen, kan het plaatsen van P-meststoffen in de buurt van de wortel in vergelijking met breedwerpige toepassing een positief effect hebben op de P-beschikbaarheid voor het gewas. De volgende factoren kunnen het effect van **rijenbemesting** positief beïnvloeden (van Dijk *et al.*, 2007; Dekker & Postma, 2008):

- lage fosfaattoestand bodem,
- lage vochttoestand bodem,
- lage (bodem)temperatuur,
- ruime plantafstand,
- sterke fosfaatvastlegging in de bodem,
- lage P-giften,
- combinatie van korte groeiduur en een hoge fosfaatbehoefte van het gewas.

De laatstgenoemde factor heeft vooral betrekking op groentegewassen.

Toepassingsmethoden die ervoor zorgen dat de mest geïncorporeerd worden in de bodem (vb. injectie van drijfmest) verlagen de P-verliezen (McDowell, 2012).

Naast plaatsing is ook het tijdstip van toediening erg belangrijk. Volgens Schoumans *et al.* (2014) zou het voorkomen van de toepassing van dierlijke mest en kunstmest voor de voorspelde zware of langdurige regenval een goede richtlijn zijn. Het verplicht maken van mestinjectie of onmiddellijk inwerken evenals het verbieden van nutriëntentoepassingen tijdens de winter zijn goede maatregelen om P-verliezen te verminderen. Het aanpassen van het tijdstip van bemesten om de P-efficiëntie te verhogen in functie van de plantvraag en weersomstandigheden doet echter de benodigde mestopslag capaciteit toenemen (Schoumans *et al.*, 2014).

Onderzoek naar **start-P geeft uiteenlopende resultaten**. Bovendien wordt de interpretatie van de resultaten bemoeilijkt aangezien vaak ammoniumfosfaat of minerale start-P in combinatie met dierlijke mest wordt toegediend. Dekker & Postma (2008) schrijven het positief effect van starters voornamelijk aan fosfaat toe aangezien zonder de fosfaat geen verbetering van de jeugdgroei werd geconstateerd. De starters verhoogden in het algemeen de N-recovery, waardoor bij een lagere N-input eenzelfde opbrengst en kwaliteit wordt gerealiseerd (Dekker & Postma, 2008). Veelal resulteert het effect van start-P in de rij enkel in een versnelde beginontwikkeling. Het sterke effect van de gestimuleerde beginontwikkeling nivelleert grotendeels in de loop van het groeiseizoen, waar het effect op opbrengst kleiner is of verdwijnt. Het gebruik van startermeststoffen lijkt positief bij een

lage fosfaattoestand, bij de teelt van gewassen vroeg in het seizoen en bij gewassen met een kort groeiseizoen (Dekker & Postma, 2008; Russchen *et al.*, 2011).

Onderzoek in Vlaanderen naar start-P toont positieve resultaten in de korte teelten van groenten. Het is vooral de combinatie van ammonium (NH_4^+) en fosfaat die voordeel biedt. Door de NH_4^+ verzuurt de omgeving rond de wortels en wordt P beter opgenomen. Proeven waar naast start-P in combinatie met NH_4^+ ook zuiver NH_4^+ toegediend werd, tonen aan dat het vooral de P is die zorgt voor een toename van de wortelontwikkeling en een sterkere begingroei van de plant. Dit zorgt dan weer voor een efficiëntere opname van andere nutriënten (o.a. N). Bij lange teelten (o.a. prei) vlt het effect van de startfosforstart-P af gedurende de teelt. Bij korte teelten daarentegen houden de positieve effecten aan tot bij de oogst. Om een effect te hebben is het belangrijk om de P aan de plantvoet toe te dienen aangezien P immobiel is in de bodem. (Verhaeghe, 2014a, b; Verhaeghe *et al.*, 2014).

Naarmate de tijdsduur tussen een P-bemesting en het opnamemoment door de plant groter wordt, wordt een groter gedeelte van het fosfaat vastgelegd aan o.a. bodemdeeltjes, kalk, ijzer en aluminium (Dekker & Postma, 2008; McDowell, 2012).

✓ *Veranderen van de fosforinput op bedrijfsniveau*

Voor bedrijven met een grote nutriëntenoverschot, zoals intensieve veehouderijen, kunnen er ook maatregelen bij het voederen van de dieren genomen worden. Totale P in voedergewassen overtreft vaak dierlijke eisen en kan worden gereduceerd worden zodat ook het P-gehalte in de mest afneemt. Het verminderen van de totale P in diervoeder zal de N:P-verhouding in de mest doen toenemen. Dit zal bijdragen tot het verminderen van het overschot op de P-balans van een boerderij of regio, en ook de nood om mest te vervoeren en verwerken doen dalen (Van Krimpen *et al.*, 2010, 2012).

De belangrijkste opties voor het verminderen van P-gehalte in de mest zijn (Van Krimpen *et al.*, 2010, 2012; Schoumans *et al.*, 2014):

- Voederen op basis van de groeifase van het dier
- Toevoegen van fytase aan het voeder
- Voeder met een lager P-gehalte gebruiken of produceren
- Beter verteerbaar voeder gebruiken of produceren
- Het moeilijk verteerbaar fytaat-P in planten beter beschikbaar te maken door deze voor te behandelen

✓ *Veranderen van de fosforoutput op bedrijfsniveau*

Door het be- of verwerken van de dierlijke mest kan meer P afgevoerd worden van het bedrijf.

b. Mitigatiemaatregelen op perceelsniveau

✓ *Aangepast bodembeheer*

- Vermijden van transport van sediment en particulier P via bodembeheer

Door het overschakelen van ploegen naar direct inzaai of oppervlakkige bodembewerkingen zonder het keren van de bodem wordt het transport van sediment en particulier P gereduceerd. Bij dit bodembeheer blijft meer dan 30% van de bodem bedekt door oogstresten of blijft de stoppel intact op het perceel. Het omschakelen naar ploegen volgens de hoogtelijnen en veranderen van het tijdstip van bodembewerking van de herfst naar de lente kan een positief effect hebben op de verliezen van het particulier P (Lundekvam, 2007; Schoumans *et al.*, 2014). Hogere stratificatie van de plantbeschikbare P met hogere gehalten bovenaan het bodemprofiel kan resulteren in minder P in de buurt van de wortels en hogere verliezen van opgeloste P in de run-off van minder erosiegevoelige gronden. In zware klei leidt het ploegen in het najaar (gevolgd door vriezen en dooien) tot een betere bodemstructuur dan bodembewerkingen in het voorjaar. Het is dan ook niet uitgesloten dat er in deze bodems groeibelemmering van teelten kan optreden bij ploegen in het voorjaar (Sharpley *et al.*, 1994; Schoumans *et al.*, 2014).

Het verbeteren van de fysische bodemkwaliteit (vb. opheffen van bodemcompactie) is een beheersmaatregel om de P-verliezen te beperken (Curran-Cournane *et al.*, 2010).

✓ *Aangepaste teeltkeuze en -rotatie*

- Aanpassen van het teeltsysteem

Door de keuze van de teelt of teeltrotatie kan erosie en run-off gevoelig verminderd worden. Grasland en diep wortelende gewassen kunnen hiertoe bijdragen.

- Inzaaien en oogsten van vanggewassen

Vanggewassen ingezaaid in het najaar kunnen in belangrijke mate erosie beperken. Het toepassen van groenbemesters als bladrammenas en gele mosterd zou de voorraad beschikbaar fosfaat voor het volggewas kunnen vergroten (Russchen *et al.*, 2011).

✓ *Uitmijning van de bodem*

Technieken die voor een daling van de P-hoeveelheid in de bodem zorgen, waaronder P-uitmijning, worden voorgesteld als effectieve remediatiemethoden voor sterk P-aangerijkte bodems. Fosforuitmijning resulteert in het dalen van het risico tot P-verlies als gevolg van P-opname uit de bodem door gewassen groeiend zonder of met lage P-toediening. Deze techniek heeft uiteraard enkel effect als zoveel mogelijk delen van de plant van het perceel verwijderd worden (Salomez *et al.*, 2008; Russchen *et al.*, 2011). Bij het verlagen van de P-bemesting is het echter belangrijk dat andere nutriënten geen beperkte factor zijn voor de groei van de teelt. Voor het behoud van de productie van grasland en verlaging van de P-verliezen in Nieuw-Zeeland was N-bemesting noodzakelijk (Dodd *et al.*, 2012).

Hoewel dit een eenvoudig concept betreft, is er toch voor deze techniek slechts weinig kwantitatieve informatie beschikbaar over de langetermijn veranderingen van de verschillende P-vormen in de bodem en op de opbrengst. **Het is niet bekend hoe het uitmijningsproces de directe beschikbaarheid van fosfaat onder veldomstandigheden beïnvloedt.** Bovendien is, net zoals bij het toevoegen van P-bindende producten aan de bodem of mest, de informatie over de reversibiliteit van de **globale P-reacties in P-aangerijkte bodems, en de gevolgen op de hoeveelheid plantbeschikbare P en P-uitspoeling op langetermijn schaars** (Salomez *et al.*, 2008; McDowell, 2012

Via modelberekeningen voorspellen Wall *et al.* (2013) dat bij een deficit van 30 kg P (ha.j)⁻¹ het 2 tot 10 jaar duurt eer een perceel met hoge P gedaald is tot een optimum P-status. Bij een tekort van slechts 7 kg (ha.j)⁻¹ duurt dit 5 tot 20 jaar. Deze voorspellingen benadrukken dat er een duidelijke verschuiving is in de tijd tussen het nemen van de maatregel en het moment waarop het effect zichtbaar wordt (Wall *et al.*, 2013). Pot- en serre-experimenten geven aan dat P-uitmijning zonder gewasderving een effectieve beheersmaatregel kan zijn voor een verlaging van de P-hoeveelheid in de bodem (Salomez *et al.*, 2008). Uit een proef te Gembloux, aangelegd sinds 45 jaar, blijkt dat, in afwezigheid van input van P en kalium (K), de reserve van de leembodem langzaam vermindert, maar uiteindelijk toch kritieke waarden behaalt die na ongeveer 2 decennia aanzienlijke opbrengstdalingen veroorzaken (Legrand *et al.*, 2012). Een evaluatie van de fosfaatproefpercelen met zowel akkerbouwgewassen als vollegrondsgroenten in Nederland gaf bij het object 'geen P₂O₅-bemesting/toestand laag' een opbrengst dat gemiddeld 9% lager was dan bij het object '70 kg P₂O₅ per ha/toestand ruim voldoende'. Opvallend is dat er geen sprake was van een cumulatief effect (Van Dijk *et al.*, 2007).

Zonder specifieke aandacht voor de aanvoer van organische materiaal kan uitmijning van fosfaat resulteren in een negatieve organische koolstofbalans (Russchen *et al.*, 2011). De Demeter -tool berekent verschillende scenario's voor het op peil houden van BOS uitgaande van zeer sterk verschillende bemestingsstrategieën.

Bij HoGent lopen enkele projecten om via versnelde P-uitmijning soortenrijke vegetatietypes te herstellen (Project 'Fytoextractie van fosfor: een haalbare maatregel voor natuurontwikkeling?' (01/02/2011 - 30/09/2013) & Doctoraatsproject 'Rol van fosfor en bodembiota bij het herstel van soortenrijke vegetatietypes via uitmijnen' van Stephanie Schelfhout (01/12/2012 - 30/11/2018)). PCFruit onderzoekt het effect van nulbemesting op de P-uitmijning en -opname bij pitfruit (peer) en aardbei.

✓ *Toevoegen van chemische componenten om fosfor vast te leggen*

Een mogelijkheid om P-uitloging te verminderen, is bekijken of het toevoegen aan de bodem van producten waardoor de P-sorptiecapaciteit stijgt. In het doctoraat van De Bolle (UGent) werden een aantal van deze producten getest (mineralen zoals olivien, biotiet, zeolieten, gips, een gesteente bauxiet, een industrieel bijproduct, met name Fe-"sludge" en een paar specifiek gemaakte producten). Fixatie- en uitlogingsproeven tonen aan dat producten die Fe, Al of Ca bevatten potentieel hebben om P vast te leggen in fosfaatverzadigde zure zandbodems. Voor sommige van de geteste mineralen of secundaire producten dient eventueel eerst een voorbehandeling te gebeuren waardoor de fixerende elementen beter beschikbaar komen. Ook een veldproef in een zandbodem in

Nederland gaf aan dat het toedienen van producten die het fosfaatbindend vermogen (FBV) verhogen in een strook langs het oppervlaktewater de P-verliezen reduceren. De procentuele verlaging van de verliezen hangt af van de diepte van de inwerking van het product (Schoumans *et al.*, 1995; Kronvang *et al.*, 2005). Uusi-Kämpä *et al.* (2012) vonden dat de toevoeging van Fe-componenten resulteerde in een duidelijke daling van het opgelost P via run-off in regenvalsimulatie experimenten.

Ondanks de technische oplossingen om P-bindende producten in de bodem te brengen, dienen nog een aantal socio-economische barrières onderzocht te worden (Stutter *et al.*, 2012). De kosteneffectiviteit van het toedienen van P-bindende producten verhoogt bij een hogere P-status. De grenswaarde voor het toedienen van P-bindende producten hangt af van het risico op P-verliezen en de bereidwilligheid van de maatschappij om voor waterkwaliteit te betalen (Iho & Laukkanen, 2012). Tevens dient nagegaan te worden of deze producten voldoende vrij zijn van zware metalen en hoogstens geringe hoeveelheden P bevatten.

Sinds enkele jaren wordt ook het effect van het toedienen van producten aan de mest onderzocht. (Kröger *et al.*, 2013). Eén van de onderzochte pistes is de toediening van afvalwaterresidu “water-treatment residual” (WTR) aan bodem en mest. Studies tonen aan dat P snel en bijna onomkeerbaar door WTR geadsorbeerd wordt, wat een langetermijn stabiele immobilisatie van WTR-gebonden P suggereert. De toediening van WTR kan echter P-deficiëntie in gewassen veroorzaken zodat verder onderzoek nodig is (Ippolito *et al.*, 2011). Ook werd er een daling van de P-verliezen vastgesteld bij het toedienen van aluminiumsulfaat aan mest (Kronvang *et al.*, 2005).

Het toedienen van producten aan bodem of mest gebeurt in de praktijk niet vaak. De belangrijkste argumenten zijn de kostprijs en de vrees voor negatieve effecten op het milieu, dierenwelzijn en opbrengst van de gewassen (Kronvang *et al.*, 2005; McDowell, 2010).

Een mogelijk alternatief is het inzetten van deze producten aan de uitlaat van drainagebuizen. Het voordeel is dat de hoeveelheid product vele malen geringer is dan het toepassen op het veld als dusdanig.

✓ *Verbeterde benutting van fosfor in de bodem*

Het gebruik van fosfaatoplossende bacteriën (PSB) heeft onder veldomstandigheden aangetoond dat PSB potentieel heeft als biomeststof in P-deficiënte bodems. Dit positief effect werd zowel bij wintertarwe, mais, zonnebloem, katoen, komkommer, ... vastgesteld. Fosfaatoplossende bacteriën verhogen de P-beschikbaarheid door het verlagen van de pH, microbiële productie van organische zuren en/of mineralisatie van organische P (Awasthi *et al.*, 2011). De 4 weken durende laboproef van de Bolle *et al.* (2013b) toonde aan dat PSB ook potentieel heeft bij fosfaatverzadigde zandgronden. Pot- en veldproeven werden aangelegd om het effect van PSB bij bodems met een hoge P-status verder te evalueren. Het idee is dat bij P-bemestingsrestricties door het gebruik van PSB de beschikbare P toch hoog genoeg zou blijven zodat er geen restricties zijn in P-opname.

Onder fosfaatarme omstandigheden kunnen ook mycorrhiza's het gewas van extra fosfaat voorzien. De teelt van goede waardplanten voor mycorrhiza kan de kolonisatie van mycorrhiza voor het volggewas bevorderen (Russchen *et al.*, 2011).

Veldproeven met geïnoculeerde bacteriën, schimmels en mycorrhiza zijn schaars en de resultaten nogal wisselend (Richardson, 2000; Russchen *et al.*, 2011). Veldproeven bij verschillende pH, gehalten aan organische stof, Al, totale P, enz. en onder ongecontroleerde omstandigheden qua temperatuur, vochtgehalte en aanwezige bodemleven moeten nog onderzoeken voor welke bodems het verhogen van de P-beschikbaarheid in het veld technisch en economisch haalbaar (Salomez *et al.*, 2008; Buda *et al.*, 2012). Onder veldomstandigheden is echter de concurrentie tussen verschillende soorten bacteriën en schimmels groot, waardoor de kans tot overleving van de geïnoculeerde bacteriën/schimmels/mycorrhiza klein is (Richardson, 2000; Russchen *et al.*, 2011).

Naast biologische methoden om de P-beschikbaarheid (in de nabijheid van wortels) te beïnvloeden hebben laboproeven ook het potentieel van chemische methoden (bv. plaatselijke verzuring) als mogelijkheid aangetoond. In Vlaanderen werd een positief effect van humuszuren op de P-opname van grasland, mais en aardappelen bij een lage bodemvruchtbaarheid vastgesteld. Humuszuren kunnen de fosfaatadsorptie in de bodem beperken en hierdoor resulteren in hogere P-beschikbaarheid voor het gewas. Hierdoor kan de P-gift voor sommige gewassen worden verlaagd. Dit kan door een direct effect van humuszuren (hogere P-beschikbaarheid in de bodem) als indirect (betere beworteling) (Verlinden *et al.*, 2009, 2010; Russchen *et al.*, 2011). Bij PCS loopt onderzoek over het effect van humuszuren bij de beuk.

c. Mitigatiemaatregelen op bekkenschaal

Het beperken van transportmogelijkheden zijn vaak maatregelen die nog niet op grote schaal in de praktijk getest zijn. De toepassing van de verschillende opties op bekkenniveau in combinatie met monitoring van de waterkwaliteit en een socio-economische analyse is noodzakelijk om de effectiviteit van de maatregelen te evalueren (Kröger *et al.*, 2013).

Naast het beoordelen van het risico op P-verliezen op perceelsniveau is het belangrijk om risicogebieden/percelen te prioriteren binnen een bekken om kosteneffectief maatregelen te kunnen uitvoeren. Beperken van transportmogelijkheden zijn duurdere maatregelen die het best ingezet kunnen worden op aaneensluitende percelen met een hoge P-gehalte op de meest kritische plaatsen van een bekken (Kronvang *et al.*, 2005; McDowell, 2012).

Bij sommige maatregelen is het ook noodzakelijk om schema's op te maken voor het onderhoud of vernieuwing van de installatie om op langetermijneffect te behouden (Kröger *et al.*, 2013).

Watergerelateerde maatregelen focussen vooral op het wijzigen van de lengte van de "pathway" en de snelheid van het water van de bron naar de ontvangende wateren door het wijzigen van de drainagecondities. Hierdoor kan meer sedimentatie optreden onderweg en kan opgeloste P beter in de bodem filtreren.

Door het sturen van de drainage, kan de snelheid van de waterafvoer en nutriëntenverlies verlaagd worden. Gestuurde drainage kan zorgen voor lagere P-verliezen in vergelijking met gedraineerde percelen. Hierbij moet er aandacht zijn voor mogelijk "pollution swapping". Door vb. het verlagen van de grondwatertafel zal P-uitloging verminderen maar NO₃⁻-concentraties kunnen stijgen door het verminderen van de denitrificatie in drogere bodems.

Gewijzigd landgebruik op bekken- of subbekkenniveau kan ervoor zorgen dat er steeds voldoende vegetatie aanwezig is om erosie te beperken.

Fosforverliezen kunnen eveneens beperkt worden door het aanleggen van bufferstroken aan de perceelgrenzen of aan de rand van de sloot. Het effect van de bufferstrook hangt af van de P-status van de bodem en de helling van het perceel (McDowell, 2010; Noij *et al.*, 2013). Door het verwijderen van vegetatie, wordt ook de opgenomen P van de bufferstrook verwijderd (Stutter *et al.*, 2012). De vermindering van de verliezen van particulier P zijn hoger dan van het opgeloste P (McDowell, 2012).

De kosteneffectiviteit van bufferstroken kan verhoogd worden door hun aanleg op de meest kritische plaatsen in een bekken te plaatsen. Een variabele breedte van de bufferstroken afhankelijk van het risico op P-verliezen vraagt echter een flexibel beleid (Balana *et al.*, 2012; Stutter *et al.*, 2012). Balana *et al.* (2012) berekenden dat afhankelijk van de beoogde % daling van P-verliezen en de P-status van het perceel de gemiddelde kost van 33 tot 204 dollar per kg P reductie kan variëren bij de aanleg van variabele bufferstroken.

Een alternatieve optie is om het run-off water op te vangen en te filteren voor het in het oppervlaktewater terechtkomt (Kröger *et al.*, 2013).

In 2009 is in Nederland onderzoek opgestart naar het gebruik van riet in sloten als helofytenfilter om N en P weg te vangen uit het oppervlaktewater. Waterplanten kunnen nutriënten uit het oppervlaktewater opnemen. Een optie is om deze af te voeren om de nutriënten definitief te verwijderen en daarna te vergisten of composteren. Een andere optie is om het riet niet jaarlijks te maaien maar mogelijk daalt de zuiverende werking van de waterplanten. De economische en ecologische effecten van het gebruik van waterplanten om nutriënten uit het oppervlaktewater te verwijderen zijn niet gekend (De Buck *et al.*, 2012).

d. Mitigatiestrategieën in het aquatisch systeem

Mogelijkheden hierbij zijn het verhogen van de nutriëntenretentietijd in een sloot of een meer waardoor depositie van partikels kan optreden. Het toevoegen van Fe-, Al- of Ca-zouten kunnen P in meren inactiveren. Het restaureren of het aanleggen van "wetlands" zijn andere mogelijkheden om P te verwijderen door sedimentatie en sorptie.

2. Kennishiaten en onderzoeksnoden in het kader van de fosforproblematiek in de landbouw gelinkt aan de waterkwaliteitsdoelstellingen van MAP IV ter voorbereiding van MAP V

2.1. Inleiding

In tegenstelling tot de nitraatproblematiek zijn er momenteel nagenoeg geen efficiënte maatregelen ter beschikking om op relatief korte termijn (enkele jaren) een belangrijke positieve impact te realiseren op de P-concentraties in grond- en oppervlaktewater. Er is een dringende nood aan onderzoek naar beheermaatregelen die moeten toelaten de P-concentraties op een termijn van jaren significant te doen afnemen. Dit moeten concrete maatregelen zijn die op perceel- of bedrijfsniveau genomen kunnen worden, en voor Europa aantonen dat er wel degelijk realistische vooruitzichten op verbetering van de waterkwaliteit met betrekking tot P zijn op middellangetermijn.

2.2. Fosfor in de bodem en transportwegen van fosfor naar grond- en oppervlaktewater

Zoals uit voorgaande blijkt, situeren de P-verliezen zich op twee niveaus, met name verliezen door run-off en erosie in hellende gebieden en verliezen door uitloging in vlakke gebieden. Globaal kan gesteld worden dat verliezen door run-off en erosie van een andere orde (duidelijk hoger) zijn dan verliezen door uitloging. Er is reeds veel onderzoek verricht rond erosie met tevens het laatste decennium meer en meer aandacht voor nutriëntenverliezen door run-off en erosie. Het beleid heeft daar ook op ingespeeld met het aanduiden van erosiegevoelige gebieden in Vlaanderen (zelfs op gemeentelijk niveau) met als eerste doelstelling reductie van sedimentafspoeling, bodemverlies en het tegengaan van offside effecten. Het implementeren van maatregelen die sedimentverlies tegengaan, zijn uiteraard direct relevant om verliezen van nutriënten te beperken of de nutriënten te capteren vooraleer deze in het oppervlaktewater terechtkomen.

Potentiële P-verliezen door uitloging in zuur zandige bodems zijn gebaseerd op het protocol fosfaatverzadigde gronden (Van der Zee *et al.*, 1988, 1990a, b). Aangezien er in gans Vlaanderen overschrijdingen van de ortho-P-concentratie in het grond- en oppervlaktewater gemeten worden, rijst de vraag of het begrip ‘fosfaatverzadigde gronden’ naar andere texturen uitgebreid kan worden. Er is nood aan een staalname- en meetprotocol dat op een eenvoudige wijze het verband aangeeft tussen de P-hoeveelheid in niet-zandbodems en het risico op P-verliezen naar het grond- en oppervlaktewater. Het opstellen van een dergelijk protocol vereist nog fundamenteel onderzoek, niet in het minst om de diverse achterliggende mechanismen van retentie en vrijstelling van de verschillende P-vormen bij bodems met een verschillende textuur en beheergeschiedenis te begrijpen. Dit is niet alleen noodzakelijk vanuit ecologisch standpunt maar ook vanwege het gelijkheidsbeginsel tussen landbouwers.

Zoals voor NO_3^- dient een screening te gebeuren van de ortho-P-concentraties in het MAP-meetnet en dient nagegaan te worden welke de belangrijkste transportweg is, run-off en erosie of drainage. Naast de geomorfologie van het landschap kan de ortho-P-concentratie in het grondwater op het niveau van de bovenste filter grotendeels uitsluitend geven welke transportweg de belangrijkste is en waarop primordiaal moet ingezet worden om de P-concentraties in het oppervlaktewater naar beneden te halen. Op basis hiervan kunnen wellicht focusgebieden aangeduid worden,

vergelijkbaar met de focusgebieden voor N. Voor de te nemen maatregelen dient ook nog supplementaire kennis opgebouwd te worden.

Erosie en run-off processen en de daaraan gekoppelde verliezen van o.a. fosfaten kunnen modelmatig begroot worden (Schiettecatte, 2006; ArcNemo, 2014, in druk). Dit is veel minder het geval voor het begroten van **P-uitlogingsverliezen. Onderzoek naar de P-dynamiek in de bodem, uitspoeling naar diepere lagen, beweging vanuit de bodem naar grond- en oppervlaktewater is noodzakelijk.** Hiervoor is het verder uittesten (in beperkte mate uitgevoerd door de Bolle, 2013) van de mogelijkheden van het recent ontwikkelde PLEASE-model (Phosphorus LEAching from Soils to the Environment (Van der Salm *et al.*, 2011; Schoumans *et al.*, 2013)) aangewezen t.o.v. de potentiële P-uitloging gebaseerd op de fosfaatverzadigingsgraad. Dit is fundamenteel noodzakelijk om daarna de effecten van mogelijke maatregelen voldoende te kunnen begroten.

2.3. Mitigatiemaatregelen

Mitigatiemaatregelen waarbij nog kennis dient opgebouwd te worden, behoren zowel tot bedrijfs-, perceels- als bekkenniveau.

a. Mitigatiemaatregelen op bedrijfsniveau

✓ Optimaliseren van fosfaatbemestingsnormen en –adviezen

Wil men de P-bemesting in de land- en tuinbouw verder optimaliseren en de P₂O₅-bemestingsnormen praktisch onderbouwen, dan is informatie over de P-opname van land- en tuinbouwteelten voor Vlaamse omstandigheden (hoge en gemiddelde opbrengst) essentieel. **Na een inventarisatie van de gemeten P-opname aan de hand van beschikbare proeven uit het verleden moeten bijkomende veldproeven gericht de informatie over P-opname van land- en tuinbouwgewassen vervolledigen.**

Vooraf over de P-opname van groenten en de sierteelt is weinig informatie beschikbaar. Voor de sierteelt moet naast de zeer grote diversiteit in gewassen rekening worden gehouden met teeltduur (1-jarig t.o.v. meerjarig), groeipatronen (ritmische groei t.o.v. continue groei), ... Om de P-bemestingsgift beter af te stemmen op de behoefte, dient het opnamepatroon van de gewassen gedurende de teelt beter gekend te zijn. Daarvoor zijn analyses op langere termijn vereist. Bij planten met ritmische groei is het ook wenselijk om op frequente tijdstippen gedurende het seizoen analyses te doen.

Naast het aanleggen van proefvelden kan het meten van de P-opname op praktijkbedrijven (die reeds in het kader van andere metingen opgevolgd worden) nuttige informatie verschaffen.

De P-concentraties in de verschillende gewassen bij de oogst in Vlaanderen dienen geconfronteerd te worden met deze vastgesteld in de ons omringende landen met vergelijkbare klimaatsomstandigheden en opbrengstniveaus. Het is niet uitgesloten dat op bodems met hoge P-gehalten er luxe-consumptie optreedt, m.a.w. men dezelfde opbrengsten kan halen met lagere P-concentraties.

Uit het overzichtartikel van Jordan-Meille *et al.* (2012) blijkt dat in Vlaanderen de P_2O_5 -bemestingsadviezen en de optimale P-gehalten in de bodem duidelijk hoger liggen dan in de andere Europese landen. **Aanpassingen van de P-fertiliteitsklassen, differentiatie van maximale toegelaten P-bemestingen in functie van de P-toestand van de bodem en de gevoeligheid van het gewas voor P-beschikbaarheid zijn mogelijke onderzoeksitems. Hierbij sluiten de mogelijkheden aan van onderzoek naar een combinatie van P-capaciteit en P-intensiteit om nog beter verantwoorde P_2O_5 -bemestingsadviezen te formuleren.**

Resultaten van rij- of bandbemesting met P t.o.v. breedwerpige toepassing alsook het effect van start-P-bemesting dienen opgelijst te worden. Bijkomend onderzoek over start-P moet aantonen hoe een kleine dosis verstandig toegediende P dicht bij de wortels kan besparen op de totale P-gift tijdens de teelt. In dit kader is het ook opportuun de verschillende P-analysemethoden te evalueren om een techniek te selecteren die het mogelijk maakt op voorhand in te schatten of een start-P-gift effect zal hebben. **Het recycleren van P en werking van deze gerecycleerde componenten in de bodem is ook een aandachtspunt.**

b. Mitigatiemaatregelen op perceelsniveau

✓ *Fosforuitmijning en mogelijke effecten*

Door het creëren van een negatieve balans met P_2O_5 -bemestingsnormen die lager zijn dan de P-export worden de bodems geleidelijk aan uitgemijnd. **Het is echter niet bekend hoe het uitmijningsproces de directe P_2O_5 -beschikbaarheid onder veldomstandigheden beïnvloedt.**

✓ *Verhogen van het P-bindend vermogen van de bodem*

Een alternatieve optie om P-verliezen te beperken, is het vastleggen van de P in de bodem door het **verhogen van het FBV van de bodem, het coaten van drains of het capteren van P aan de uitlaat van drainagebuizen. Mogelijkheden van deze opties dienen uitgetest te worden op sterk fosfaatverzadigde bodems.**

✓ *Verbeterde benutting van fosfor*

Zowel bij P_2O_5 -bemestingsnormen lager dan de P-export als bij een verhoogd FBV, dient **het potentieel van een betere benutting van de fosfaatvoorraden in de bodem door het gebruik van PSB nagegaan te worden.**

Voor de verschillende mitigatiemaatregelen op bedrijfsniveau is het belangrijk om niet alleen het effect op het milieu maar ook de technische haalbaarheid en economische gevolgen in te schatten. Voor de beheersopties uitmijnen en het verhogen van FBV is het belangrijk om ook het effect op de opbrengst en kwaliteit van de gewassen onder veldomstandigheden te onderzoeken.

✓ *Beperking van P-verliezen op rotatieniveau*

Doorrekening van nutriëntenbalansen van een verschillende gewaskeuze en –frequentie, inpassen groenbemesters, bemestingsstrategieën,... **op bedrijfsniveau** bieden een belangrijke toegevoegde waarde bovenop de perceelsgerichte adviezen. Dit moet leiden tot rotaties die een maximale P-uitmijning toelaten.

c. Mitigatiemaatregelen op bekkenniveau

✓ *Identificatie van risicogebieden*

Naast de P-status van het perceel speelt ook de aanwezigheid van transportwegen een rol in het risico op P-verliezen. De impact van erosie, drainage en fixatie/precipitatie met Fe op de toevoer van niet alleen ortho-P maar ook van opgeloste organische P moeten onderzocht worden. **Procesonderzoek en veldstudies zijn nodig om de diverse achterliggende mechanismen van retentie en vrijstelling te begrijpen en om de aanvoer naar het oppervlaktewater te voorspellen (modelleren) op basis van landgebruik en karakteristieken van het waterbekken.** Zo zullen de maatregelen kostenefficiënter kunnen ingezet worden op die percelen die het meest gevoelig zijn voor P-verliezen. Deze prioritering zal het beleid kunnen helpen om de middelen en maatregelen hier optimaal op af te stemmen en zo de grootste verbetering in waterkwaliteit te realiseren.

Als dit technisch mogelijk is, dienen de resultaten opgeschaald te worden naar Vlaanderen, of dient tenminste aangegeven te worden hoe dit zou kunnen gebeuren en welke gegevens daartoe nodig zijn.

Afkortingen

Al	aluminium
BOS	bodemorganische stof
Ca	calcium
FBV	fosfaatbindend vermogen
Fe	ijzer
GFT-afval	groente-, fruit-, en tuinafval
ha	hectare
j	jaar
K	kalium
kg	kilogram
l	liter
MAP	mestactieplan
Mg	magnesium
N	stikstof
NH ₄ ⁺	ammonium
NO ₃ ⁻	nitraat
OBA	organisch-biologische afvalstoffen
P	fosfor
P ₂ O ₅	fosfaat of fosforpentoxide
P-AL	fosfor extraheerbaar met ammoniumlactaat azijnzuur
P-CaCl ₂	fosfor extraheerbaar met calciumdichloride
PLEASE	Phosphorus LEAching from Soils to the Environment
PO ₄ ³⁻ , HPO ₄ ²⁻ en H ₂ PO ₄ ⁻	anorganische fosfor of orthofosfaat
PSB	fosfaatoplossende bacteriën
WTR	water-treatment residual
µm	micrometer

Lijst van figuren

Figuur 1	Evolutie van de orthofosfaatconcentratie in het MAP-meetnet en in het Operationeel Meetnet Vlaamse Waterlichamen (Bron: VMM, 2013)	3
Figuur 2	Schematische voorstelling van de vier systemen bepalend voor P-verliezen naar het oppervlaktewater met de verschillende categorieën van mitigatie maatregelen (Bron: Schoumans <i>et al.</i> , 2014)	7
Figuur 3	Fosfaatbemestingsadviezen voor wintertarwe (6,5 ton ha ⁻¹ – 85% droge stof) (Bron: Jordan-Meille <i>et al.</i> , 2012)	9
Figuur 4	Meting van 2 P-kengetallen als basis van bemestingsadvies voor grasland in Nederland (Bron: Bussink, 2013)	9

Referenties

- Anderson, D.W., Glibert, P.M., Burkholder, J.M., 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries* 25(4B), 704-726.
- Amery, F., Schoumans, O.F., 2014. Agricultural phosphorus legislation in Europe. ILVO, Merelbeke, België, 45 p.
- Awasthi, R., Tewari, R., Nayyar, H., 2011. Synergy between plants and P-solubilizing microbes in soils: effects on growth and physiology of crops. *International Research Journal of Microbiology* 2(12), 484-503.
- Baert, L., Depuydt, S., De Smet, J., Hofman, G., Scheldeman, K., Vanderdeelen, J., Van Meirvenne, M., Lookman, R., Merckx, R., Schoeters, L., Vlassak, K., De Gryse, S., Hartmann, R., Seuntjes, P., Verplancke, H., Verschoore, P., 1997. Fosfaatverzadiging van zandige bodems in Vlaanderen. Studie in opdracht van Vlaamse Landmaatschappij (VLM), Brussel, België, 143 p.
- Balana, B.B., Lago, M., Baggaley, N., Castellazzi, M., Sample, J., Stutter, M., Slee, B., Vinten, A., 2012. Integrating economic and biophysical data in assessing cost-effectiveness of buffer strip placement. *Journal of Environmental Quality* 41, 380–388.
- Bogstrand, J., Kristensen, P., Kronvang, B., 2005. Source apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment. European Environment Agency, Copenhagen, Denemarken, 48 p.
- Brookes, P., Heckrath, G., De Smet, J., Hofman, G., Vanderdeelen, J., 1997. Losses of phosphorus in drainage water. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C., Johnston, A.E. (Eds.), *Phosphorus loss from soil to water*. CAB international, Wallingford, UK, p. 253-271.
- Buda, A.R., Koopmans, G.F., Bryant, R.B., Chardon, W.J., 2012. Emerging technologies for removing nonpoint phosphorus from surface water and groundwater: introduction. *Journal of Environmental Quality* 41, 621–627.
- Bussink, W., 2013. Nieuw P-bemestingsadvies voor grasland en maïs. Themamiddag 'Haal meer uit P-bemestingsadvies op gras en maïs', 14/02/2013, Nijkerk, Nederland. http://www.archief.verantwoordeveehouderij.nl/Producten/PZprojecten/CommissieBemesting/2%20Wim_Bussink_CBGV_P%20advies%20grasmais_def%20v2.pdf
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., van den Draai, H., Temminghoff, E.J.M., 2011a. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 1 snijmaïs. Rapport 1246.1, Nutriënten Management Instituut (NMI), Wageningen, Nederland, 57 p.
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., van den Draai, H., Temminghoff, E.J.M., 2011b. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 2 grasland. Rapport 1246.2, Nutriënten Management Instituut (NMI), Wageningen, Nederland, 54 p.
- Carpenter, S.R., 2008. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, 11039-11040.
- Chardon, W.J., Oenema, O., del Castilho, P., Vriesema, R., Japenga, J., Blaauw, D., 1997. Organic phosphorus in solutions and leachates from soils treated with animal slurries. *Journal of Environmental Quality* 26, 372–378.
- Currán-Cournane, F., McDowell, R.W., Littlejohn, R., Condrón, L.M., 2010. Effects of stock type on soil physical properties and losses of phosphorus and suspended sediment in surface runoff. 19th World Congress of Soil Science 'Soil Solutions for a Changing World', 1-6/08/2010, Brisbane, Australië, p. 92-95.
- De Bolle, S., 2013. Phosphate saturation and phosphate leaching of acidic sandy soils in Flanders: analysis and mitigation options. Doctoraatsthesis, UGent, Gent, België, 181 p.
- De Bolle, S., De Neve, S., Hofman, G., 2013a. Rapid redistribution of P to deeper soil layers in P saturated acid sandy soils. *Soil Use and Management* 29 (Suppl. 1), 76–82.

- De Bolle, S., Gebremikael, M.T., Maervoet, V., De Neve, S., 2013b. Performance of phosphate-solubilizing bacteria in soil under high phosphorus conditions. *Biology and Fertility of Soils* 49(6), 705-714.
- de Buck, A.J., van Gerven, L.P.A., van Kleef, J., van der Schoot, J.R., van Wijk, G.C.A., Buijert, A., van der Bolt, F.J.E., 2012. Helofytenfilters in sloten. *Schoonheid door eenvoud*. WUR, Wageningen, Nederland, 84 p.
- Dekker, P.H.M., Postma, R., 2008. Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting. Bureaustudie in opdracht van Productschap akkerbouw, Wageningen, Nederland, 28 p.
- Dodd, R.J., McDowell, R.W., Condron, L.M., 2012. Using nitrogen fertiliser to decrease phosphorus loss from high phosphorus soils. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 74, 121-126.
- Doody, D.G., Bailey, J.S., Watson, C.J., 2013. Evaluating the evidence-base for the Nitrate Directive regulations controlling the storage of manure in field heaps. *Environmental Science and Policy* 29, 137-146.
- EC, 2002. Eutrophication and health. Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, Luxemburg, 28 p.
- Eghball, B., 1998. Phosphorus and nitrogen based manure and compost application. *Manure Matters* 9, 2.
- Herath, G., 1997. Freshwater algal blooms and their control: comparison of the European and Australian experience. *Journal of Environmental Management* 51, 217-227.
- Iho, A., Laukkanen, M., 2012. Gypsum amendment as a means to reduce agricultural phosphorus loading: an economic appraisal. *Agricultural and Food Science* 21, 307-324.
- Ippolito, J.A., Barbarick, K.A., Elliott, H.A., 2011. Drinking water treatment residuals: a review of recent uses. *Journal of Environmental Quality* 40, 1-12.
- Jordan-Meille, L., Rubæk, G.H., Ehlert, P.A.I., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolo, G., Barraclough, P., 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management* 28(4), 419-435.
- Kirkkale, T., Ventelä, A.-M., Tarvainen, M., 2012. Fosfijt in an agricultural catchment: a long-term field-scale experiment. *Agricultural and Food Science* 21, 237-246.
- Koopmans, G., Chardon, W., Belder, P., Groenenberg, B.-J., 2011. Verwijdering van fosfaat uit bodemwater met ijzerzand: de omhulde drain. *H₂O* 20, 35-38.
- Kröger, R., Dunne, E.J., Novak, J., King, K.W., McLellan, E., Smith, D.R., Strock, J., Boomer, K., Tomer, M., Noe, G.B., 2013. Downstream approaches to phosphorus management in agricultural landscapes: Regional applicability and use. *Science of the Total Environment* 442, 263-274.
- Kronvang, B., Bechmann, M., Lundekvam, H., Behrendt, H., Rubæk, G.H., Schoumans, O.F., Syversen, N., Andersen, H.E., Hoffmann, C.C., 2005. Phosphorus losses from agricultural areas in river basins: effects and uncertainties of targeted mitigation measures. *Journal of Environmental Quality* 34, 2129-2144.
- Legrand, G., Roisin, C., Bries, J., Destain, J.P., 2012. PK bemesting in de biet: Bedenkingen op de lange termijn! *De Bietplanter* 07-08/2012, 7-8.
- Lundekvam, H., 2007. Plot studies and modelling of hydrology and erosion in southeast Norway. *Catena* 71, 200-209.
- Maguire, R.O., Brake, J.T., Plumstead, P.W., 2006. Phosphorus in manure: Effect of diet modification. *Encyclopedia of Soil Science* 1, 1285-1287.
- McDowell, R.W., 2010. The efficacy of strategies to mitigate the loss of phosphorus from pastoral land use in the catchment of Lake Rotorua. AgResearch Ltd., Whakatane, Nieuw-Zeeland, 29 p.

- McDowell, R.W., 2012. Minimising phosphorus losses from the soil matrix. *Current Opinion in Biotechnology* 23, 860-865.
- Nelson, N.O., Shober, A.L., 2012. Evaluation of phosphorus indices after twenty years of science and development. *Journal of Environmental Quality* 41(6), 1703-10.
- Noij, I.G.A.M., Heinen, M., Heesmans, H.I.M., Thissen, J.T.N.M., Groenendijk, P., 2013. Effectiveness of buffer strips without added fertilizer to reduce phosphorus loads from flat fields to surface waters. *Soil Use and Management* 29 (Suppl. 1), 162–174.
- Onderzoeks- en voorlichtingsplatform duurzame bemesting, 2012. Visietekst 'Onderzoeksnoden in het kader van de nutriëntenproblematiek in de landbouw gelinkt aan de waterkwaliteitsdoelstellingen van MAP IV ter voorbereiding van MAP V'. Onderzoeks- en voorlichtingsplatform duurzame bemesting, Merelbeke, België, 4 p.
- Richardson, A.E., 2001. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Australian Journal of Plant Physiology* 28, 897–906.
- Russchen, H.J., Wander, J., Malda, J.T., 2011. Benutting van fosfaat in landbouwgronden "Hoe kan het aanwezige fosfaat in akkerbouwgronden worden vrijgemaakt voor benutting door het gewas?" Masterplan MineralenManagement, Den Haag, Nederland, 60 p.
- Salomez, J., De Bolle, S., Hofman, G., De Neve, S., 2008. Afbakening van de fosfaatverzadigde gebieden in Vlaanderen op basis van een kritische fosfaatverzadigingsgraad van 35%. Finaal rapport – deel 2, kennislacunes. UGent, Gent, België, 21 p.
- Schiettecatte, W., Gabriels, D., Verbist, K., Cornelis, W., Hofman, G., 2007. Sediment- en fosforverliezen door erosie. In: TI-KVIV (Ed.), *Erosiebestrijding in theorie en praktijk*. KVIV, 25/10/2007, België, p. 49-57.
- Schoumans, O.F., Chardon, W.J., Bechmandd, M.E., Gascuel-Oudou, C., Hofman, G., Kronvag, B., Rubaek, G.H., Ulëen, B., Dorioz, J.-M., 2014. Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: a review. *System for Science of the Total Environment* 468–469, 1255–1266.
- Schoumans, O.F., Kruijne, R., van der Molen, D.T., 1995. Vermindering fosfaatuitspoeling; mogelijkheden bij fosfaatverzadigde gronden. *Landschap* 12(6), 63–73.
- Schoumans, O.F., Van der Salm, C., Groenendijk, P., 2013. PLEASE: a simple model to determine P losses by leaching. *Soil Use and Management* 29, 136-146.
- Schoumans, O.F., Willems, J., van Duinhoven, G., 2008. 30 vragen en antwoorden over fosfaat in relatie tot landbouw en milieu. Alterra, Wageningen, Nederland, 53 p.
- Sharpley, A.N., Chapra, S.C., Wedepohl, R., Sims, J.T., Daniel, T.C., Reddy, K.R., 1994. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and Options. *Journal of Environmental Quality* 23, 437-451.
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., Zhang, F., 2011. Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiology* 156, 997–1005.
- Stutter, M.I., Chardon, W.J., Kronvang, B., 2012. Riparian buffer strips as a multifunctional management tool in agricultural landscapes: Introduction. *Journal of Environmental Quality* 41, 297–303.
- Uusi-Kämpä, J., Turtola, E., Närvänen, A., Jauhiainen, L., Uusitalo, R., 2012. Phosphorus mitigation during springtime runoff by amendments applied to grassed soil. *Journal of Environmental Quality* 41, 420-426.
- Vandecasteele, B., Reubens, B., Willekens, K., De Neve, S., 2014. Composting for increasing the fertilizer value of chicken manure: effects of feedstock on P availability. *Waste and Biomass Valorization* 5, 491-503.
- Van der Salm, C., Dupas, R., Grant, R., Heckrath, G., Iversen, B.V., Kronvag, B., Levi, C., Rubaek, G.H., Schoumans, O.F., 2011. Predicting phosphorus losses with the PLEASE model on a local scale in Denmark and the Netherlands. *Journal of Environmental Quality* 40, 1617-1626.

- Van der Zee, S.E.A.T.M., 1988, Transport of reactive contaminants in heterogeneous soil systems. Doctoraat, Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen, Nederland, 283 p.
- Van der Zee, S.E.A.T.M., Van Riemsdijk, W.H., De Haan, F.A.M., 1990a. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel I: Toelichting. Vakgroep Bodemkunde en Plantenvoeding. Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen, Nederland.
- Van der Zee, S.E.A.T.M., Van Riemsdijk, W.H., De Haan, F.A.M., 1990b. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel II: Technische uitwerking. Vakgroep Bodemkunde en Plantenvoeding. Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen, Nederland.
- van Dijk, W., Dekker, P.H.M., ten Berge, H.F.M., Smit, A.L., van der Schoot, J.R., 2007. Aanscherping van fosfaatgebruiksnormen op bouwland bij akker- en tuinbouwgewassen; verkenning van noodzaak en mogelijkheden tot differentiatie. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving (PPO), Lelystad, Nederland, 88 p.
- van Krimpen, M.M., Goselink, R.M.A., Heeres, J., Jongbloed, A.W., 2012. Fosforbehoefte van melkvee, vleesvee, varkens en pluimvee: een literatuurstudie. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad, Nederland, 34 p.
- Van Krimpen, M.M., Van Middelkoop, J., Sebek, L., Jongbloed, A.W., De Hoop, W., 2010. Effect van fosforverlaging in melkveeëntoelen en varkensvoerders op fosfaatexcretie via de mest. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad, Nederland, 63 p.
- Van Moorleghem, C., 2013. Detection of bioavailable phosphorus forms for the alga *Pseudokirchneriella subcapitata*. Doctoraat, KULeuven, Leuven, België, 117 p.
- van Rotterdam-Los, A.M.D., 2010. The potential of soils to supply phosphorus and potassium, processes and predictions. Doctoraat, WUR, Wageningen, Nederland, 144 p.
- Verhaeghe, M., 2014a. Plantbakbehandeling met statfosfor: lage dosis en toch een mooie meeropbrengst. Proeftuinnieuws 5, 07/03/2014, 22-23.
- Verhaeghe, M., 2014b. Startfosfor in de groenteteelt. Proeftuinnieuws 5, 07/03/2014, 20-21.
- Verhaeghe, M., Van De Sande, T., Bes, O., 2014. Startfosfor in diverse groenten. Proeftuinnieuws 5, 07/03/2014, 24-25.
- Verlinden, G., Coussens, T., De Vliegheer, A., Baert, G., Haesaert, G., 2010. Effect of humic substances on nutrient uptake by herbage and on production and nutritive value of herbage from sown grass pastures. *Grass and Forage Science* 65, 133–144.
- Verlinden, G., Pycke, B., Mertens, J., Debersaques, F., Verheyen, K., Baert, G., Bries, J., Haesaert, G., 2009. Application of humic substances results in consistent increases in crop yield and nutrient uptake. *Journal of Plant Nutrition* 32, 1407-1426.
- Verstraeten, G., Poesen, J., 2002. Regional scale variability in sediment and nutrient delivery from small agricultural watersheds. *Journal of Environmental Quality* 31, 870-879.
- VMM, 2013. Fosfaat in oppervlaktewater in landbouwgebied. <http://www.milieuraapport.be/nl/feitencijfers/mira-t/milieuthemas/vermesting/nutrienten-in-water/fosfaat-in-oppervlaktewater-in-landbouwgebied/>
- Wall, D.P., Jordan, P., Melland, A.R., Mellander, P.-E., Mehan, S., Shortle, G., 2013. Forecasting the decline of excess soil phosphorus in agricultural catchments. *Soil Use and Management* 29(Suppl. 1), 147–154.