



Vlaanderen
is landbouw & visserij

ILVO Mededeling 195

juli 2015

Wat weten we over fosfor en landbouw?

Deel 1

**Beschikbaarheid
van fosfor
in bodem en bemesting**

ILVO

Instituut voor landbouw-
en visserijonderzoek

www.ilvo.vlaanderen.be

Wat weten we over fosfor en landbouw?
Deel 1

Beschikbaarheid
van fosfor
in bodem en bemesting

ILVO MEDEDELING 195

juli 2015

ISSN 1784-3197

Wettelijk Depot: D/2015/10.970/195

Amery F.

Vandecasteele B.

ILVO-Mededeling 195

Wat weten we over fosfor en landbouw?

Deel 1: Beschikbaarheid van fosfor in bodem en bemesting

Fien Amery

Bart Vandecasteele

Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek (ILVO)

Juli 2015

Amery, F. & Vandecasteele, B. 2015. Wat weten we over fosfor en landbouw? Deel 1: Beschikbaarheid van fosfor in bodem en bemesting. Merelbeke, ILVO.

Deze studie werd uitgevoerd door het Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek (ILVO), Eenheid Plant, Onderzoeksdomein Teelt & Omgeving (België).

Inhoudstafel

Samenvatting	1
Inleiding	6
1 Fosfor in de bodem beschikbaar voor de plant	7
1.1 Voorkomen van fosfor in de bodem	7
1.2 Plantbeschikbaarheid van fosfor in de bodem	7
2 Methodes om de fosforbeschikbaarheid voor planten te bepalen	9
2.1 Chemische extracties	9
2.2 <i>Sink</i> -methodes	18
2.3 Welke methode selecteren?	19
3 Bodemeigenschappen die fosforbeschikbaarheid beïnvloeden	21
3.1 Het ijzer- en aluminiumgehalte in de bodem	21
3.2 Bodemtextuur	21
3.3 Bodem-pH	22
3.4 Fosfaatfixerende bodems	23
3.5 Organisch stofgehalte en humuszuurconcentratie	24
3.6 Bodemstructuur	25
3.7 Bodemvochtgehalte	26
3.8 Het stikstofgehalte in de bodem	26
3.9 Silicium	26
3.10 Temperatuur	27
4 Biologische factoren die fosforbeschikbaarheid beïnvloeden	28
4.1 Regenwormen	28
4.2 Mycorrhizae	28
4.3 Fosfaatoplossende bacteriën en schimmels	28
4.4 Planten en rassen	29
5 Verhogen van de plantbeschikbare fosfor met P-bemesting	31
5.1 Belang	31
5.2 Effect van bemesting op de plantbeschikbare fosfor	32
5.3 Effect van recente bemesting versus bemestingsgeschiedenis	33
5.4 Bodemeigenschappen bepalen effect van bemesting op fosforbeschikbaarheid	34
5.5 Effecten van bemestingsstrategie op de fosforbeschikbaarheid	35

5.6	Belang van type fosforbemesting	38
6	Fosforbemestingsadviezen	47
6.1	Drie stappen bij het opstellen van bemestingsadviezen	47
6.2	Adviezen in Vlaanderen	48
6.3	Adviezen in Nederland	49
6.4	Adviezen in andere landen	52
6.5	Mogelijk verklaringen voor verschillen tussen adviezen	52
6.6	Vergelijking van bemestingsadviezen	55
6.7	Herzieningen	59
7	Effecten van gereduceerde bemesting	61
7.1	Reductie in bemesting als maatregel om fosforverliezen te beperken	61
7.2	Beïnvloedende factoren voor effecten	61
7.3	Analyse van langetermijnexperimenten	65
7.4	Effecten op kwaliteit	74
8	Referenties	75

Samenvatting

Metten van fosforbeschikbaarheid in de bodem

Fosfor (P) in de bodem is aanwezig in het waterige deel van de bodem (kleine fractie) en in het vaste bodemdeel (grootste fractie). Planten kunnen enkel fosfor opnemen uit het waterige bodemdeel, maar bij depletie wordt fosfor aangevuld vanuit de vaste bodemfractie. Fosfor is op verschillende manier vastgelegd in de vaste bodemfractie, zodat de mate en snelheid van vrijkomen van de verschillende fosforcomponenten sterk verschilt. Bijgevolg is het bepalen van de plantbeschikbare fosforfractie niet eenvoudig.

De meest gebruikte methodes voor het bepalen van de fosforbeschikbaarheid in een bodem zijn chemische extracties. Een bodemstaal wordt geschud in een extractiemiddel dat door chemische reacties bepaalde fosforfracties in oplossing brengt en die dan als beschikbaar gecatalogeerd worden. Deze extractiemiddelen kunnen eerder zwak zijn, waardoor ze een maat zijn voor de fosforintensiteit, zijnde de fosforbeschikbaarheid op korte termijn. Veel extractiemiddelen zijn daarentegen vrij sterk waardoor ze eerder een maat zijn voor de fosforcapaciteit of de fosforbeschikbaarheid over langere termijn.

Doordat chemische extractiemiddelen helemaal anders werken dan plantenwortels is er niet altijd een goede correlatie tussen de gemeten fosforbeschikbaarheid en de gewasopbrengst of P-opname door het gewas. Chemische extractiemiddelen zijn aantrekkelijk wegens snel, maar ze kunnen ook niet-beschikbare fracties mobiliseren en zijn afhankelijk van het bodemtype. Ze brengen beïnvloedende factoren als bodemstructuur, beworteling en vochtgehalte niet in rekening. In Europa worden veel verschillende soorten extracties toegepast, en de resultaten van de ene methode zijn moeilijk te converteren naar resultaten van een andere methode. In de literatuur en in een eigen korte labotest werd vastgesteld dat conversiefactoren sterk verschillen tussen bodems.

In Vlaanderen, Nederland (grasland), Hongarije, Zweden, Noorwegen, Slovenië en Litouwen is de standaardmethode om de fosforbeschikbaarheid te bepalen een extractie met ammoniumlactaat in azijnzuur op pH 3,75 (P-AL). Dit zure extractiemiddel maakt relatief veel P van de vaste fractie vrij waardoor het bekomen P-AL getal eerder een maat is voor de fosforcapaciteit. Er zijn relatief weinig studies beschikbaar die het P-AL getal linken aan de gewasopbrengst of P-opname. In Nederland worden ook extracties gebruikt die meer de fosforintensiteit van een bodem weergeven, namelijk extracties met water en 0,01 M CaCl_2 . Kleine variaties in meetmethodiek kunnen implicaties hebben voor de gemeten fosforbeschikbaarheid. Door een afname van de P-beschikbaarheid met de bodemdiepte, zal de staalnamediepte effect hebben op de gemeten beschikbaarheid.

Het proces van depletie van P in de waterige bodemfase door gewasopname gevolgd door aanvulling vanuit de vaste fase wordt door chemische extracties niet op een mechanistische manier in rekening gebracht. Er zijn echter alternatieve methodes die dit beter doen en daardoor vaak betere relaties geven met de gewasopbrengst of P-opname, en minder afhankelijk zijn van het bodemtype. Voorbeelden zijn het combineren van chemische extracties die een beeld geven van de fosforintensiteit en de fosforcapaciteit, zoals de combinatie van een 0,01 M CaCl_2 -extractie en P-AL in Nederland voor bemestingsadviezen. Deze Nederlandse methode geeft betere relaties met fosforbeschikbaarheid voor het gewas, geeft een genuanceerder beeld van de fosfortoestand van de bodem en laat toe desorptie beter te voorspellen dan

op basis van een enkele chemische extractie. Een ander alternatief is het toepassen van *sink*-methodes die gelijkaardige processen als een plantenwortel in de bodem initiëren. Hoewel deze alternatieven vaak de reële fosforbeschikbaarheid beter voorspellen dan enkelvoudige chemische extracties, hebben ze andere nadelen als omslachtigheid en/of kostprijs. De ideale methode bestaat bijgevolg niet, en elke fosforbeschikbaarheidsmeting moet daarom met de nodige omzichtigheid behandeld worden.

Beïnvloedende factoren voor fosforbeschikbaarheid

Door een sterke vastlegging van fosfor op ijzer- en aluminiumoxiden in de bodem wordt de fosforbeschikbaarheid vaak gerelateerd aan het ijzer- en aluminiumgehalte van de bodem. Ook de bodemtextuur is van belang aangezien zwaardere gronden fosfor algemeen sterker zouden vasthouden dan zandbodems. De bodem-pH beïnvloedt de fosforbeschikbaarheid omdat fosforvastleggingsprocessen (sorptie en neerslag) pH-afhankelijk zijn. Algemeen is de fosforbeschikbaarheid het hoogst in het pH-traject 5,5-6,5. Een hogere temperatuur zorgt soms voor meer vastlegging van toegediende fosfor, maar kan ook meer fosfor vrijmaken en zorgen voor een verhoogde fosforopname door het gewas.

Via verschillende bodembeheersmaatregelen kan de fosforbeschikbaarheid in een bodem verhoogd worden. Er kan bijvoorbeeld gestreefd worden naar een bodem-pH tussen 5,5 en 6,5 maar gezien de vele beïnvloedende processen en sterke bodemheterogeniteit is er niet steeds garantie op verhoging van de fosforbeschikbaarheid. Bekalking kan mogelijk positieve effecten hebben maar wordt door de vele tegengestelde resultaten op de P-opname door het gewas niet als generieke maatregel naar voor geschoven. Een voldoende organisch stofgehalte is belangrijk voor de gewasgroei, maar de rechtstreekse invloed op fosforbeschikbaarheid is onzeker. Het is dan ook niet duidelijk of toevoegen van humuszuren, als deel van de bodemorganische stof, de P-opname van het gewas direct of indirect verhoogt. Gezien het belang van het bodemvochtgehalte voor de diffusie van P doorheen de bodem naar de plant, kunnen bodembeheersmaatregelen om het vochtgehalte op peil te houden positief inwerken op de fosforbeschikbaarheid. Ook een goede bodemstructuur kan dit bewerkstelligen.

Ook biologische maatregelen kunnen eventueel de fosforbeschikbaarheid voor het gewas verhogen, bijvoorbeeld door stimulatie van regenwormactiviteit. Mycorrhizae, fosfaatoplossende bacteriën en schimmels en bepaalde fosfaatefficiënte planten (kruis- en vlinderbloemigen) zouden door onder andere het uitscheiden van organische zuren en fosfatasen extra fosfaat in de bodem kunnen vrijmaken. Gezien de algemene hoge fosfaattoestand en de complexiteit van de bodemprocessen is het echter niet duidelijk of deze processen in de Vlaamse bodems kunnen bijdragen tot een hogere fosforbeschikbaarheid.

Bij grote studies of datasets over uitgestrekte gebieden worden vaak geen verbanden gevonden tussen bovengenoemde bodemeigenschappen en de fosforbeschikbaarheid. Wellicht worden de effecten gemaskeerd door de bemestingsintensiteit van de verschillende percelen. Bemesting heeft een groter effect dan biologische factoren en bodembeheersmaatregelen op de fosforbeschikbaarheid. Een groot deel (80-95%) van de toegediende fosfor wordt in het eerste jaar niet opgenomen door het gewas maar gaat deel uitmaken van de fosforvoorraad van de bodem die de fosfortoestand van de bodem bepaalt. Deze fosfortoestand is bijgevolg veel belangrijker voor de gewasopbrengst en fosforopname dan de recente fosforbemesting.

Fosforbemesting

De effectiviteit van fosforbemesting kan verhoogd worden door de tijd tussen bemesting en plantopname te beperken, en door de fosforbemesting dicht bij de wortels te plaatsen bij planten met een beperkt wortelstelsel. Plaatsbemesting resulteert niet altijd in hogere opbrengsten in vergelijking met volleveldsbemesting, maar zelfde opbrengsten voor groenten, aardappelen en uien kunnen bekomen worden bij lagere totale bemestingsdosissen. Het gebruik van startfosfor bij maïs resulteert vaak in een betere begingroei maar er wordt niet altijd een significant hogere eindopbrengst bekomen. Deze plaatsing kan niet alleen met fosforkunstmest, maar ook met dierlijke mest uitgevoerd worden. Ook coaten van zaad en toepassen van bladvoeding zijn vormen van plaatsbemesting. Door de algemeen hoge bodemfosfortoestanden in Vlaanderen heeft plaatsbemesting met fosfor maar een beperkte of geen invloed op de opbrengst.

Het gebruik van fosforkunstmest is sterk gedaald in Vlaanderen, en maakt nu nog maar 3-10% uit van de totale fosforbemesting. Vroeger werd vaak slakkenmeel toegepast voor fosforbemesting. Dit restproduct uit de staalindustrie heeft een eerstejaarswerking die lager ligt dan die van kunstmestfosfor, maar bij meerjarige toediening zijn de bemestende waarden gelijkaardig. Dit geldt ook voor organische fosforbemesting: bij eenjarige toepassing is de effectiviteit lager (60-90%, afhankelijk van het type mest) dan voor kunstmest, maar op (middel)lange termijn is de fosforwerking (bijna) gelijkaardig. De fosfor in alle organische mestsoorten is voor het grootste deel (60-95%) anorganisch. Fosforgehaltes in organische mest zijn over het algemeen hoger in varkens- dan in rundmest. De steeds strenger wordende fosforbemestingsnormen zijn bijgevolg vooral voor varkensmest limiterend. Deze beperkingen kunnen eventueel gevolgen hebben voor de koolstofopbouw in de bodem.

Fosforbemestingsadviezen

Fosforbemestingsadviezen worden door verschillende instellingen gegeven om landbouwers te helpen in het bepalen van de optimale fosforbemestingshoeveelheden. Een eerste stap in het opstellen van bemestingsadviezen is het bepalen van de fosforbeschikbaarheid in de bodem. Over het algemeen gebeurt dit met behulp van een chemische extractie. Er worden in Europa zeer veel verschillende extractiemethodes gebruikt. Vervolgens wordt de fosforbeschikbaarheid met behulp van responscurves gecalibreerd, wat resulteert in fosforfertiliteitsklassen van (zeer) laag tot (zeer) hoog. Als derde stap wordt op basis van stap 1 en 2 de geadviseerde bemestingsdosissen berekend. Over het algemeen is het doel om de fosforbeschikbaarheid tot een bepaalde streefwaarde te brengen die een bepaalde gewasopbrengst verzekert, en om deze streefwaarde te behouden door de gewasexport te balanceren met de bemestingsinput. Vaak is informatie over (onderliggende proeven voor het) opstellen van de bemestingsadviezen niet beschikbaar, waardoor de adviezen moeilijk te evalueren zijn.

In Vlaanderen worden de meeste fosforbemestingsadviezen door de Bodemkundige Dienst van België gegeven. De fosforbeschikbaarheid wordt bepaald met behulp van een ammoniumlactaatextractie (P-AL) van de bodem. Er is een classificatie van de fosforbeschikbaarheid in 7 klassen, verschillend voor grasland en akkerbouw. Akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenten krijgen in Nederland zowel een bodem- als een gewasgericht bemestingsadvies. Momenteel gebeurt het gewasgericht advies op basis van Pw (waterextractie), maar voor maïs is dit reeds gewijzigd naar een vernieuwd advies op basis van P-AL en een CaCl_2 -extractie. Ook voor grasland is het advies veranderd naar een advies op basis van deze beter

onderbouwde (mechanistische) fosforbeschikbaarheidsmeting. Opbrengsten en fosforgehaltes in gewas worden zo beter voorspeld. De nieuwe adviezen liggen over het algemeen lager dan vroeger, en fosforgebrek wordt beter opgespoord.

Er zijn grote verschillen in fosforbestedingsadviezen in Europa, niet alleen door variaties in klimaat en bodemtypes. Verschillen in staalnamemethodiek en extractietechniek veroorzaken al verschillen in stap 1 van de adviesopstelling. Zelf bij eenzelfde bodemfosfortest kan de classificatie van de fosforbeschikbaarheid (stap 2) sterk verschillen. Vlaanderen heeft grenzen voor de fosforbeschikbaarheidsklassen die tot 6 keer hoger liggen dan in andere landen die P-AL gebruiken. Vlaamse graslandbodems die als 'tamelijk laag' voor fosfor beschouwd worden, kunnen in Nederland als 'zeer hoog' gecatalogeerd worden. Daardoor verschilt de berekening van de bemestingsadviezen (stap 3) ook sterk.

Gevolgen van gereduceerde fosforbemesting

Om de fosfordruk vanuit landbouw naar oppervlaktewater te verminderen, wordt verdere reductie van de fosforbemesting voorgesteld. De effecten van gereduceerde bemesting zullen afhangen van het initiële bodemfosforgehalte. Gewassen geteeld op bodems met een grote fosforvoorraad of een grote fosforbuffercapaciteit zullen zelfs bij nulbemesting veel langer optimale opbrengstcijfers tonen dan op bodems met een kleine fosforvoorraad of fosforbuffercapaciteit. Effecten zullen sneller tot uiting komen bij een groot verschil tussen de bemeste fosforhoeveelheid en de door het gewas afgevoerde fosforhoeveelheid.

Langetermijnexperimenten op grasland tonen dat er gevolgen zijn van gereduceerde fosforbemesting op grasland. Zelfs indien meer fosfor wordt toegediend dan geëxporteerd door het gewas, kunnen verschillen in grasopbrengst geobserveerd worden. Deze variëren tussen 0,9 ton/ha voor een zeer fosforarme bodem tot geen verschillen voor een bodem in de fosforklasse 'tamelijk hoog'. Algemeen worden geen of nauwelijks effecten gevonden bij bodemfosforgehaltes boven de streefzone. Effecten van gereduceerde bemesting op fosforgehaltes in het gras manifesteren zich sneller dan effecten op opbrengst. Verschillen kunnen oplopen tot 1 g P/kg bij bemestingsverschillen van 80 kg P₂O₅/ha/jaar (laag tot tamelijk laag bodemfosforgehalte), tot zelfs fosforgehaltes onder de kritieke waarde voor veevoeder (3,5 g P/kg).

Langetermijnexperimenten met akkerbouwgewassen tonen aan dat er bijna nooit opbrengsttoenames mogelijk zijn bij bemesten met grotere fosforhoeveelheden dan geëxporteerd door het gewas. Er zijn wel opbrengstverschillen mogelijk tussen nulbemesting en evenwichtsbemesting (bemesting = fosforexport), en dit hangt af van de duur van het veldexperiment en het initiële bodemfosforgehalte. Bij experimenten korter dan 10 jaar worden nagenoeg geen opbrengstreducties bij nulbemesting waargenomen. Dit is wel het geval voor studies die langer dan 10 jaar lopen. Voor bodems met een laag fosforgehalte is dit 10% tot 30%, voor een initieel voldoende fosforgehalte zijn deze verschillen afwezig of kleiner dan 10%. Voor bodems met een hoog fosforgehalte wordt in de eerste twintig jaar geen of nauwelijks een effect verwacht, daarna zijn wel verschillen mogelijk maar deze zijn beperkt tot 10%. Een uitzondering op dit alles vormen de aardappelen: voor dit fosforbehoefte gewas kunnen de verschillen tussen de bemestingsniveaus groter zijn en sneller optreden dan voor andere gewassen.

Effecten van gereduceerde bemesting op gewaskwaliteit, andere dan effecten op opbrengst, worden nauwelijks geobserveerd. Effecten van gereduceerde bemesting op het bodemfosforgehalte verschillen sterk van studie tot studie, en zijn zeer afhankelijk van de gebruikte analysemethode. Sterke chemische

extractanten detecteren maar zeer traag evoluties, terwijl mildere extractanten sneller veranderingen opsporen. Zelfs na 25-45 jaar zonder bemesting daalde het P-AL gehalte in langetermijnexperimenten in het algemeen niet meer dan 7 à 8 mg P/100 g.

Inleiding

Fosfor is een essentieel nutriënt voor planten. Voor een optimale groei moet voldoende fosfor beschikbaar zijn voor de plant in de bodem. In deze literatuurstudie wordt nagegaan hoe de fosforbeschikbaarheid voor planten bepaald kan worden (hoofdstuk 2). Daarnaast wordt uitgediept door welke factoren de fosforbeschikbaarheid beïnvloed wordt en door welk management deze eventueel gewijzigd kan worden (Hoofdstuk 3 en 4). Daarbij gaat bijzondere aandacht naar de invloed van bemesting (hoeveelheid, type, wijze,...) op de fosforbeschikbaarheid (Hoofdstuk 5). Verschillende instanties formuleren bemestingsadviezen om optimale gewasopbrengsten te bekomen. Hoe deze adviezen tot stand komen, wordt eveneens besproken in deze literatuurstudie (Hoofdstuk 6). Ten slotte wordt ingegaan op de gevolgen voor bodem en gewas van het verminderen van fosforbemesting (Hoofdstuk 7).

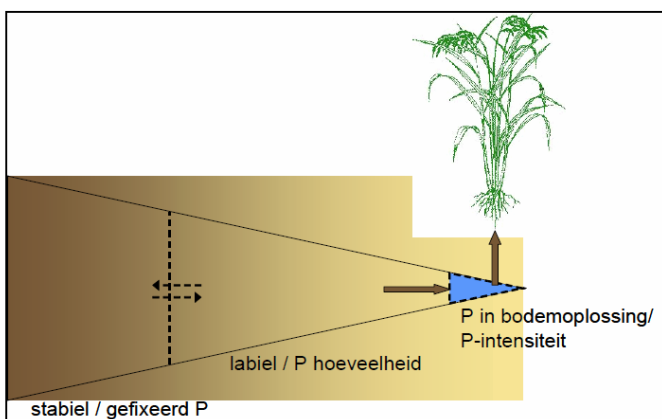
1 Fosfor in de bodem beschikbaar voor de plant

1.1 Voorkomen van fosfor in de bodem

Een groot deel van fosfor (P) aanwezig in landbouwbodems is anorgaanisch (veelal 50-75%) (Sharpley & Rekolainen, 1997; Renneson *et al.*, 2013a). Het grootste deel daarvan is gebonden aan kalkmateriaal (carbonaten), kleimineralen, aluminium- en ijzer(hydr)oxiden en organisch materiaal, of komt voor in neerslagen (=precipitatie) met calcium (Ca) (Schoumans & Chardon, 2003). Organische bodem-P komt voornamelijk voor als mono- en di-esters (Turner *et al.*, 2003; Doolette *et al.*, 2010).

1.2 Plantbeschikbaarheid van fosfor in de bodem

De totale hoeveelheid fosfor aanwezig in een bodem is niet gelijk aan de hoeveelheid fosfor die beschikbaar is voor het gewas. Er wordt met verschillende methodes geprobeerd om de hoeveelheid fosfor in de bodem die beschikbaar is voor planten door opname via hun wortels, te kwantificeren. Planten nemen fosfor op via de bodemoplossing (het waterige deel van de bodem). Van de totale hoeveelheid fosfor in de bodem is er echter maar een zeer kleine fractie aanwezig in de bodemoplossing (de "P-intensiteit", zie Figuur 1), het overige deel is gebonden aan de vaste bodemfase door sorptie of precipitatie (zie 1.1). Toch is de plantbeschikbare fractie groter dan alleen maar de hoeveelheid fosfor in de bodemoplossing omdat de fosfor aanwezig op de vaste bodemfase (deels) in oplossing kan komen. Dit kan doordat de fosfor in de bodemoplossing aangevuld wordt door de vaste bodemfase bij depletie (= "lediging van de bodemoplossing") als gevolg van opname door planten. De fosforfractie die vanuit de vaste fase in oplossing kan komen, wordt ook wel de uitwisselbare P-fractie genoemd. Daarenboven hebben wortels vaak bepaalde strategieën, zoals excretie van organische zuren, die de fosfor van de vaste bodemfase deels kunnen vrijzetten.



Figuur 1. De direct plantbeschikbare fosforfractie in de bodemoplossing kan aangevuld worden vanuit de labiele vaste fase (uit Bussink *et al.* (2011a))

Niet alle fosfor in de vaste bodemfase kan even gemakkelijk of snel in de bodemoplossing terecht komen en zo beschikbaar worden voor de plant. Fosfor kan immers op veel verschillende manieren vastgelegd worden (zie 1.1). Ook binnenin één sorptieklasse zijn er veel verschillen in sterkte van fosforsorptie, bijvoorbeeld naargelang de kristalliniteit van de aanwezige ijzeroxides in de bodem of naargelang de afbreekbaarheid van het organisch materiaal. Zo bevindt er zich in de vaste bodemfase een fosforfractie met een continuüm aan sorptiesterktes en desorptiesnelheden, bepalend hoe gemakkelijk en hoe snel de

fosfor kan vrijkomen in de bodemoplossing. Er wordt vaak een opdeling van de vaste fosforfractie gemaakt in een labiele en een gefixeerde fractie naargelang de gemakkelijker of sneller waarmee de fosfor in oplossing kan komen (Figuur 1). Zo zal fosfor aanwezig in gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal zich eerder in de labiele fractie bevinden, terwijl fosfor gesorbeerd op ijzeroxides eerder in de gefixeerde fractie onderverdeeld wordt. Deze opdeling is echter arbitrair, want ook tussen de labiele en gefixeerde fractie is er uitwisseling mogelijk (zie Figuur 1) waardoor uiteindelijk bij langdurige depletie alle P in de bodemoplossing kan terechtkomen (Syers *et al.*, 2008).

De mogelijkheid van een bodem om de P in de bodemoplossing aan te vullen vanuit de vaste fase wordt ook wel de P-buffercapaciteit genoemd (Holford, 1997). De hoeveelheid fosfor die vrij kan komen voor plantopname binnen de groeiperiode hangt af van de snelheid waarbij de fosfor op de vaste fase de waterige fase kan aanvullen. Deze snelheid moet hoger zijn dan de kritische opnamesnelheid van de plant; anders zijn er limiterende condities voor de plant (Koopmans *et al.*, 2004a). Zo stelde Koopmans *et al.* (2004b) vast dat in het begin van een potexperiment met gras er geen groeilimitaties waren en de gemodelleerde fosfordiffusieflux van de bodem naar de oplossing groter was dan de opnamesnelheid van de plant. Na een tijd (zonder fosforbijbemesting en met gewasafvoer) werden de snelheden aan elkaar gelijk, wat wees op transportlimitaties voor het gras. Op dat moment daalde ook het P-gehalte in het gras.

Na een groeiseizoen kan de plantbeschikbare fractie gedaald zijn. De plantbeschikbaarheid is echter dynamisch gedefinieerd, waardoor er voortdurend aanvulling is vanuit de sterker gesorbeerde fosforfracties. Dat deze aanvulling continu plaatsvindt en zeer lang kan doorgaan, blijkt uit experimenten uitgevoerd in Rothamsted waarbij bodems gedurende vele jaren geen P-bemesting kregen (Syers *et al.*, 2008). Eigenlijk is de P-beschikbaarheid zowel tijds- als gewasafhankelijk omdat het de hoeveelheid is die tijdens de groeicyclus van de plant in oplossing komt en opgenomen kan worden (Holford, 1997). Aanvulling van de plantbeschikbare (en totale) fosforfractie kan ook gebeuren met behulp van bemesting (zie hoofdstuk 5).

De fosforbeschikbaarheid voor een plant hangt niet alleen af van de hoeveelheid fosfor aanwezig in een bodem, ook andere beïnvloedende factoren spelen een rol. Door de geringe mobiliteit van P neemt het gewas fosfor uit maar enkele procenten tot maximaal 40% van het totale bodemvolume op, waardoor bewortelingsgraad een bepalende factor is voor de fosforbeschikbaarheid (Timmermans *et al.*, 2012). De aanvoer van P in de bodem, via bemesting en dood plantenmateriaal, gebeurt via het bodemoppervlak. Door de beperkte mobiliteit van P daalt het bodemfosforgehalte met de bodemdiepte, zeker indien de bodem niet geploegd wordt (Haygarth & Jarvis, 1999). Dit heeft implicaties voor de gemeten fosforbeschikbaarheid indien de staalnamediepte variabel is (zie 2.1.5). Een goede bodemstructuur zou de fosforbeschikbaarheid voor een gewas ook verhogen (Dekker & Postma, 2008). Het bodemvochtgehalte speelt eveneens een belangrijke rol in de fosforvoorziening omdat diffusieprocessen zich in de waterige fase van de bodem afspelen. Fosfortekort heeft vaak te maken met te droge omstandigheden (Russchen *et al.*, 2011). Beïnvloedende factoren voor fosforbeschikbaarheid worden uitgebreider besproken in hoofdstuk 3 en 4.

2 Methodes om de fosforbeschikbaarheid voor planten te bepalen

Aangezien de fosfortoestand in de Vlaamse landbouwgronden belangrijker is dan de fosforbemesting voor de fosforopname door gewassen (zie 5.3), is het cruciaal om de fosfortoestand juist te voorspellen. Een correcte voorspelling kan helpen om de beschikbare P optimaal te benutten zodat zowel landbouwkundige als milieukundige doelstellingen verwezenlijkt kunnen worden. Gezien de fosforbeschikbaarheid voor planten een dynamisch en complex proces is, zal de meting van de beschikbaarheid altijd een versimpeling van de werkelijkheid zijn.

2.1 Chemische extracties

2.1.1 Werking

Er zijn veel verschillende methodes die de fosforbeschikbaarheid in een bodem trachten te kwantificeren. De meeste bekende zijn wellicht de chemische bodemextracties. Daarbij wordt een bepaalde massa bodem geschud in een chemisch extractiemiddel. Naargelang het extractiemiddel worden bepaalde fosforfracties opgelost of gedesorbeerd en deze worden dan gemeten en als 'beschikbaar' gecatalogeerd.

De werking van de extracten is grosso modo in 3 categorieën op te splitsen (Jordan-Meille *et al.*, 2012):

- zure oplossing: het extractiemiddel lost calciumfosfaten op en valt in meer of mindere mate aluminium- en ijzeroxides aan waardoor de op het oxideoppervlak gesorbeerde fosfor vrijkomt
- anionuitwisseling: anionen in het extractiemiddel als acetaat, bicarbonaat, citraat, lactaat of sulfaat worden tegen gesorbeerde fosfaat uitgewisseld
- kationcomplexatie en -hydrolyse: kationen als aluminium en calcium die neergeslagen componenten met fosfor vormen, kunnen gecomplexeerd worden door fluoride of organische anionen (citraat, lactaat) aanwezig in het extractiemiddel. Deze kationen kunnen ook neerslaan met bicarbonaat dat aanwezig is in het extractiemiddel. Bij al deze processen komt fosfor vrij.

Daarnaast is het ook mogelijk dat het extractiemiddel een bepaalde pH oplegt. Als de pH verhoogd wordt dan kan er ook desorptie van fosfaat optreden, bij verlaging van de pH kunnen neerslagen beter oplossen.

Een andere mogelijke opdeling van de extractiemiddelen is meer arbitrair, namelijk in zwakke middelen, die een maat zijn voor de fosfaatintensiteit, en de sterke middelen, die een maat zijn voor de fosfaatcapaciteit van de bodem (Dekker & Postma, 2008). De fosfaatintensiteit is de hoeveelheid P aanwezig in de bodemoplossing (blauw deel in Figuur 1), eventueel vermeerderd met de fosforhoeveelheid op de vaste fase die onmiddellijk kan vrijkomen. deze fosfaatintensiteit is direct beschikbaar voor het gewas gedurende een korte periode. De fosfaatcapaciteit is een maat voor de hoeveelheid labiel P (of uitwisselbaar P): deze is aanwezig op de vaste fase en levert een bijdrage aan het weer aanvullen van P in de bodemoplossing bij depletie. De fosfaatcapaciteit geeft daarom een indicatie van de hoeveelheid P die over een langere periode (meerdere jaren) beschikbaar kan komen voor het gewas. De gevoeligheid van de verschillende extracties varieert daarom sterk. Extractiemiddelen die een maat zijn voor de fosfaatcapaciteit geven veel minder snel aan dat er veranderingen zijn teweeggebracht door bijvoorbeeld gewijzigde bemesting en weersomstandigheden, terwijl dit wel het geval is voor extracties die de fosfaatintensiteit weerspiegelen (Koopmans *et al.*, 2004b).

2.1.2 Link met plantbeschikbaarheid

Chemische extractiemiddelen werken echter helemaal anders dan plantenwortels. Ze kunnen bijvoorbeeld niet het proces van depletie van P in de bodemoplossing en heraanvulling vanuit de vaste fase in rekening brengen (Holford, 1997). De extractiemiddelen kunnen fosforfracties vrijmaken waar een plant niet aan kan, of omgekeerd (Cooperband & Logan, 1994). Ze brengen het tijdsaspect niet in rekening en vaak werken ze met een opgelegde, niet altijd even realistische, pH. Met andere woorden, de relatie tussen P-beschikbaarheid en de chemische extracties is gebaseerd op empirische gronden en niet op mechanistische gelijkenissen (Jordan-Meille *et al.*, 2012). Een theoretische wetenschappelijke fundering ontbreekt dan ook. Chemische extracties zijn aantrekkelijk wegens snel, maar ze kunnen ook niet-beschikbare fracties mobiliseren en zijn afhankelijk van het bodemtype (Frossard *et al.*, 2000). Zo is het mogelijk dat een chemische extractie op een grotere plantbeschikbaarheid wijst in een ander bodemtype indien het gekozen extractiemiddel de gesorbeerde of neergeslagen fosfor gemakkelijk kan vrijmaken, terwijl de plant net moeilijker aan deze fractie kan. Algemeen geldende correlaties tussen deze bodemfosfortesten en fosforbeschikbaarheid en de daaraan gelinkte bemestingsadviezen zijn dus moeilijk te formuleren. Andere limitaties zijn dat de bodemstructuur en de beworteling met chemische extracties niet in rekening worden gebracht. Bij een extractie worden ook alle bodemporiën gevuld waardoor het oorspronkelijke vochtgehalte geen rol meer speelt, terwijl in werkelijkheid het vochtgehalte zeer belangrijk is voor de P-voorziening (zie 1.2).

Over het algemeen worden wel vaak (maar niet altijd) correlaties gevonden tussen de plantbeschikbare fractie zoals gemeten met een chemische extractie en de P opgenomen door het gewas. Deze correlaties zijn echter vaak sterk variërend bij verschillende bodemtypes (voor specifieke voorbeelden: zie 2.1.3).

2.1.3 Verschillende chemische extracties

In Europa worden veel verschillende chemische extracties uitgevoerd (Ehlert *et al.*, 2014b). De keuze voor een bepaalde methode is vaak overwegend op financiële of logistieke redenen gebaseerd. Zo wordt de methode met ammoniumlactaat in azijnzuur in meerdere landen waaronder Vlaanderen gebruikt (zie hieronder). Voordelen van deze methode zijn de relatief beperkte kostprijs en de mogelijkheid om meerdere elementen (ook K, Mg, Na en Ca) tegelijk te bepalen (Jordan-Meille *et al.*, 2012). Voor kalkbodems wordt internationaal vaak gebruik gemaakt van de Olsen-methode (zie hieronder). De Bray & Kurtz-extractie is meer gangbaar voor zure bodems maar wordt weinig toegepast in Europa (Bomans *et al.*, 2005). Een overzicht van de gangbare methodes in NW-Europa is terug te vinden in Tabel 1.

2.1.3.1 Ammoniumlactaat in azijnzuur op pH 3,75 (P-AL)

De P-AL extractie is de standaardmethode om de plantbeschikbare P te kwantificeren in Vlaanderen, Hongarije, Zweden, Noorwegen, Slovenië en Litouwen (Jordan-Meille *et al.*, 2012). In Nederland wordt deze methode voor grasland gebruikt (in de wetgeving). Opgelet: in Vlaanderen wordt P-AL in mg P/100 g uitgedrukt, in Nederland is dit in mg P_2O_5 /100 g. De P-AL bepaling is een 1:20 (massa bodem:massa extract) extractie met 0,1 M ammoniumlactaat en 0,4 M azijnzuur bij een gebufferde pH van 3,75. Er wordt 4 uur geschud (Goetelen *et al.*, 2011). Ammoniumlactaat in azijnzuur heeft een werking op drie vlakken (zie 2.1.1): door de lage gebufferde pH (3,75) lossen calciumfosfaten op en worden aluminium- en ijzeroxides gedeeltelijk aangetast waardoor gesorbeerde fosfor vrijkomt. Lactaat en acetaat kunnen in competitie treden met fosfaat waardoor anionuitwisseling optreedt. Lactaat kan ook aluminium en calcium

complexeren (kationcomplexatie) waardoor neerslagen van aluminium en calcium met fosfor in oplossing komen. Bij al deze processen komt relatief veel fosfor vrij van de vaste bodemfase. Het P-AL getal is daarom eerder een maat voor de fosfaatcapaciteit van de bodem, dus een maat voor de hoeveelheid fosfaat in de bodem die over een langere periode beschikbaar kan komen voor het gewas (Russchen *et al.*, 2011).

Tabel 1. Overzicht van gebruikte chemische extracties voor de bepaling van de plantbeschikbare P in NW-Europa

Land/regio	Gebruikte extractiemiddelen
Vlaanderen	Ammoniumlactaat in azijnzuur op pH 3,75 (P-AL)
Wallonië	Ammoniumacetaat + EDTA op pH 4,65
Nederland	Water (Pw); 0,01 M CaCl ₂ (P-CaCl ₂); ammoniumlactaat in azijnzuur op pH 3,75 (P-AL)
Frankrijk	Ammoniumoxalaat (Joret/Hébert); NaHCO ₃ op pH 8,5 (Olsen); citroenzuur (Dyer)
Duitsland	Calciumlactaat en calciumacetaat (CAL); calciumlactaat en HCl op pH 3 (DL)
Denemarken	NaHCO ₃ op pH 8,5 (Olsen)
Ierland	Natriumacetaat op pH 4,8 (Morgan)

In Vlaanderen wordt deze methode gebruikt door de Bodemkundige Dienst van België (BDB) voor het vaststellen van de fosfaatklasse van de bodem en voor het opstellen van bemestingsadviezen. De analyse is tevens opgenomen in het analysecompendium van het MAP in het kader van het mestdecreet (Anon., 2010a). De meetmethodiek werd gevalideerd in een VITO-studie (Goetelen *et al.*, 2011) waarin aanbevelingen over de methode geformuleerd worden die nog moeten opgenomen worden in het analysecompendium: in het donker bewaren van de stockoplossing bij 4°C en het gebruik van glazen recipiënten. Uit deze studie bleek ook dat analyse van P in het extract met behulp van spectrofotometrie of met ICP-AES geen verschil geeft. In een Zweedse studie werd echter een verschil van 16% tussen beide methodes gevonden (Ulén, 2006) (zie ook 2.1.5). Een andere mogelijk belangrijke invloedsfactor is de pH van de extractie. Hoewel de pH van het extractiemiddel gebufferd is bij pH 3,75, kan de pH van het extract zelf toch hoger of lager liggen door de aanwezigheid van zuren of basen in de geëxtraheerde bodem. Zo kunnen pH's hoger dan 4,0 gemeten worden in extracten van kalkhoudende polders. De invloed van de pH van het extractiemiddel werd duidelijk in de VITO-studie (Goetelen *et al.*, 2011) waar een extractiemiddel op pH 3,9 gemiddeld (over 10 bodems) maar 82% extraheerde van de P geëxtraheerd door een extractiemiddel op pH 3,75. De BDB voert daarom een theoretische correctie uit voor bodems waarvan het extract een pH hoger heeft dan 3,75. Deze correctie wordt echter niet doorgevoerd in andere Vlaamse en Nederlands laboratoria.

In het verleden zijn door de BDB studies uitgevoerd om de relaties tussen P-AL en P-opname of gewasopbrengst van verschillende gewassen vast te stellen. Deze studies, waarop de BDB-bemestingsadviezen zijn gebaseerd, zijn echter niet beschikbaar. Andere studies zijn moeilijk te vinden. Veldgegevens uit Hongarije (Sárdi *et al.*, 2009) toonden een correlatie tussen P-AL en de opbrengst en het P-gehalte van gerst, maar er waren grote verschillen tussen de voorspelling in beschikbaarheid voor zure en kalkrijke bodems bij gelijke opbrengst van maïs (Csathó *et al.*, 2002). Wellicht overschat de P-AL-methode de P-beschikbaarheid in kalkrijke bodems aangezien CaCO₃ (met gesorbeerde P) en Ca-P neerslagen oplossen bij de lage pH van de P-AL methode, wat niet het geval is in natuurlijke omstandigheden (Sibbesen, 1983; Otabbong *et al.*, 2009; van Rotterdam-Los, 2010). Deze overschatting zou nog versterkt kunnen worden door de eventuele theoretische correctie die de BDB uitvoert bij kalkhoudende polders met hoge pH (zie boven). Zure extracten als ammoniumlactaat zouden dan weer de fosforbeschikbaarheid in bodems met veel klei

of veel gehydrateerde aluminium- of ijzeroxides onderschatten (Hammond & White, 2008). Dit illustreert het feit dat het meten van de beschikbaarheid op empirische en niet op mechanistische gronden gebaseerd is (Jordan-Meille *et al.*, 2012) (zie ook 2.1.2). In Nederland werd op een boerderij geen correlatie gevonden tussen de opbrengst van het grasland en het P-AL getal van verschillende percelen (15-48 mg P/100g), maar dit komt wellicht doordat P geen limiterende factor was (Corré *et al.*, 2004), wat ook in de meeste Vlaamse bodems het geval is. Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd ook geen correlatie tussen maïsopbrengst en P-AL waargenomen (Ehlert *et al.*, 2014b). Potproeven uitgevoerd met 74 bodems afkomstig vanuit Europa, Amerika en Australië toonden aan dat de tarweopbrengst niet goed gecorreleerd was met P-AL (2-41 mg P/100 g) (Van der Pauw, 1971). Voor fosfaatgevoelige groenten werd vastgesteld dat P-AL er niet in slaagt om Vlaamse bodems te onderscheiden waarop wel dan niet een gewasreactie op fosforbemesting kan verwacht worden (Verhaeghe, 2014b).

Doordat P-AL een maat is voor de fosforcapaciteit van een bodem, is deze meting robuust maar wel weinig gevoelig aan recente wijzigingen in de fosfaatbeschikbaarheid. Dit werd ook vastgesteld in een labo-experiment waarin gedurende 3 jaar op een bodem intensief aan 'fosfaatuitmijning' werd gedaan, dit is afvoer van grote hoeveelheden gras zonder toevoeging van fosforbemesting. Het fosforgehalte in het gras was na een klein jaar reeds gedaald tot 2,34 g P/kg, onder de P-behoefte van runderen (2,8-3,0 g P/kg (van Krimpen *et al.*, 2012)), terwijl het P-AL getal pas na twee jaar onder de streefzone voor fosforbeschikbaarheid in grasland gedefinieerd door de BDB (19-25 mg P/100g bodem) daalde (Koopmans *et al.*, 2004b).

2.1.3.2 Olsen: 0,5 M NaHCO₃ op pH 8,5

De Olsen-methode om plantbeschikbare fosfor te meten wordt onder andere gebruikt in Frankrijk, Denemarken, Engeland, Italië, Spanje, Australië en Nieuw-Zeeland (Soinne, 2009). Het extractiemiddel NaHCO₃ zorgt ervoor dat in kalkbodems de vrije Ca²⁺ concentratie wordt verlaagd door CaCO₃-vorming, in zure bodems wordt de pH verhoogd door de gebufferde pH 8,5 van het extractiemiddel en treden hydroxylanionen in competitie met P voor sorptie. Al deze mechanismen hebben een P-desorptie tot gevolg. De extractie kan gebruikt worden voor kalkrijke tot neutrale bodems, maar is minder geschikt voor zure zandgronden (pH<5,5) (Russchen *et al.*, 2011). De fosforhoeveelheid geëxtraheerd met de Olsen-methode is, zoals P-AL, eerder een maat voor de fosfaatcapaciteit (beschikbaarheid op lange termijn) (Dekker & Postma, 2008). Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd echter geen correlatie tussen maïsopbrengst en P-Olsen waargenomen (Ehlert *et al.*, 2014b). Veldexperimenten in Rothamsted (Engeland) toonden aan dat de kritische Olsen-P (Olsen-P waarbij de opbrengst begint te dalen) significant verschilde bij verschillend organisch stofgehalte van de bodem (Johnston, 2000; Johnston *et al.*, 2014): 2-voudig voor suikerbiet (18-32 mg P/kg), 3-voudig voor gerst (16-45 mg P/kg) en 4-voudig voor aardappel (16-61 mg P/kg) voor 2,4 versus 1,5% organisch stofgehalte.

2.1.3.3 Waterextractie (Pw)

Waterextractie (Pw) van een bodem is één van de methodes om plantbeschikbaarheid te meten in Nederland, namelijk voor akkerbouw. Ook in de Nederlandse wetgeving komt de waterextractie ter sprake, namelijk voor de opdeling van de bemestingsnormen voor de akkerbodems volgens de fosforbeschikbaarheid. Het Pw-getal wordt bepaald door middel van extractie van 1 volumedeel luchtdroge grond met 60 volumedelen water bij 20°C (1 uur schudden) en wordt uitgedrukt in mg P₂O₅ per liter droge grond. De hoeveelheid geëxtraheerde P is hoger dan in het poriewater (Del Campillo *et al.*, 2013) en zou tussen de fosfaatintensiteit en -capaciteit liggen (Dekker & Postma, 2008). Waterextracties zijn daarom

goed om variaties in P-beschikbaarheid op korte termijn in te schatten, maar misschien minder geschikt voor bodemvruchtbaarheidschattingen op lange termijn (Soinne, 2009).

De Pw-methode is minder robuust dan de P-AL-methode. De reproduceerbaarheid is niet groot, wellicht door het voorkomen van colloïden in het extract (Russchen *et al.*, 2011). Om deze reden is BLGG (grootste laboratorium in Nederland voor fosforbeschikbaarheidsanalyses) overgeschakeld naar een berekende Pw in plaats van een gemeten Pw-waarde. Het Pw-getal wordt dan berekend op basis van het gemeten P-AL-getal (zie 2.1.3.1) en de hoeveelheid P geëxtraheerd met 0,01 M CaCl₂ (zie 2.1.3.4), waarbij rekening wordt gehouden met de bodemtextuur.

Het P-gehalte van tomaten en tarwe zou sterk gerelateerd zijn aan het Pw-getal van de bodems van verschillende oorsprong (Van der Pauw, 1971). Bovendien zou de correlatie dezelfde zijn over de verschillende bodemtypes. In de jaren '50-'70 werd een groot aantal veld- en potproeven uitgevoerd om relaties tussen Pw-getal en gewasopbrengsten vast te stellen. Deze empirische relaties vormen de basis voor de huidige Nederlandse P-bemestingsadviezen voor akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenten. Tot daarvoor werden bemestingsadviezen voor deze gewassen op basis van P-AL metingen vastgesteld, maar volgens de toenmalige analyses zou de gewasrespons beter gecorreleerd zijn aan Pw dan aan P-AL. In recentere Nederlandse veldproeven op verschillende percelen werd alleen een correlatie tussen Pw (23-105 mg P₂O₅/l) en de opbrengst van maïs gemeten bij hoog vochtgehalte, maar niet bij laag vochtgehalte (Corré *et al.*, 2004). Dit komt wellicht omdat de beschikbaarheid van fosfaat ook bepaald wordt door het vochtgehalte van de bodem, wat niet in rekening wordt gebracht met chemische extracties (zie 2.1.2). Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd slechts een aanwijzing tot correlatie (niet significant) tussen maïsopbrengst en Pw waargenomen (Ehlert *et al.*, 2014b).

2.1.3.4 Extractie met 0,01 M CaCl₂ (P-CaCl₂)

De bodemfosfor geëxtraheerd met 0,01 M CaCl₂ is een maat voor de fosfaatintensiteit (Dekker & Postma, 2008). Deze methode wordt gebruikt voor de Nederlandse bemestingsadviezen voor gras en maïs (samen met P-AL, zie 2.1.6), en door BLGG ook voor de berekening van Pw (zie 2.1.3.3). Voor deze methode wordt de bodem gedurende twee uur geschud in een 0,01 M CaCl₂-oplossing in een 1:10 verhouding (massa bodem:massa extract) (Anon., 1996; Houba *et al.*, 2000).

De hoeveelheid fosfor geëxtraheerd met deze extractie is lager dan in het poriewater (ongeveer 3 keer in een selectie Spaanse bodems), wellicht door de hogere ionische sterkte en calciumconcentratie in het extract ten opzichte van de bodemoplossing (Sánchez-Alcalá *et al.*, 2014). In Nederland wordt deze meting uitgevoerd met gedroogde bodem, wat vooral bij organische bodems in ongewenste grote vrijgave van organische P kan resulteren (Soinne, 2009) die meegemeten wordt met *Inductively Coupled Plasma* (ICP) maar minder met spectrofotometrie (zie deel 2.1.5). In een deskstudie werd aangegeven dat er geen data beschikbaar zijn over de gewasreactie op de fosfaattoestand bepaald met 0,01 M CaCl₂ (Ehlert *et al.*, 2007), waardoor de geschiktheid van P-CaCl₂ om de fosforbeschikbaarheid te meten moeilijk te evalueren is. Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie tussen maïsopbrengst en P-CaCl₂ waargenomen (Ehlert *et al.*, 2014b). Voor fosfaatgevoelige groenten werd vastgesteld dat P-CaCl₂ bodems kon onderscheiden waarom wel dan niet een gewasreactie op fosfobemesting kan verwacht worden, wat niet het geval is voor P-AL (Verhaeghe, 2014b).

2.1.4 Relaties tussen verschillende chemische extracties

Omdat de relaties tussen de plantbeschikbare P gemeten met chemische extracties en de gewasrespons gebaseerd zijn op empirische gronden en de mechanismen achter de extracties variëren voor de verschillende methodes, is het niet evident om P-beschikbaarheidswaarden gemeten met verschillende methodes naar elkaar om te zetten. Wanneer twee methodes vergeleken worden waarvan de extractiemiddelen een gelijkaardige werking hebben en wanneer bodems met grote variatie aan fosfortoestanden beschouwd worden, kunnen wel goede correlaties tussen beide beschikbaarheidswaarden bekomen worden. Aan de andere kant worden er bij lage fosfaatbeschikbaarheid vaak geen correlaties gevonden tussen de verschillende metingen, zoals bijvoorbeeld tussen Pw en P-CaCl₂ (Ehlert *et al.*, 2007). Fosforbeschikbaarheid gemeten met verschillende methodes in Nederlandse bodems met sterk uiteenlopende fosforgehaltes toonden een redelijke tot goede correlatie tussen intensiteits- of capaciteitsmethodes onderling, maar een beperkte of geen correlatie tussen een intensiteits- en capaciteitsparameter (Ehlert *et al.*, 2014b).

Conversieformules tussen de verschillende methodes hangen vaak af van andere bodemeigenschappen, bijvoorbeeld textuur, pH,... (Otabbong *et al.*, 2009). Het is dan ook niet verwonderlijk dat de conversiefactoren verschillen van studie tot studie (Sibbesen & Sharpley, 1997; Schoumans, 1997) en er dus geen algemeen geldende omzettingsformules bestaan.

Binnen deze literatuurstudie werd een beperkte analyse van de fosforbeschikbaarheid van 10 contrasterende Vlaamse landbouwbodems uitgevoerd. Daarbij werden de methodes P-AL, Pw en P-CaCl₂ vergeleken. Hierbij werden tussen alle P-beschikbaarheidsindices significante correlaties gevonden, maar varieerde de conversiefactoren tussen de verschillende metingen vaak sterk. Zo was de verhouding tussen het Pw-getal (mg P₂O₅/l) en het P-AL-getal (mg P/100g) gemiddeld over de 10 bodems 2,3; maar deze waarde varieerde tussen minimaal 1,7 en maximaal 3,0. Voor 30 Nederlandse bodemstalen met vrij lage P-toestand (Ehlert *et al.*, 2005; van Dam & Ehlert, 2008) werd een grotere gemiddelde verhouding van 3,4 gevonden met een nog ruimere variatie tussen 1,0 en 6,5.

2.1.5 Variaties in metingen

Naast de verschillen in de werking van de verschillende chemische extractiemiddelen, kunnen ook nog andere factoren verantwoordelijk zijn voor variaties in de metingen van de fosforbeschikbaarheid. Zo kan het al dan niet drogen (en eventueel herbevochtigen) van het bodemstaal extra (organische) fosfor beschikbaar maken (Soinne, 2009). Dit werd ook vastgesteld in de eigen analyse van de 10 Vlaamse bodemstalen. Na drogen was het P-CaCl₂ getal gemiddeld 38% hoger (standaarddeviatie 23%) dan het P-CaCl₂ getal gemeten op het oorspronkelijke vochtige bodemstaal. Het invriezen van een bodemstaal zou minder invloed hebben (Soinne, 2009). Ook zeven en bewaren van bodemstalen kan de P-concentratie wijzigen (Chapman *et al.*, 1997).

Aangezien het bodemfosforgehalte afneemt met de diepte (Heathwaite, 1997; Johnston & Dawson, 2005), heeft de staalnamediepte grote implicaties op de gemeten fosforbeschikbaarheid. Niet alleen de fosforbeschikbaarheid zelf maar ook de variatie op de meting wordt kleiner bij toename van de staalnamediepte van lers grasland van 2 over 5 naar 10 cm (Daly & Casey, 2005). Verschillen in bemestingsdosis zijn na 30 jaar terug te vinden tot op 40 cm diepte (Culleton *et al.*, 2002). In Nederland

was de staalnamediepte voor grasland vroeger 5 cm. Toen uit onderzoek bleek dat de fosfor uit de 5-10 cm laag ook nog bijdraagt aan de fosforvoorziening voor het gewas, werd de staalnamediepte veranderd naar 10 cm (de Boer *et al.*, 2003). Onderzoek met 32-P isotopen in Wales stelde zelfs dat minder dan 20% van de P opgenomen door gras uit de bovenste 5 cm kwam. Het grootste deel van de opgenomen P kwam uit de 10-15 cm laag bij monocultuur van gras, en uit de 15-22 cm laag bij gras-klover teelt (Goodman & Collison, 1982). In Vlaanderen is de staalnamediepte voor grasland maar 6 cm (Maes *et al.*, 2012). Staalnamedieptes voor verschillende Europese landen of regio's zijn terug te vinden in Tabel 2. Bij diepere staalnames zal de fosforbeschikbaarheid kleiner zijn. Zo was het P-AL-getal van bodems uit een grote Nederlandse dataset in de laag 0-10 cm gemiddeld 9,2% lager dan in de laag 0-5 cm (de Boer *et al.*, 2003). Dit effect is beperkt indien geploegd wordt (Etana, 2013).

Tabel 2. Bemonsteringsdieptes in verschillende landen/regio's

Land/regio	Bemonsteringsdiepte (cm)		referentie
	grasland	akkerbouw	
Vlaanderen	6	23	(Maes <i>et al.</i> , 2012)
Nederland	10	10 of 25	(Anon., 2012a)
Wallonië	15	25	(Anon., 2012d)
UK	7,5*	15*	(Anon., 2011b; Anon., 2012 ^e)
Ierland	10		(Daly & Casey, 2005)

* Soms wordt een diepte van 30 cm aangeraden indien niet geploegd wordt (Anon., 2012^e)

Daarnaast wordt de fosforconcentratie in de extracten vaak met verschillende methodes geanalyseerd, met mogelijke implicaties voor de bekomen waarde. Zo wordt vaak vastgesteld dat metingen met *Inductively Coupled Plasma* (ICP) hogere concentraties geven dan de colorimetrische methodes door de aanwezigheid van organische P die niet of minder gedetecteerd wordt door de laatstgenoemde methode (Pierzynski *et al.*, 2005; Eriksson, 2009). Soms wordt echter ook het omgekeerde vastgesteld (Pierzynski *et al.*, 2005), zoals ook in de eigen metingen van de 10 Vlaamse bodems. Daar werden gemiddeld 7% (standaarddeviatie 3%) lagere concentraties bij ICP dan bij blauwkleuring voor P-AL gemeten, gemiddeld 13% (standaarddeviatie 7%) lagere concentraties bij ICP dan bij blauwkleuring voor Pw en gemiddeld 26% (standaarddeviatie 17%) hogere concentraties bij ICP dan bij blauwkleuring voor P-CaCl₂. In de beschrijving van de P-AL-methode in het analysecompendium van het MAP (Anon., 2010a) worden verschillende colorimetrische technieken en de ICP-meting voorgesteld. In de vergelijkende VITO-studie (Goetelen *et al.*, 2011) werden vergelijkbare resultaten verkregen met de blauwkleuring en de ICP-meting. Colloïden aanwezig in het extract kunnen ook de meting verstoren. Vooral in waterextracten kan veel colloïdale P in plaats van alleen orthofosfaat mee gemeten worden, zowel met ICP als met de colorimetrische methode (Hens & Merckx, 2002).

Metingen, uitgevoerd op dezelfde manier door eenzelfde laboratorium, kunnen variëren. Zo werd in een Vlaamse VITO-studie (Goetelen *et al.*, 2011) voor drie verschillende bodemstalen bij vijfvoudige analyse een variatie van het P-AL-getal van respectievelijk 2,2, 4,1 en 6,3% gevonden. Deze cijfers zijn een maat voor de intralab-reproduceerbaarheid, die een belangrijk onderdeel is van de meetonzekerheid op elke analyse in een laboratorium. Verschillen tussen laboratoria voor eenzelfde bodemstaal kunnen groter zijn, onder andere door bovenstaande beïnvloedende factoren. Soms zijn er tussen de laboratoriummethodes ook kleine verschillen in extractietijd, pH, bodem:extract-verhouding, temperatuur van de extractie en de exacte concentratie van het extractiemiddel. Zo verschilt de extractietijd voor de P-AL methode in Vlaanderen (4 uur (Goetelen *et al.*, 2011)), Hongarije (2 uur (Csathó *et al.*, 2002)), Zweden (1,5 uur (Ulén, 2006)) en Nederland

(4 uur (Anon., 2012a)), hoewel ze allemaal afgeleid zijn uit dezelfde studie (Egnér *et al.*, 1960) waar een schudtijd van 4 uur wordt vermeld. Kleine variaties in deze factoren kunnen implicaties hebben op de gemeten P-beschikbaarheid (Sibbesen, 1983). Deze verschillen kunnen gedetecteerd worden in zogenaamde 'ringtesten' tussen verschillende laboratoria. Recente resultaten van Vlaamse ringtesten georganiseerd door ILVO en VITO geven goede (= lage) variaties in gemeten P-AL getallen door Vlaamse en buitenlandse laboratoria en een relatief klein aantal laboratoria met een te hoge Z-score (Tabel 3). Laboratoria die analyses van P-AL binnen het kader van het mestdecreet willen uitvoeren, dienen hiervoor een erkenning van de Vlaamse Overheid te hebben. Aan de erkenning hangen diverse voorwaarden vast, o.a. gebruik van het voorgeschreven compendium voor staalname en analyse, slagen voor ringtesten en audits door VITO.

Tabel 3. Resultaten van recente Vlaamse ringtesten voor de analyse van P-AL op bodems

Ringtest	Aantal labo's	Gemiddelde ^a (mgP/100g)	Standaarddeviatie ^a (mgP/100g)	Variatie ^a (CV%)	N(Z>2) /N _{totaal} ^b	Referentie
ILVO mei 2010	9	267,8	3,5	1,3%	3/9	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2010)
ILVO nov 2010	9	86,0	7,5	8,7%	1/9	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2011b)
ILVO mei 2011	6	22,9	1,2	5,2%	1/6	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2011a)
ILVO nov 2011	5	59,9	2,3	3,8%	0/6	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2012a)
ILVO mei 2012	7	19,4	1,7	8,8%	1/7	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2012b)
ILVO nov 2012	11	81,6	3,1	3,8%	1/11	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2013)
Coalla 2012	12	32,9	2,9	8,8%	1/12	(Anon., 2012b)
ILVO mei 2013	6	29,0	2,4	8,3%	1/6	(Amery <i>et al.</i> , 2013)
ILVO nov 2013	11	27,5	3,8	13,8%	1/11	(Amery <i>et al.</i> , 2014a)
ILVO mei 2014	7	3,88	0,3	7,7%	1/7	(Amery <i>et al.</i> , 2014b)
ILVO nov 2014	9	26,4	1,8	6,8%	1/9	(Amery <i>et al.</i> , 2015b)
ILVO mei 2015	8	21,4	1,7	7,9%	1/8	(Amery <i>et al.</i> , 2015a)

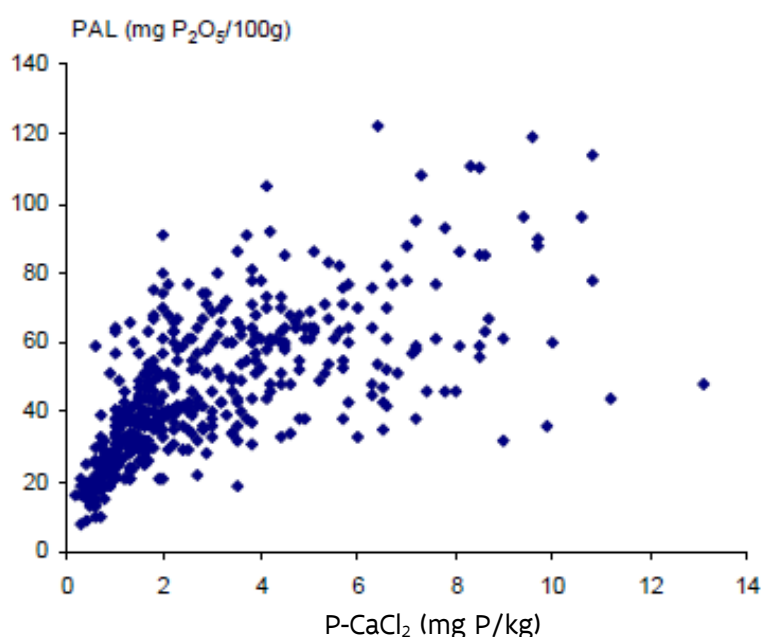
^a Berekend zonder outliers; ^b aantal labo's op het totaal aantal labo's die een Z-score hoger dan 2 halen (= niet slagen voor de ringtest).

Voor twee bodemstalen geanalyseerd in Nederland (Wageningen UR) en Hongarije (RISSAC) werden hogere waarden bekomen in Hongarije (10,3 en 6,2 mg P/100g respectievelijk) dan in Nederland (8,1 en 4,4 mg P/100 g respectievelijk) (Jordan-Meille *et al.*, 2012). De gebruikte methodes zijn sterk gelijkend, al wordt er in Hongarije maar 2 uur (Csathó *et al.*, 2002; Csathó, 2012) in plaats van 4 uur (Nederland (Anon., 2012a) en Vlaanderen (Goetelen *et al.*, 2011)) geëxtraheerd.

2.1.6 Combinatie van chemische extracties

Chemische extracties hebben verschillende limitaties door het feit dat ze eerder op empirische dan op mechanistische gronden zijn gebaseerd. Zo is er geen duidelijke link met het opnamemechanisme van een

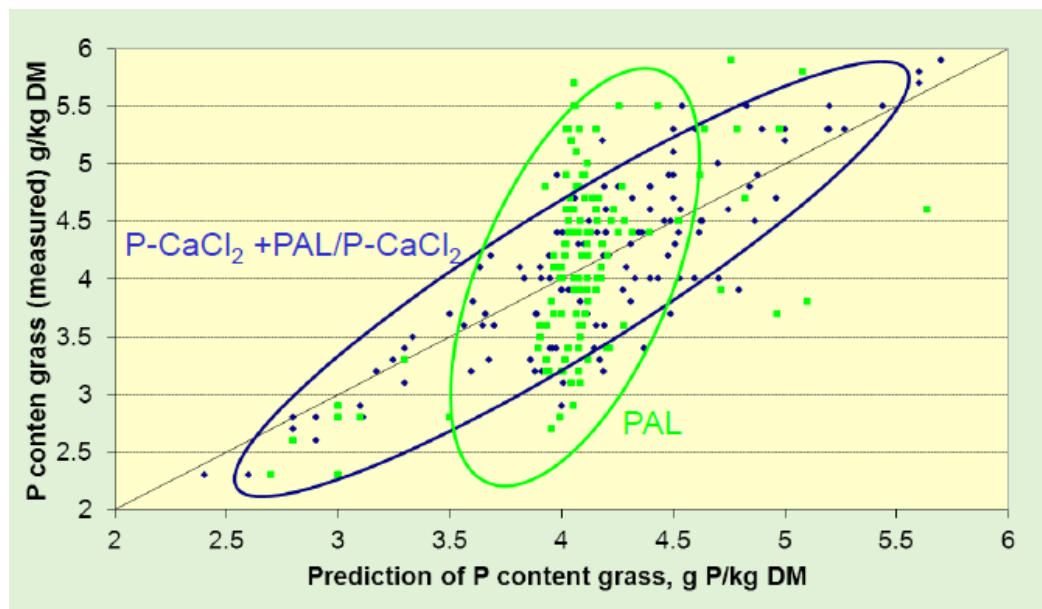
wortel en wordt geen rekening gehouden met het tijdsaspect, de bodemstructuur, bewortelingsgraad en het vochtgehalte (zie 2.1.2). Via een combinatie van verschillende chemische extracties is meer informatie beschikbaar om het gedrag van P in de bodem te beschrijven. Je kan met één meting niet tegelijk de onmiddellijke beschikbaarheid en de nalevering van P door de bodem inschatten (van Rotterdam-Los, 2010). Idealiter is er informatie beschikbaar over zowel de fosforintensiteit (bijvoorbeeld P-CaCl₂, onmiddellijke fosforbeschikbaarheid) als de fosforcapaciteit (bijvoorbeeld P-AL, fosfor die op langere termijn beschikbaar is). In Figuur 2 met data uit 461 Nederlandse bodemstalen is duidelijk dat bij eenzelfde P-AL getal (horizontale lijn) er een grote variatie aan P-CaCl₂ mogelijk is (Bussink *et al.*, 2011a). De verhouding van beiden geeft een grove indicatie van de fosforbuffercapaciteit van de bodem, welke nog beter kan voorspeld worden indien ook de oxalaatextraheerbare aluminium- en ijzerconcentratie gekend is (van Rotterdam-Los, 2010).



Figuur 2. P-AL (in mg P₂O₅/100 g, delen door 2,29 voor Vlaamse eenheden mg P/100 g) en P-CaCl₂ (mg P/kg) van 461 Nederlandse bodemstalen (Bussink *et al.*, 2011a)

De informatie verkregen door de combinatie van de twee chemische extracties levert een genuanceerder en correcter beeld van de fosforbeschikbaarheid in vergelijking met een enkelvoudige analyse (Ehlert *et al.*, 2014b). De opbrengst van snijmaïs en het P-gehalte in gras kon in verschillende veldproeven veel beter voorspeld worden met behulp van de combinatie van de twee parameters dan met één enkele parameter (Bussink *et al.*, 2011a; Bussink *et al.*, 2011b) (zie Figuur 3). Zo kunnen bodems met een gelijkaardig P-AL getal (bodem 1 en 2 of bodem 3 en 4 in Tabel 11) sterk verschillende fosforgehalten in gras hebben. Dit verschil is niet zichtbaar uit P-AL alleen, maar wel uit de verschillen in P-CaCl₂ (Tabel 11). Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie van maïsopbrengst met P-AL of P-CaCl₂ apart waargenomen, maar wel met hun verhouding (Ehlert *et al.*, 2014b). Door deze waarnemingen is in Nederland overgegaan naar een fosfobemestingsadvies voor maïs en grasland op basis van een combinatie van een CaCl₂-extractie en het P-AL-getal (zie 6.3.1.2.2). Er is evenwel nog meer onderzoek nodig voor verschillende gewassen. Het desorptieproces, geïnitieerd via fosfaatdepletie door de plant, kan over een grote groep verschillende bodems goed voorspeld worden met behulp van het P-AL- en het P-CaCl₂-getal (Bussink *et al.*, 2011a). Daardoor kunnen veranderingen in P-AL en P-CaCl₂ veroorzaakt door

gewasopname voor verschillende bodems ingeschat worden. Dit is belangrijk om de gevolgen van gereduceerde bemesting voor een specifieke bodem te kunnen inschatten (zie hoofdstuk 7). Er zijn ook combinaties van andere intensiteits- en capaciteitsparameters dan P-CaCl₂ en P-AL mogelijk (Ehlert *et al.*, 2014b).



Figuur 3. Een betere voorspelling van het fosforgehalte van gras op basis van P-CaCl₂ en P-AL dan op basis van P-AL alleen (Bussink *et al.*, 2011b).

2.2 Sink-methodes

Om het depletie- en aanvullingsproces van bodemfosfor zoals geïnitieerd door plantenwortels in rekening te brengen, kan gebruik gemaakt worden van een *sink*. Deze *sink* legt fosfaat uit de bodemoplossing vast (bijvoorbeeld door sorptie) waardoor aanvulling vanuit de vaste bodemfase begint en in stand gehouden wordt door verdere vastlegging van fosfaat door de *sink*, gelijkaardig aan de fosfaatopname door wortels. Voorbeelden van *sinks* zijn met ijzeroxide (FeO) geïmpregneerd papier en anionuitwisselaars (resins). De hoeveelheid fosfaat vastgelegd door de *sink* gedurende een bepaalde tijdspanne is dan een maat voor de fosforbeschikbaarheid. Opdat het FeO-papier of de anionuitwisselaar zich als een *sink* zou blijven gedragen gedurende de volledige tijdsduur van de meting, moet de capaciteit van de *sink* groot zijn ten opzichte van de beschikbare fosforhoeveelheid (Skogley & Dobermann, 1996). Daarom moet er voor bodems met veel beschikbare fosfor, zoals in Vlaanderen, veel *sink*-materiaal of maar een kleine bodemhoeveelheid toegevoegd worden voor een accurate meting van de fosforbeschikbaarheid. In Nederlands onderzoek is gebleken dat fosfordesorptie met FeO-papier zeer gelijkaardig is met fosfordesorptie door gras (van Rotterdam-Los, 2010). Informatie bekomen met *sinks* kan daarom goed de fosfordesorptie door een gewas gaan voorspellen. Dergelijke informatie is belangrijk om de gevolgen van gereduceerde bemesting voor een specifieke bodem in te schatten (hoofdstuk 7).

Het FeO-papier zou voor fosfor een betere en selectievere *sink* dan resin zijn, maar is mechanisch minder stabiel (Frossard *et al.*, 2000; Koopmans *et al.*, 2001). Beiden hebben het voordeel dat ze geen pH-verandering aan het bodemsysteem opleggen (van Raij, 1998). In verschillende veldstudies bleek dat de *sink*-methodes

een betere voorspelling van de fosforbeschikbaarheid gaven in vergelijking met de chemische extracties, en dit voor verschillende gewassen (Sibbesen, 1983; Delgado & Torrent, 1997; Ziadi *et al.*, 2001; Dekker & Postma, 2008; Sousa & Coutinho, 2009; Liebisch, 2011). Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd echter geen correlatie tussen maïsopbrengst en P geëxtraheerd met FeO-papier waargenomen (Ehlert *et al.*, 2014b). Een andere positieve eigenschap van deze methode is dat de relaties tussen de fosforbeschikbaarheid en de met de *sink* geëxtraheerde fosforhoeveelheid, in tegenstelling tot voor de chemische extracties, niet of veel minder afhankelijk van de bodemeigenschappen zijn (Sibbesen & Sharpley, 1997; van Raij, 1998).

Een nadeel van de *sink*-methode is dat ze omslachtiger is dan een chemische extractie. Er zijn namelijk meerdere analysestappen nodig aangezien de fosfor vastgelegd door de *sink* nadien dient gedesorbeerd en gemeten te worden. Toch wordt de fosforbeschikbaarheid van bodems in Brazilië op routinebasis gemeten met behulp van een anionuitwisselaar.

Aangezien de *sink*-technieken meestal in een waterige bodemextractie worden uitgevoerd, houden ze net als de chemische extracties geen rekening met de bodemstructuur, de bewortelingsgraad en het vochtgehalte. Anionuitwisselaars kunnen echter ook rechtstreeks *in situ* in de bodem gebracht worden. Daardoor wordt het diffusieproces van fosfor in de bodem in rekening gebracht waardoor de relevantie voor wortelbeschikbaarheid nog groter wordt (Abrams & Jarrell, 1992). De zogenaamde *Plant Root Simulator Probes* maken gebruik van deze techniek en worden in Canada gebruikt om de beschikbaarheid van verschillende kationen en anionen (waaronder fosfor) meteen in het veld te meten.

Een andere, recente techniek die gebruik maakt van een *sink* en rekening houdt met diffusieprocessen in de bodem is de *Diffusive Gradients in thin films Technique* (DGT). De opname van P door DGT en door planten zijn doorgaans sterk gecorreleerd, waardoor het mogelijk is om bodems waar extra fosfobemesting geen of wel een toename in gewasopbrengst teweegbrengt te onderscheiden (Degryse *et al.*, 2009). Deze techniek werd als beste meting van de fosforbeschikbaarheid in tropische bodems geëvalueerd (Six *et al.*, 2012), maar ook voor sterker bemeste Australische bodems scoorde de DGT-test goed (Menzies *et al.*, 2005; Speirs *et al.*, 2013). De DGT-methode wordt enkel aangeraden indien plantopname van P door diffusie gelimiteerd wordt (Degryse *et al.*, 2009).

2.3 Welke methode selecteren?

Alhoewel de meer mechanistische benadering van de fosforopname door de gecombineerde chemische extracties en de *sink*-methodes in een betere relatie met de fosforbeschikbaarheid van een bodem resulteert, zijn ze daarom niet altijd te verkiezen boven de eenvoudige chemische extracties. Om de P-beschikbaarheid correct in te schatten, wordt idealiter zowel de P in oplossing, de uitwisselbare P en de buffercapaciteit gemeten. Dit is evenwel niet praktisch haalbaar voor routine-analyses (Hammond & White, 2008). Over het algemeen zijn de chemische extracties minder omslachtig en kennen ze een langere geschiedenis waardoor er meer vergelijkingsmateriaal voorhanden is. Toch dient er wel degelijk met de talrijke limitaties van de beschikbaarheidsmethodes rekening gehouden te worden.

Dé ideale methode bestaat niet. De echte fosforbeschikbaarheid is altijd tijds- en gewasafhankelijk omdat het de hoeveelheid is die tijdens de groeicyclus van die specifieke plant in oplossing komt en opgenomen kan worden (Holford, 1997). Gewassen verschillen niet alleen in periode en lengte van het groeiseizoen, maar

ook hun fosforopname kan verschillen. Zo is het ook niet evident om de uitscheiding van exudaten door de verschillende plantenwortels te gaan nabootsen in een beschikbaarheidsmeting (Merbach *et al.*, 2010). Het is zeer belangrijk om rekening te houden met de specifieke mechanismen van de beschouwde beschikbaarheidsmethode en te beseffen dat de resultaten niet zomaar om te rekenen zijn naar beschikbaarheidscijfers bekomen met een andere methode. Er mag ook niet vergeten worden dat, zeker voor de chemische extracties, de bodemeigenschappen vaak een bepalende rol spelen. Fosforbeschikbaarheidsmetingen moeten dan ook met de nodige omzichtigheid behandeld worden.

3 Bodemeigenschappen die fosforbeschikbaarheid beïnvloeden

De opname van fosfor uit de bodem door de planten en de vrijgave van fosfor uit de vaste bodemfase naar de onmiddellijk plantbeschikbare fractie, zijn complexe processen (zie 1.2). Verschillende factoren hebben een invloed op deze processen. Sommige van deze factoren kunnen door de landbouwer gewijzigd worden, waardoor kan ingegrepen worden op de plantbeschikbare fosforfractie in de bodem.

3.1 Het ijzer- en aluminiumgehalte in de bodem

3.1.1 Beschrijving

Fosfor wordt sterk gesorbeerd op ijzer- en aluminiumoxiden en -hydroxiden aanwezig in de bodem (McDowell & Condron, 2001). Hierdoor worden soms negatieve correlaties gevonden tussen het ijzer- en/of aluminiumgehalte van verschillende bodems enerzijds en de plantbeschikbare fosforhoeveelheid (Gallet *et al.*, 2003a; Renneson *et al.*, 2013a) of de verhouding van de plantbeschikbare over de totale fosforhoeveelheid (Ogaard, 1994) anderzijds. Voor 135 verschillende Europese bodems was de fosforbeschikbaarheid echter niet gelinkt aan het ijzer- of aluminiumgehalte (Neyroud & Lischer, 2003).

3.1.2 Beïnvloeden via bodembeheersmaatregelen

Een landbouwer kan het ijzer- of aluminiumgehalte in de bodem niet verminderen, maar eventueel wel doen toenemen door toevoegen van bijvoorbeeld AlCl_3 , FeCl_3 of $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$. Dergelijke toevoegingen kunnen chemische fosfaatfixatie veroorzaken, wat overwogen kan worden bij sterk P-lekkende bodems om fosforverliezen te beperken (Schoumans *et al.*, 2005). Ook verschillende ijzer- of aluminiumbevattende restproducten kunnen gebruikt worden (Chardon & Dorioz, 2010). Het negatieve effect van de toevoegingen op de fosforbeschikbaarheid voor de plant zou eerder beperkt zijn maar verdient verder langetermijnsonderzoek (Smith *et al.*, 2004). Meer details zijn terug te vinden in deel 3 van deze rapportreeks (Amery & Vandecasteele, 2015b) (dergelijke bodemtoevoegingen als een alternatieve maatregel om fosforverliezen uit landbouwbodems te beperken).

Geen van deze producten komt voor in Bijlage 1 van het Koninklijk besluit van 28 januari 2013 betreffende het in de handel brengen en het gebruiken van meststoffen, bodemverbeterende middelen en teeltsubstraten (Anon., 2013a). Vooraleer het product toegepast kan worden op de bodem, moet daarom een aanvraag tot ontheffing ingediend worden bij de Federale overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu. Indien het product een afvalstof is, moet daarvoor bij OVAM ook nog een statuut van secundaire grondstof aangevraagd worden.

3.2 Bodemtextuur

Bij bodemexperimenten in het Verenigd Koninkrijk kwam procentueel meer van de toegediende P in de plantbeschikbare fracties terecht bij lichte zandgronden in vergelijking met de zwaardere gronden (Blake *et al.*, 2003). Fosforbeschikbaarheid zou dalen bij een hoog kleigehalte (Sharpley & Rekolainen, 1997). Voor 120 Waalse bodems was de beschikbare fosforconcentratie negatief gecorreleerd met het kleigehalte (Renneson *et al.*, 2013a). Over 135 verschillende Europese bodems werd echter geen correlatie tussen de fosforbeschikbaarheid en het kleigehalte gevonden (Neyroud & Lischer, 2003). Ook de fosforbeschikbaarheid

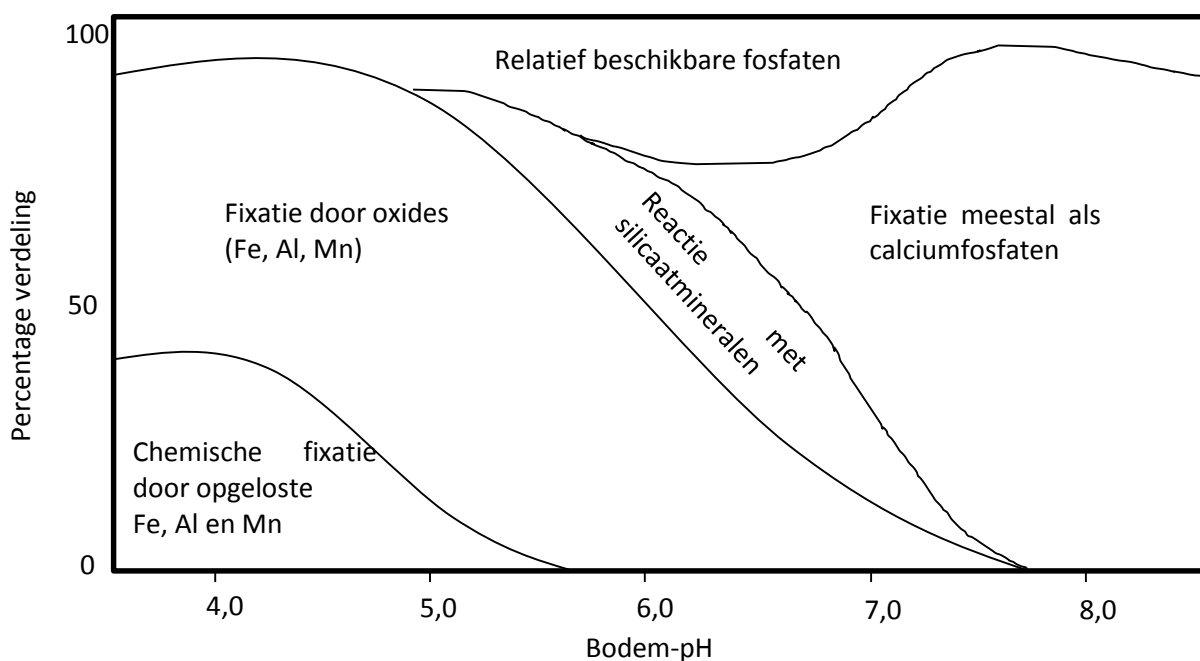
gemeten met resin-*sinks* in 20 verschillende bodems was niet gelinkt aan de bodemtextuur (Leinweber et al., 1999).

3.3 Bodem-pH

3.3.1 Beschrijving

Fosfor kan bij variërende pH op verschillende manieren worden vastgelegd (Figuur 4). De relatieve beschikbaarheid is dus afhankelijk van de bodem-pH en is het hoogst in het pH-traject 5,5-6,5 (Figuur 4). Bij meer zure of meer basische pH wordt fosfaat meer gefixeerd door respectievelijk ijzer en aluminium, of door Ca, en is de beschikbaarheid dus lager (Sharpley & Rekolainen, 1997).

Uit de analyses van de 10 Vlaamse bodems, uitgevoerd in het kader van deze literatuurstudie, werd voor geen enkele P-beschikbaarheidsindex (P-AL, Pw, P-CaCl₂ en P-resin) een relatie met de bodem-pH gevonden. In een studie met 120 Waalse bodems was de pH wel significant positief gecorreleerd met de beschikbare fosforconcentratie (Renneson *et al.*, 2013a).



Figuur 4. Verdeling van de aanwezige fosfaten in de bodem over de verschillende vormen in relatie tot de bodem-pH (naar (Anon., 2013d)).

3.3.2 Beïnvloeden via bodembeheersmaatregelen

Aangezien de fosforbeschikbaarheid theoretisch het hoogst is in het pH-traject 5,5-6,5, kan geprobeerd worden de bodem-pH te verlagen of te verhogen tot in dit streeftraject. Het is belangrijk om binnen dit streeftraject te blijven. Indien de bodem-pH reeds in het streeftraject ligt, kan de fosfaatbeschikbaarheid niet verder verhoogd worden via pH-aanpassingen (Russchen et al., 2011). De pH kan beperkt verlaagd worden via bijvoorbeeld nitraatmeststoffen omdat ammoniumopname door planten en het nitrificatieproces verzurend werken. De pH kan verhoogd worden via bekalking of composttoediening.

Bekalking heeft effect op meerdere fosforgerelateerde processen. Toedienen van kalk kan de mineralisatie bevorderen en zo fosfor vrijmaken (Sharpley & Rekolainen, 1997). Ijzer- en aluminiumfosfaten zijn bovendien beter oplosbaar bij hogere pH. Daartegenover staat dat calciumfosfaten minder goed oplosbaar zijn bij hogere pH. Daarnaast kunnen de toegevoegde calciumionen samen met kleimineralen fosfaat gaan sorberen. Indien veel aluminium aanwezig is in de bodem, kan de vorming van fosforsorberende aluminiumneerslagen bij bekalking de fosforbeschikbaarheid doen dalen (Haynes, 1982). Het netto-effect van deze processen is afhankelijk van bodemeigenschappen zoals de uitgangs-pH, de fosfaattoestand, het klei- en het oxidegehalte (de Boer, 2008). Daarom worden er in de literatuur zowel afnames als toenames van de fosforbeschikbaarheid geobserveerd wanneer bodems bekalkt worden (Kirkby & Johnston, 2008; Syers et al., 2008). Zo werd bijvoorbeeld in experimenten met graslandbodems (pH 4,3-5,4) een toename in de uitwisselbare P en de grasopbrengst na bekalken waargenomen (Holford et al., 1994; Holford & Crocker, 1994). Wellicht was het oplossen van de ijzer- en aluminiumfosfaten of minder sterke fosforsorptie bij hogere pH hier het dominante proces. In een ander experiment werd een afname in de P-beschikbaarheid na bekalken gevonden, vermoedelijk door een hogere calciumconcentratie (Curtin & Syers, 2001). Zevenentwintig tot 30 jaar na bekalking van een bodem in Canada was de pH in het bekalkte deel nog steeds hoger dan in het onbekalkte deel, maar werden geen verschillen in opbrengst en P-beschikbaarheid geobserveerd (Beckie & Ukrainetz, 1996). Er zijn nog een heleboel andere literatuurvoorbeelden met tegengestelde resultaten na bekalking te vinden (Haynes, 1982; Kirkby & Johnston, 2008; Syers et al., 2008). Bekalken is bijgevolg geen goede generieke maatregel om de fosfaatbeschikbaarheid te verhogen. Er wordt aangeraden om de specifieke omstandigheden eerst goed te analyseren alvorens tot bekalking over te gaan. Om ongewenste effecten te beperken wordt aangeraden om geen grote kalkgiften maar regelmatig kleine giften toe te dienen.

3.4 Fosfaatfixerende bodems

Fosfaatarme bodems hebben een fosfaatbeschikbaarheid beneden een bepaald streefgetal. Fosfaatarme bodems zijn niet per se fosfaatfixerend aangezien ze een lage fosforbeschikbaarheid kunnen vertonen door beperkte fosforbemesting in het verleden. Fosfaatfixerende bodems bezitten naast een lage fosfaattoestand de eigenschap om toegediende fosfaat (bemesting) sterk in de bodem vast te leggen (Schoumans *et al.*, 2004a). Ze hebben bijgevolg een grote fosforbuffercapaciteit. In fosfaatfixerende bodems wordt fosfor, toegediend via bemesting, sterk vastgelegd zodat de fosforbeschikbaarheid laag blijft. In voorgaande delen zijn reeds verschillende mechanismen voor fosfaatvastlegging besproken op basis van ijzer- en aluminiumgehalte (deel 3.1), bodemtextuur (deel 3.2) en bodem-pH (deel 3.3). In Nederland worden fosfaatfixerende eigenschappen bijgevolg vooral teruggevonden in zware kleigronden (Reijneveld, 2001) en in zure zandgronden met hoge ijzerconcentraties (Russchen et al., 2011). Het effectief meten van fosfaatfixatie is arbeidsintensief en duur, daarom bestaat in Nederland voor kalkarme bodems een eenvoudiger methode bestaande uit een meting van het Pw-getal (reeds uitgevoerd voor de evaluatie van fosfaatarme classificatie) en aanvullend een oxalaatextractie (voor de bepaling van het aluminium- en ijzergehalte), en een pH-meting (Schoumans *et al.*, 2004a). Deze methodiek is louter wetenschappelijk en wordt in de (Nederlandse) wetgeving niet gebruikt. Voor kalkhoudende bodems bestaat geen goede methodiek.

Het is niet bekend waar er zich in Vlaanderen fosfaatfixerende bodems bevinden. Toepassen van het Nederlandse protocol voor het bepalen van de fosfaatfixatie (Schoumans *et al.*, 2004a) om deze

fosfaatfixerende bodems te detecteren stuit op enkele problemen. Ten eerste wordt in Vlaanderen de fosforbeschikbaarheid met de P-AL-methode gemeten (in plaats van Pw), welke eerder een maat is voor de fosforcapaciteit van een bodem. Ten tweede moet het ijzer- en aluminiumgehalte in de bouwvoor gemeten worden. Dit ijzer- en aluminiumgehalte werd in de jaren '90 in een raster met afstand 1,5 km gemeten in de Vlaamse zandige bodems (0-90 cm), in het kader van het bepalen van de fosfaatverzadigingsgraad (Baert et al., 1997). De ruwe individuele data zijn niet beschikbaar, maar uit het overzicht blijkt dat de mediaan van de som van het ijzer- en aluminiumgehalte in de 0-30 cm laag rond de 40 mmol/kg ligt, ver beneden de grenswaarde van 120 mmol/kg voorgesteld in Schoumans et al. (2004a). In elke provincie zijn er echter individuele resultaten die deze grenswaarden wel overschrijden, en bijgevolg potentieel fosfaatfixerende bodems betreffen (afhankelijk van het Pw-getal en de pH). Een pijnpunt is dat deze grenswaarden vastgesteld zijn als de 5% hoogste waarden van Nederland, en geen wetenschappelijke onderbouwing voor effectieve fosfaatfixatie hebben. Een derde probleem is dat er voor kalkhoudende bodems geen protocol voorhanden is. Om fosfaatfixatie in Vlaanderen te detecteren, zijn bijgevolg aangepaste protocollen en daarbij aansluitende metingen in Vlaamse percelen noodzakelijk.

3.5 Organisch stofgehalte en humuszuurconcentratie

3.5.1 Beschrijving

Hogere gewasopbrengsten kunnen bekomen worden bij een hoger organisch stofgehalte, maar dit kan eerder gerelateerd zijn met een betere bodemstructuur en wortelgroei dan met een reële toename van de fosforbeschikbaarheid in de bodem (Johnston & Dawson, 2005; Syers *et al.*, 2008). Organische stof kan ook onrechtstreeks de fosforbeschikbaarheid verhogen door een positief effect op het waterhoudend vermogen van een bodem (zie deel 3.7). Organische fosfor kan gemineraliseerd worden uit organische stof door microbiologische bodemactiviteit, en eventueel beschikbaar worden voor de plant (Horst et al., 2001).

Voor 120 Waalse bodems werd een lagere fosforbeschikbaarheid bij hogere organische stofgehalten waargenomen (Renneson *et al.*, 2013a). Langetermijnexperimenten in Rothamsted toonden wel een hoger P-CaCl₂-getal bij een hoger organische stofgehalte (Syers et al., 2008). Bij decennia lang bemesten met stalmest nam de totale P en Olsen-P ongeveer in gelijke mate toe als bij bemesten met fosforkunstmest, maar de onmiddellijk beschikbare fosforfractie (P-CaCl₂) was vaak dubbel zo groot bij de stalmestbemesting (Johnston & Dawson, 2005). Dit zou kunnen wijzen op bindingsplaatsen met lage bindingsenergie op organische stof. Dit is vooral het geval bij stalmest en veel minder bij meer inert organisch materiaal zoals bijvoorbeeld in digestaat. Uit data van Rothamsted blijkt ook dat bij een hoger organisch stofgehalte van de bodem (2,4%) de maximale opbrengst bij een veel lagere Olsen-P mogelijk is (16-18 ten opzichte van 32-61 mg P/kg) dan bij een lager organisch stofgehalte (1,5%) (Johnston & Dawson, 2005). Deze verschillen verdwijnen echter in een serre-experiment, nadat de bodems gezeefd werden. Het effect van het bodemorganisch stofgehalte op de fosforbeschikbaarheid is dus niet rechtstreeks, maar onrechtstreeks via de bodemstructuur.

Humuszuren zijn een deel van de organische stof in de bodem en zijn oplosbaar. Ze kunnen met fosfaat in competitie treden voor sorptie op de vaste bodemfase, fosfaat afschermen voor vastlegging en de neerslag van calciumfosfaten belemmeren. Via deze processen kunnen humuszuren bijgevolg de fosforbeschikbaarheid verhogen (Russchen et al., 2011), maar ook de wortelgroei kan gestimuleerd worden.

Sommige plantenwortels kunnen organische zuren uitscheiden waardoor de fosforbeschikbaarheid lokaal verhoogd wordt.

3.5.2 Beïnvloeden via bodembeheersmaatregelen

Het in stand houden of verhogen van het organische stofgehalte in een bodem heeft op veel processen een positieve invloed. Via verhoogde mineralisatie, waterhoudend vermogen en een betere bodemstructuur kan de fosforopname door de plant verhoogd worden. Organische stof bevat van nature uit reeds fosfor, waardoor toevoegen van organische stof ook als fosforbemesting geldt (zie hoofdstuk 5).

In experimenten, uitgevoerd door HoGent, bleek dat het toevoegen van humuszuren resulteerde in hogere opbrengst en P-opname van gras (vooral de eerste snede), maïs, aardappel en spinazie (Verlinden et al., 2009). Dit is echter geen rechtstreeks bewijs dat humuszuren de fosforbeschikbaarheid daadwerkelijk doen toenemen, aangezien de geobserveerde effecten ook vanuit een betere wortelontwikkeling kunnen verklaard worden (Russchen et al., 2011). Bij toepassing van humuszuren (Humifirst) aan aardappelen in 2 proefvelden van de BDB werd geen opbrengsttoename geobserveerd (Maes et al., 2013). Er werd wel reeds vastgesteld dat het toevoegen van organische zuren die typisch uitgescheiden worden door wortels (zoals citroen-, oxaal- en appelzuur) de fosforbeschikbaarheid kunnen doen toenemen (Braems, 2011). Ook kan de gecombineerde toediening van fosforbemesting met humus- en fulvuszuren aan kalkbodems de toegediende fosfor beter plantbeschikbaar houden door het verhinderen of verminderen van calciumfosfaatneerslagen (Delgado et al., 2002).

3.6 Bodemstructuur

3.6.1 Beschrijving

Een goede bodemstructuur zou leiden tot betere P-beschikbaarheid, zoals afgeleid uit experimenten in het Verenigd Koninkrijk (Kirkby & Johnston, 2008). In vergelijking met een slechte bodemstructuur zou bij een goede bodemstructuur een lagere fosfaattoestand volstaan om dezelfde opbrengst te realiseren (Dekker & Postma, 2008). Een goede bodemverluchting zou de fosforopname door de plant ook verhogen (Sharpley & Rekolainen, 1997).

3.6.2 Beïnvloeden via bodembeheersmaatregelen

Door compactie te vermijden (bijvoorbeeld via niet-kerende grondbewerking en een goede bodembedekking) kan een landbouwer bijdragen tot een goede P-beschikbaarheid in de bodem (Kirkby & Johnston, 2008). Wortels kunnen zich beter ontwikkelen en een betere diffusie van fosfor doorheen de bodem is mogelijk (Dekker & Postma, 2008). Het is ook belangrijk om verslemping te vermijden. Bodems die daardoor onder water komen te staan, kunnen door anaerobe omstandigheden immers veel fosfor vrijgeven (zie deel 3.7).

3.7 Bodemvochtgehalte

3.7.1 Beschrijving

Een voldoende vochtgehalte in de bodem is belangrijk om een vlotte diffusie van P doorheen de bodem naar de plant te verzekeren (Horst et al., 2001). Een te laag bodemvochtgehalte belemmert het diffusieproces dat verantwoordelijk zou zijn voor ongeveer 90% van de P-opname door het gewas (Dekker & Postma, 2008). Daarnaast kan een hoger vochtgehalte resulteren in meer mineralisatie en dus vrijkomen van P (Whalen et al., 2001).

Indien een bodem onder water komt te staan (verzadiging), kunnen anaerobe omstandigheden ontstaan. Daardoor kunnen ijzer (III)-oxiden gereduceerd en opgelost worden en daarbij de gesorbeerde fosforcomponenten in oplossing brengen (Shahandeh et al., 2003). De fosforbeschikbaarheid zal bijgevolg toenemen indien de bodem waterverzadigd wordt.

3.7.2 Beïnvloeden via bodembeheersmaatregelen

Fosfortekort heeft vaak te maken met te droge bodemomstandigheden. Voorzieningen om het bodemvochtgehalte op peil te houden, stimuleren daardoor onrechtstreeks de fosforbeschikbaarheid voor de plant. Daardoor kan in sommige sectoren een gecombineerde toediening van fosfor en water via fertigatie extra voordelig zijn voor de fosforvoorziening voor de plant (Dekker & Postma, 2008).

3.8 Het stikstofgehalte in de bodem

Fosforopname door het gewas neemt toe bij hoger stikstofgehalte in de bodem of bij toenemende N-bemesting (Dekker & Postma, 2008; Chardon et al., 2009). Het is mogelijk dat dit effect een gevolg is van een kleine bodemverzuring door de aanwezigheid van ammonium in de bodem (pH-effect: zie deel 3.3). Het is evenwel ook mogelijk dat stikstof de fosforbeschikbaarheid niet beïnvloedt maar wel de fosforopname onrechtstreeks verhoogt door stimulatie van de plant- en wortelgroei.

3.9 Silicium

3.9.1 Beschrijving

Silicium komt in de bodemoplossing voor als silicaat, dat in competitie kan treden met fosfaat voor sorptie op de vaste bodemfase en zo de fosforbeschikbaarheid kan verhogen (Syers et al., 2008). Hogere opbrengsten of P-opname kunnen ook verklaard worden door een verhoogde translocatie van P in de plant door toedoen van silicium, en dus niet via een verhoging van de fosforbeschikbaarheid (Russchen et al., 2011).

3.9.2 Beïnvloeden via bodembeheersmaatregelen

Silicium toevoegen aan de bodem kan de fosfaatbeschikbaarheid verhogen. Opgeloste silicium werkt daarbij het meest efficiënt, maar ook het silicaat in 'slakken' (vb thomasslakkenmeel, zie 5.6.2) kan de fosfaatbeschikbaarheid stimuleren (Russchen et al., 2011). Het effect is eerder gering bij bodems met reeds een hoge fosfaattoestand.

3.10 Temperatuur

Een te lage temperatuur wordt soms als de reden aangehaald waarom jonge maïsplantjes paars zien door fosforgebrek. Nochtans wordt een lagere fosforsorptie (en daardoor hogere beschikbaarheid) waargenomen bij dalende bodemtemperatuur (Silveira & O'Connor, 2013). In een bodem waaraan digestaat was toegevoegd werd een hogere fosforbeschikbaarheid (gemeten met ijzeroxidepapier, zie 2.2) gemeten bij 25°C dan bij 37°C (Akhtar et al., 2002). Een andere studie vond een grotere fosformineralisatie en dus –vrijstelling bij toenemende temperatuur (Whalen et al., 2001). Deze studies bestudeerden echter alleen de bodem (zonder gewasgroei). In een studie die beide factoren onderzocht, werd vastgesteld dat een lagere bodemincubatietemperatuur (=temperatuur vòòr gewasgroei, 10-25°C) resulteerde in een hogere extraheerbaarheid en opname van toegevoegde fosfor door het tarwe, maar dat bij lagere groeitemperatuur (=temperatuur tijdens gewasgroei, 10-25°C) beduidend minder fosforopname werd vastgesteld (Sheppard & Racz, 1984a). In een parallelle studie werd bij hogere bodemtemperatuur een grotere fosforopname waargenomen, voor een groot deel verklaard door een grotere wortelgroei. Voor fosforrijke bodems is de grotere wortelgroei niet de enige verklarende factor: ook de toename in fosforbeschikbaarheid bij hogere temperatuur verklaart ten dele de hogere fosforopname (Sheppard & Racz, 1984b). Bij lagere temperatuur zou ook de translocatie van P van de wortel naar de bovengrondse delen van maïs vertragen (Engels & Marschner, 1992). Bij lage temperatuur kan bemestingsplaatsing daarom zeer efficiënt zijn (Sheppard & Racz, 1985), maar niet altijd resulterend in meer gewasopbrengst (zie 5.5.2).

4 Biologische factoren die fosforbeschikbaarheid beïnvloeden

4.1 Regenwormen

Fosfaat in wormuitwerpselen en in de wanden van wormgangen is beter beschikbaar dan in de omringende bodem. Via modelberekeningen wordt geschat dat de regenwormen tussen 4 en 40% van de fosfaatopname van een goed bemest perceel vrijmaken. Verhoging van de regenwormactiviteit kan daarom een hogere fosfaatopname van het gewas tot gevolg hebben (de Boer, 2008). Dit werd ook bewezen in een potexperiment (Vos *et al.*, 2014): regenwormen verhoogden de anorganische en organische opgeloste fosforconcentratie in een fosforarme bodem, waardoor de opbrengst en de fosforopname door gras significant verhoogden. Deze regenwormactiviteit kan gestimuleerd worden door bekalken en reductie van de intensiteit van de bodembewerking.

4.2 Mycorrhizae

Mycorrhizae zijn schimmels die in symbiose leven met wortels van de meeste planten (Russchen *et al.*, 2011). Bij lage fosfaatbeschikbaarheid kunnen mycorrhizae het gewas van extra fosfor voorzien door (Owen *et al.*, 2014):

- Een betere exploratie van de bodemfosfor door hun uitgebreide hyffennetwerk
- Een grotere affiniteit voor fosfaat ten opzichte van plantenwortels
- het vrijmaken van fosfaat via solubilisatie, bijvoorbeeld door uitscheiding van organische zuren (mobiliseren anorganisch gebonden P)
- het vrijmaken van fosfaat door mineralisatie van organisch gebonden P door de vrijgave van fosfatases (enzymen)

Enkel door de twee laatstgenoemde mechanismen wordt de bodemfosforbeschikbaarheid effectief verhoogd. Het eerste mechanisme is interessant voor gewassen met een beperkt wortelstelsel, zoals bijvoorbeeld zaaiuien. Symbiose tussen mycorrhizae en plantenwortels en bijgevolg hogere P-opname en gewasopbrengsten komen voornamelijk voor bij lage fosforbeschikbaarheid (Asghari *et al.*, 2005; Sorensen *et al.*, 2005) en is dus minder relevant voor de Vlaamse landbouw (de Boer, 2008; Sorensen *et al.*, 2008; Russchen *et al.*, 2011). Bovendien is de symbiose gevoelig aan verschillende bodembeheersmaatregelen als fungiciden, ploegen en grondontsmetting (Owen *et al.*, 2014). In de VS echter werden 10 tot 45% hogere opbrengsten van aardappel waargenomen na inoculatie met mycorrhizae, en dit in bodems met een hoge fosfortoestand (Douds *et al.*, 2007).

4.3 Fosfaatoplossende bacteriën en schimmels

Ook fosfaatoplossende bacteriën en schimmels kunnen de fosforbeschikbaarheid lokaal verhogen door mineralisatie (via fosfatases) en solubilisatie (Russchen *et al.*, 2011; Richardson & Simpson, 2011; Krey *et al.*, 2013). Het laatste is niet alleen mogelijk via de uitscheiding van organische zuren waardoor de pH verlaagd wordt en liganduitwisseling kan plaatsvinden, maar ook door CO₂-vorming en N-assimilatie (beiden resulterend in pH-verlaging), metaalreductie (bijvoorbeeld ijzerreductie waardoor fosfaat, vastgelegd in ijzercomponenten, kan vrijkomen) en P-opname (waardoor P vanuit de vaste bodemfase wordt aangevuld in de bodemoplossing, zie 1.2) (Owen *et al.*, 2014). Voordelen van deze bacteriën en schimmels ten opzichte

van mycorrhizae is het vrijlevende karakter (waardoor het gewas ook geen suikers moet voorzien voor de symbiose) en de beperktere kwetsbaarheid van deze bacteriën/schimmels.

Er zijn reeds heel wat dergelijke organismen van nature aanwezig in de bodem. De kans op succes bij inoculatie (toevoegen) of stimulatie van fosfaatoplossende bacteriën en schimmels is echter beperkt door de grote complexiteit en concurrentie in het bodemleven (Richardson & Simpson, 2011). Er bestaan commerciële bacteriënmengsels die claimen de fosfaatbeschikbaarheid van een bodem te verhogen, maar wetenschappelijke evidentie ontbreekt vaak, vooral op veldschaal. Een recente analyse van studies die het effect van commerciële bio-inoculanten nagingen, gaf aan dat de resultaten variabel, inconsistent en contradictorisch zijn (Owen *et al.*, 2014). In de EU ontbreken kwaliteitsstandaarden en wetgeving (Owen *et al.*, 2014). Sommige studies vinden een negatief effect van hoge bodemfosforbeschikbaarheid op het vrijmaken van fosfaat door deze bacteriën en schimmels (Egamberdiyeva, 2007; Russchen et al., 2011; Krey et al., 2013), terwijl andere studies ook bij hoge fosforbeschikbaarheid extra fosfaatomobilisatie observeren (de Boer, 2008). In twee fosfaatverzadigde Vlaamse bodems verhoogden fosfaatoplossende bacteriën de wateroplosbare fosforconcentratie niet of slechts kortstondig (De Bolle, 2013).

4.4 Planten en rassen

4.4.1 Mechanismen voor verhoogde efficiëntie van P-benutting

Sommige planten zoals kruisbloemigen (oa bladrammenas, koolzaad, gele mosterd, meerdere koolgewassen) en vlinderbloemigen hebben een efficiëntere fosfaatbenutting dan andere planten (Russchen et al., 2011). Verschillende strategieën (Rose et al., 2010; Richardson et al., 2011) kunnen verantwoordelijk zijn voor de hogere fosfaatbenutting:

- Een uitgebreid wortelstelsel
- Uitscheiding van fosfatasen voor mineralisatie van organische fosfor
- Uitscheiding van organische zuren voor oplossen of desorberen van anorganische fosfor
- Uitscheiding van hoge concentraties koolzuur waardoor de pH lokaal verlaagd wordt en fosfaat mobiliseert

Ook binnen een bepaalde gewassoort is het mogelijk dat er P-efficiënte en minder P-efficiënte rassen bestaan (Eghball et al., 2003). Via veredeling of kruising kan de efficiëntie van P-opname door het gewas verhoogd worden, zoals bijvoorbeeld voor ui (Scholten et al., 2011). Dit kan door te selecteren op rassen met goede symbiose met mycorrhizae (zie deel 4.2) of met uitgebreide wortelstelsels (Fernandes *et al.*, 2014). Hogere P-opname van een bepaald ras is echter vaak een logisch gevolg van een hogere droge stofproductie van dat ras, in plaats van veroorzaakt door hogere P-efficiëntie (de Boer, 2008).

4.4.2 Verhogen van fosforbeschikbaarheid voor andere gewassen

Gewassen die fosfaat efficiënt benutten (zie 4.4.1) kunnen aangewend worden om de beschikbaarheid van fosfor voor andere gewassen te verhogen via (i) het samen opnemen van P-efficiënte gewassen met P-inefficiënte gewassen in een rotatie of intercroppingsysteem of via (ii) het gebruik van resten van P-efficiënte gewassen voor volgende P-inefficiënte gewassen (Simpson et al., 2011). Zo werd een hogere fosforopname en grotere opbrengst van een volggewas geobserveerd in verschillende studies: voor maïs na

leguminosen in serre- en veldexperimenten in Nigeria (Horst et al., 2001; Pypers et al., 2007), voor tarwe na leguminosen in een serre-experiment in Australië (Nuruzzaman et al., 2005), voor graan na faba-bonen in een serre-experiment in Australië (Rose et al., 2010) en in vele andere studies (Simpson et al., 2011). Het is echter onduidelijk welk mechanisme achter deze opbrengst- en P-opname-verhoging ligt. Wellicht kan een volgteelt niet rechtstreeks profiteren van een verhoogde fosforbeschikbaarheid (Pypers et al., 2007). De verhoging van de fosforbeschikbaarheid in de wortelzone door het uitscheiden van fosfatases en organische zuren door P-efficiënte gewassen (zie 4.4.1) zou te kort van duur zijn opdat een volggewas daarvan zou kunnen profiteren (Nuruzzaman et al., 2005). Gewassen die samen met P-efficiënte gewassen geteeld worden (intercropping) kunnen mogelijk wel profiteren van de verhoging in fosforbeschikbaarheid. Er is voor de combinatie van gras en klaver echter niet eenduidig bewezen dat de fosfaatopname hoger zou zijn dan voor een grasmonocultuur, zeker niet indien de bodems goed bemest werden (de Boer, 2008).

Een andere mogelijke verklaring voor hogere P-opname en opbrengst van een volggewas is de mineralisatie van planten- of wortelresten van de P-efficiënte gewassen, waarbij P geleidelijk vrijkomt voor het volggewas (Nuruzzaman et al., 2005). Dergelijk mechanisme pleit ook voor het telen en inwerken van vanggewassen voor de P-voorziening van een volggewas. Zo werd een grotere opbrengst en P-opname geobserveerd voor sorghum na gras in een serre-experiment in de VS (Cavigelli & Thien, 2003) en voor tarwe en aardappel na groenbemesters in een veldexperiment in Canada (Entz et al., 2006). Een hogere fosforopname maar geen verhoogde opbrengst werd in Australië waargenomen voor tarwe in aanwezigheid van gewasresten van erwten, waarbij 9 tot 44% van de P opgenomen door tarwe afkomstig was van de gewasresten (Noack et al., 2014). Er werd echter geen verhoogde opbrengst of fosforopname waargenomen voor gerst na verschillende vanggewassen in een veldexperiment met lage fosfortoestand in Denemarken (Jensen et al., 2005). In het algemeen zijn bijdragen van gewasresten zeer variabel en wellicht enkel significant bij grote hoeveelheden gewasresten met relatief hoge fosforconcentratie en relatief lage bodemfosforgehaltes (Damon et al., 2014). Ook andere positieve gevolgen van plantenresten (vb meer bodemleven, hoger vochtgehalte,...) kunnen de hogere opbrengst en indirect de P-opname verklaren.

Effecten van P-efficiënte gewassen op andere gewassen zijn vaak klein, zeker in vergelijking met het effect van fosforbemesting (Horst et al., 2001). Studies zijn vaak beperkt tot serre-experimenten en missen validatie onder veldomstandigheden (Simpson et al., 2011). Het grootste deel van de experimenten is bovendien uitgevoerd op bodems met lage P-toestand (uitzondering: Nuruzzaman et al. (2005)).

5 Verhogen van de plantbeschikbare fosfor met P-bemesting

5.1 Belang

In voorgaande twee hoofdstukken werd duidelijk dat de plantbeschikbare fosfor kan afhangen van bodemeigenschappen en biologische karakteristieken. Er werden echter geen relaties tussen bodemeigenschappen en plantbeschikbare fosfor gevonden bij 135 verschillende Europese bodems (Neyroud & Lischer, 2003). Wellicht zijn de effecten van de bodemeigenschappen gemaskeerd door de verschillen in bemestingsgeschiedenis van de bodems. Zo werd ook voor bodems uit 20 lysimeters vastgesteld dat de beschikbare P-concentratie niet gecorreleerd was aan de textuur en het bodemgebruik, maar wel aan de bemestings- en managementsintensiteit (Leinweber et al., 1999). In Zwitserland blijkt het landgebruik meer bepalend te zijn dan omgevingsvariabelen (hoogte, helling,...) voor de bodemfosforverdeling (Roger et al., 2014).

Effecten van bodembeheersmaatregelen of biologische ingrepen op de fosforbeschikbaarheid zijn over het algemeen kleiner dan de effecten van bemesting (zie bijvoorbeeld Horst et al. (2001) en Krey et al. (2013)). Indien voldoende P-bemesting voorhanden is en deze wettelijk mag toegepast worden, zal het toedienen van bemesting bijgevolg een groter effect hebben dan andere maatregelen op de fosforbeschikbaarheid. Bovendien zijn veel bodemeigenschappen inherent en niet of zeer moeilijk aanpasbaar (Kirkby & Johnston, 2008).

Door het belang van de bemestingsgeschiedenis is het niet mogelijk om Vlaanderen op te delen volgens fosforbeschikbaarheid louter op basis van bodemeigenschappen (bijvoorbeeld textuurgegevens). Aangezien de bemestingsgeschiedenis in Vlaanderen ruimtelijk gespreid is, vertoont de fosfaattoestand in Vlaanderen ook een ruimtelijke spreiding. Gebieden met een concentratie van intensieve veeteelt hebben relatief meer percelen met een hoge fosfaattoestand (P-AL) (Overloop et al., 2011). De gemiddelde fosforbeschikbaarheid is het hoogst in de Vlaamse Zandstreek en het laagst in de Leemstreek (Tabel 4 en Tabel 5) (Maes et al., 2012). Maar aangezien de bemestingsgeschiedenis sterk kan verschillen van perceel tot perceel, is het niet mogelijk om uitspraken te doen over de fosforbeschikbaarheid van een perceel louter op basis van de ruimtelijke ligging of het algemene mestgebruik in de streek. Perceelsspecifieke metingen van de fosforbeschikbaarheid zijn daarvoor noodzakelijk. Dit wordt geïllustreerd door de grote variatie in P-AL binnen één bepaalde landbouwstreek (Tabel 4 en Tabel 5).

Tabel 4. Procentuele verdeling van het fosforgehalte van akkerbouwstalen in zeven bodemvruchtbaarheidsklassen in de verschillende landbouwstreken in 2008-2011, zoals gemeten door de Bodemkundige Dienst van België (Maes et al., 2012).

Klasse	P-AL (mg P/100 g)	Vlaamse Zandstreek	Kempen	Zandleem- streek	Leemstreek	Polders
Zeer laag	< 5	0,2	0,5	0,3	0,5	0,1
Laag	5 – 8	0,7	1,2	1,9	3,1	0,5
Tamelijk laag	9 – 11	1,5	2,3	3,7	6,8	0,8
Streefzone	12 – 18	8,5	13,6	19,3	36,7	11,1
Tamelijk hoog	19 – 30	30,0	44,8	36,1	43,1	42,6
Hoog	31 – 50	44,5	33,4	30,1	9,0	37,6
Zeer hoog	> 50	14,6	4,2	8,6	0,8	7,3

Tabel 5. Procentuele verdeling van het fosforgehalte van weilandstalen in zeven bodemvruchtbaarheidsklassen in de verschillende landbouwstreken in 2008-2011, zoals gemeten door de Bodemkundige Dienst van België (Maes et al., 2012).

Klasse	P-AL (mg P/100 g)	Vlaamse Zandstreek	Kempen	Zandleem- streek	Leemstreek	Polders
Zeer laag	< 8	1,0	1,5	5,6	6,4	0,8
Laag	8 – 13	4,0	7,4	12,8	17,8	5,7
Tamelijk laag	14 – 18	7,4	12,8	16,6	21,0	9,9
Streefzone	19 – 25	18,1	24,3	20,9	25,9	17,4
Tamelijk hoog	26 – 40	37,4	38,6	30,1	24,6	37,3
Hoog	41 – 60	26,3	13,5	11,2	4,0	22,7
Zeer hoog	> 60	5,8	1,9	2,8	0,3	6,2

5.2 Effect van bemesting op de plantbeschikbare fosfor

De plantbeschikbare fractie kan vergroot worden door een bodem te bemesten met fosfor. De toegediende fosfor is echter niet allemaal beschikbaar voor het gewas aangezien een deel van deze toegediende P vastgelegd wordt in de bodem door sorptie en/of precipitatie (Hedley et al., 1982). Deze vastlegging kan enige tijd in beslag nemen.

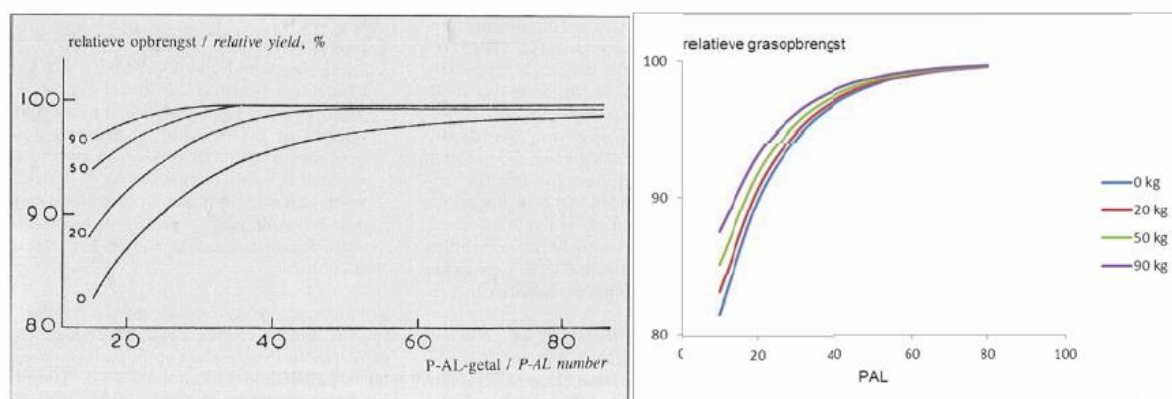
De P-buffercapaciteit van de bodem (zie 1.2 en 3.4) bepaalt de mate waarin de recent toegevoegde P direct opneembaar blijft voor de plant, of (gedeeltelijk) vastgelegd wordt in de bodem door sorptie en/of precipitatie (Sharpley & Rekolainen, 1997). Bodems in Hongarije met hogere buffercapaciteit (= lage fosforverzadiging, afgeleid uit de kleinere verhouding van beschikbare P over totale P) vertoonden meer fixatie van recent toegepaste P dan bodems met een lagere buffercapaciteit (Sisák et al., 2002). Ook in 13 Italiaanse bodems werd meer van de toegediende P-bemesting in de plantbeschikbare fosforfractie teruggevonden indien de sorptiecapaciteit van de bodem lager was (Indiati & Sharpley, 1997). In 5 Zweedse bodems nam de fosforbeschikbaarheid (P-AL) na bemesten het minst toe in de bodems met grote ijzer- en aluminiumgehaltes (Djodjic & Mattsson, 2013). De buffercapaciteit hangt ook af van de bemestingsgeschiedenis. Bodems waaraan in het verleden reeds veel fosfor is toegevoegd, hebben een lagere buffercapaciteit. Recent toegevoegde fosfor zal daardoor in deze bodems ook beter beschikbaar blijven dan in bodems waar door beperkte bemesting nog veel vastleggingscapaciteit voorhanden is (Sisák et al., 2002; Simpson et al., 2011). In sterk fosforverzadigde bodems wordt bijgevolg een zeer beperkte buffercapaciteit verwacht.

Bij een toename van totaal P met 9 kg P/ha/jr door 24 jaar toepassing van superfosfaat op Australische percelen nam de beschikbare fosforhoeveelheid (gemeten met resin, sinkmethode) maar met 1,7 kg P/ha/jr toe (Bünemann et al., 2006). Op onbeteelde Nederlandse percelen werd anderhalve maand na toevoeging van 200 kg P₂O₅/ha aan de bovenste 15 cm een P-AL-verhoging van 2 mg P₂O₅/100 g (~1 mg P/100 g, Vlaamse eenheden) waargenomen (de Ruijter et al., 2009). Dit betekent dat na anderhalve maand slechts ongeveer een vierde tot een vijfde van de toegediende fosfor terug te vinden was in de P-AL-fractie. Het P-AL-getal van de bemeste percelen bleef gedurende het groeiseizoen groter dan het P-AL-getal van de onbemeste percelen, maar het verschil werd kleiner in de tijd, wat het belang van het tijdseffect illustreert. In andere Nederlandse bemestingsproeven werd gedurende 7 jaar een bemestingsoverschot van 100 kg P₂O₅/ha op akkerland gerealiseerd (Ehlert et al., 2008). Indien dit volledige overschot in de P-AL fractie aanwezig zou

blijven, zou een toename van het P-AL van 17-20 mg $P_2O_5/100$ g geobserveerd moeten worden, terwijl deze gemiddeld maar 1,6 mg $P_2O_5/100$ g was. Hierbij moet wel de kanttekening gemaakt worden dat fosfor, dat niet teruggevonden wordt in de P-AL-fractie, mogelijk wel beschikbaar is of kan worden voor de plant (zie 2.1.2). De methode voor fosforbeschikbaarheidsbepaling bepaalt sterk hoeveel van de toegediende P in de beschikbare fractie gemeten wordt. Methodes die de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid meten (mildere extracties) zullen daarom een kleiner percentage van de toegediende P terugvinden in de gemeten fosforbeschikbaarheid dan methodes die eerder de fosforcapaciteit meten (Hedley et al., 1982; Indiaty & Sharpley, 1997; Krey et al., 2013). Van het cumulatieve fosfaatoverschot in de bodem werd in 4 Nederlandse langdurige veldproeven 6-14% teruggevonden in een stijging van het Pw-getal en 48-63% in een stijging van het P-AL-getal (Ehlert et al., 2003). Dit gehalte daalde met de grootte van het overschot en in de tijd, en was locatieafhankelijk.

5.3 Effect van recente bemesting versus bemestingsgeschiedenis

Fosforbemesting voor een goede gewasopbrengst is vooral van belang bij een lage fosforbeschikbaarheid. Hoe hoger de fosforbeschikbaarheid, hoe minder fosforbemesting bijdraagt tot een toename in de gewasopbrengst (Figuur 5).



Figuur 5. Het effect van fosfaatbemesting (verschillende lijnen, uitgedrukt in kg P_2O_5/ha en P-toestand (P-AL, in mg $P_2O_5/100$ g, delen door 2,29 voor Vlaamse eenheden) op de relatieve grasopbrengst op basis van recent (rechts) en ouder (links) onderzoek (Bussink et al., 2011b).

De fosfaattoestand van de bodem is belangrijker dan de fosfaatbemesting voor het opbrengstniveau van het gewas (Ehlert et al., 2014a). Met een hoge bemesting en een lage P-toestand is het niet mogelijk om dezelfde opbrengst te realiseren als bij een lage bemesting en een hoge P-toestand (Johnston, 2000; Dekker & Postma, 2008; Bussink et al., 2011b). Met andere woorden: de bemestingsgeschiedenis (die de P-toestand creëert) is belangrijker dan de recente bemesting voor de fosforbeschikbaarheid. Reeds voor verschillende gewassen werd in onze streken vastgesteld dat de bemesting geen of slechts een gering effect had op de opbrengst, terwijl de P-toestand de opbrengst wel significant kan doen toenemen: voor maïs (van der Stok, 2010; van Middelkoop & van Schooten, 2010; Ehlert et al., 2014a), voor groenten (van Wijk et al., 2002; Sleurink, 2010), voor aardappel (Dekker & Postma, 2008; Ehlert et al., 2014a), voor akkerbouwgewassen (doperwt, zomergewas, zaaiui, aardappel, suikerbiet en wintertarwe) (Ehlert et al., 2008) en voor gras (Bussink et al., 2011b). Voor deze laatste wordt dit geïllustreerd in Figuur 5 (rechterdeel). Eerdere experimenten (1995) geven aan dat de respons op bemesting vroeger groter was (linkerdeel Figuur 5), mogelijkwerwijs is de

fosfaatrespons momenteel afgezwakt door de jarenlange toevoeging van P-overschotten. Voor sommige kortlopende gewassen (andijvie en andere chicoriumtypes, selder, knolvenkel, prei, ui en courgette) kan een startfosforbemesting wellicht wel nog significant bijdragen aan een betere groei (Verhaeghe, 2014b). Maar ook bij deze groenten bepaalt het bodemfosforgehalte (vooral P-CaCl₂) of bemesting al dan niet een effect heeft.

De reden voor het grotere belang van de P-toestand dan van de recente P-bemesting voor de opbrengst, is het feit dat maar een klein deel van de toegediende P-bemesting in het eerste jaar opgenomen wordt door het gewas. Gemeten percentages in het eerste jaar opgenomen P van de toegediende P-bemesting variëren tussen 10-20% (Dekker & Postma, 2008), minder dan 25% en eerder 5-10% (Morgan, 1997), 7-28% (Gallet et al., 2003b) en 5-10% (Haygarth & Jarvis, 1999). De P die in het eerste jaar niet werd opgenomen, kan echter in de daaropvolgende jaren nog bijdragen tot de P-opname van het gewas (Morgan, 1997; Gallet et al., 2003b). De niet-opgenomen P maakt dan deel uit van de 'P-toestand' van de bodem, en de plantopname van P uit deze pool is veel groter dan uit de recente P-bemesting. Het uiteindelijke rendement van fosforbemesting benadert over vele jaren heen dus 100%. Het grotere belang van de bodem-P-toestand dan de recente P-bemesting voor de P-opname door het gewas kan ook verduidelijkt worden met volgende getallen: in de bouwvoor is zo'n 5000 tot 10000 kg P₂O₅/ha totaal fosfaat aanwezig (Dekker & Postma, 2008), waarvan zich zo'n 10-30% in de P-AL-fractie bevindt, terwijl de toegediende fosfaatbemesting maar ongeveer 1% uitmaakt van de totale fosfaathoeveelheid. Het is bijgevolg vooral van belang om over een goede P-toestand van de bodem te beschikken, en deze kan verkregen worden door gedurende meerdere jaren voldoende (maar niet overmatig) te bemesten. Eenmaal de P-toestand voldoende is, moet deze enkel onderhouden worden met een evenwichtsbemesting.

5.4 Bodemeigenschappen bepalen effect van bemesting op fosforbeschikbaarheid

In hoofdstuk 3 werd ingegaan op de bodemeigenschappen die de fosforbeschikbaarheid beïnvloeden: ijzer- en aluminiumgehalte, textuur, structuur, pH, organische stof, vochtgehalte, temperatuur, stikstof- en siliciumconcentratie. Deze bodemeigenschappen zullen op eenzelfde manier ook de fosforbeschikbaarheid van de recent toegevoegde fosfor (=bemesting) beïnvloeden. Voor al deze effecten wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

Speciale aandacht wordt nog eens gevestigd op de fosforbuffercapaciteit van de bodem. Bodems met een hoge buffercapaciteit (bijvoorbeeld door veel sorptieplaatsen op ijzer- en aluminiumoxides) leggen een groot deel van de door bemesting toegevoegde fosfor vast in de bodem, zodat de fosforbeschikbaarheid maar zeer beperkt toeneemt (Schoumans *et al.*, 2004b; Djodjic & Mattsson, 2013). De buffercapaciteit hangt ook af van de bemestingsgeschiedenis. Bodems waaraan in het verleden reeds veel fosfor is toegevoegd, hebben een lagere buffercapaciteit. Recent toegevoegde fosfor zal daardoor in deze bodems ook beter beschikbaar blijven dan in bodems waar door beperkte bemesting nog veel vastleggingscapaciteit voorhanden is (Sisák et al., 2002; Simpson et al., 2011). Een verhoging van de reeds hoge fosforbeschikbaarheid zal echter wellicht geen effect hebben op de gewasopbrengst (zie hoofdstuk 7).

5.5 Effecten van bemestingsstrategie op de fosforbeschikbaarheid

5.5.1 Tijdsaspect

Aan de bodem toegediend fosfaat wordt in de loop van de tijd minder snel beschikbaar voor de plant door vastlegging op de vaste bodemfase (van der Zee et al., 1990). Een daling van de fosforbeschikbaarheid in de tijd na bemesting werd in verschillende experimenten waargenomen (Haygarth & Jarvis, 1999; Karpinets et al., 2004; de Ruijter et al., 2009; Lee et al., 2012; Shuai et al., 2014). Dit wijst op het belang van een beperkte tijdsduur tussen de fosfaatbemesting en het opnamemoment door de plant indien de hoeveelheid bodemfosfor ontoereikend is voor een goede gewasopbrengst (Dekker & Postma, 2008). Toch dient opgemerkt dat een daling van het bodemfosforgehalte niet per se een vermindering van de fosforbeschikbare fractie voor het gewas inhoudt, dit hangt af van de geschiktheid van de gekozen bodemfosformeetmethode (Karpinets et al., 2004).

5.5.2 Effect van plaatsing van bemesting

5.5.2.1 Algemeen

Fosfaat is bijzonder immobiel in de bodem, zeker in vergelijking met stikstof. Daardoor is het van belang dat fosfaat zich dicht bij de plantenwortels bevindt. Een heterogene fosfortoestand van het perceel is dus niet efficiënt, tenzij deze specifiek gecreëerd is in functie van de gewasplaatsing (zie verder). Een heterogene fosfortoestand kan het resultaat zijn van beweiding. Bij beweiding wordt slechts 3,4-4,7% van het oppervlak bemest. Deze plaatsen krijgen dan bijzonder hoge fosfaatdosissen (700-1000 kg P_2O_5 /ha) (van Middelkoop et al., 2004). Het effect van de heterogeniteit in fosfortoestand kan verholpen worden door een *in situ* meting van de fosfortoestand in het veld met behulp van *NIRS*-technologie, waarna meteen de bemestingshoeveelheid kan aangepast worden aan de specifieke locatie (Maleki et al., 2008). Toepassing van deze technologie toonde een hogere en minder variabele maïsoopbrengst aan terwijl de gemiddelde bemestingsdosis lager was dan bij constante vollevelsbemesting.

Plaatsing van fosforbemesting dichtbij het gewas in plaats van vollevelsbemesting (5.5.2.2) kan vooral een voordeel opleveren voor gewassen met een beperkt wortelstelsel zoals bijvoorbeeld groenten en gewassen tijdens de begingroei (startfosfor, 5.5.2.3). Plaatsing van bemesting kan in banden, rijen, ondiep of in het plantgat gebeuren (van Dijk et al., 2007b). Dit kan niet alleen met kunstmest, maar ook met dierlijke mest gebeuren (5.5.2.4). Alternatief kan fosfor ook geplaatst worden via coating van zaden (5.5.2.5) of bladbemesting (5.5.2.6).

5.5.2.2 Effect van plaatsbemesting

In meerdere studies werden voor verschillende gewassen (voornamelijk groenten) positieve effecten van plaatsing van fosforbemesting geobserveerd (van Dijk et al., 2007b; Smit et al., 2009). Er wordt in dergelijke studies echter vaak vergeleken tussen bemestingsplaatsing enerzijds en de afwezigheid van bemesting anderzijds, waardoor de meerwaarde van plaatsing ten opzichte van vollevelsbemesting niet altijd onderzocht wordt. Dit is ook zo in Vlaamse studies rond andijvie (Volckaert & Winnepeninckx, 2010; Gobin, 2012). In andere studies met andijvie leverde plantgatbemesting niet-significante hogere opbrengsten op ten opzichte van breedwerpige bemesting (Verhaeghe, 2014a). Ook andere studies die plaatsing met breedwerpige bemesting vergelijken, tonen niet altijd opbrengstverhoging aan maar wel vaak dat de bemestingsdosis door plaatsing drastisch kan gereduceerd worden (50-85%) voor eenzelfde

opbrengstniveau bij volleveldsbemesting. Dit houdt in dat bemestingsplaatsing veel efficiënter is dan volleveldsbemesting. Bemestingsplaatsing kan niet alleen een voordeel bieden voor de klassieke voorbeelden van maïs (startfosfor, zie 5.5.2.3) en groenten, maar ook voor aardappelen en uien (Ehlert & van den Akker, 2005; Hermans & Bries, 2008; de Ruijter et al., 2009; van Dijk et al., 2010; Drenth, 2011; van Dijk et al., 2011; Smit, 2012; Malda & Rutgers, 2012; Willemse, 2013; Pronk et al., 2013; Sorensen, 2013). Indien de kunstmest ammonium bevat, mag de bemesting niet te dicht bij de plant- of zaairij geplaatst worden om ammoniumtoxiciteit te vermijden (Sorensen, 2013).

5.5.2.3 Startfosfor bij maïs

Het effect van startfosfor in rijen bovenop de volleveldsbemesting met dierlijke mest is niet eenduidig op het niveau van eindopbrengst (Withers *et al.*, 2000). Startfosfor kan helpen om een minder goede begingroei en paarskleuring van maïs (Figuur 6) te voorkomen, maar deze minder goede start leidt niet altijd tot significante opbrengstderving (van Keulen et al., 2000; Smit et al., 2009). Door de relatief lange groeiduur van maïs kan een groeiachterstand door een tekort in de jeugdfase immers terug ingehaald worden (Withers *et al.*, 2000).

Het toepassen van startfosfor voor maïs heeft wisselend succes in verschillende veldproeven. Het toepassen van startfosfor in de rij (20-50 kg P_2O_5 /ha) bovenop een breedwerpige dierlijke bemesting gaf een significante meeropbrengst voor maïs voor slechts 4 van de 20 proefjaren op 9 verschillende Nederlandse locaties (van Middelkoop & van Schooten, 2010). In andere Nederlandse studies over twee jaar resulteerde de toepassing van startfosfor in de rij bovenop volleveldsbemesting in gemiddeld 0,43-0,99 ton/ha meer opbrengst op 82 verschillende percelen (Bussink *et al.*, 2011a) of in 8% hogere opbrengst op 5 locaties (Schröder et al., 1997). In Vlaanderen werd op een lichte leembodem met lage-gemiddelde fosfortoestand geen significante opbrengststijging geobserveerd indien 20 kg P_2O_5 /ha rijbemesting bovenop 170 kg N/ha runderdrijfmest werd toegediend (Hermans & Bries, 2008). Proeven in Engeland toonden geen of een beperkte opbrengstverhoging bij toepassen van startfosfor naast dierlijke bemesting, waardoor startfosfor een extreem lage efficiëntie vertoonde (Withers *et al.*, 2000). Elf jaar veldproeven op verschillende Waalse bodems toonden gemiddeld 5% hogere opbrengst indien DAP als startmeststof werd toegepast (Oost, 2015). Indien rijbemesting wordt gegeven zonder breedwerpige dierlijke bemesting, is de opbrengstverhoging ten opzichte van de afwezigheid van bemesting wel duidelijker (van Middelkoop & van Schooten, 2010; Bittman et al., 2012).

Of een toepassing van startfosfor zinvol is, hangt af van verschillende factoren. Bij een lage fosforbeschikbaarheid in de bodem kan deze bemesting zeker bijdragen aan de fosforvoorziening voor het gewas. Net als bij bemestingsplaatsing (van Dijk et al., 2007b) wordt het effect van startfosfor kleiner bij grotere fosforbeschikbaarheid (Schröder et al., 1997). Toch kan ook 'paarse maïs' waargenomen worden bij bodemfosforgehaltes die normaal gezien niet limiterend zijn voor gewasgroei. Vaak is hier sprake van een 'secundair fosforgebrek'. Bij dit fenomeen wordt een te lage fosforopname door het gewas niet veroorzaakt door een te laag bodemfosforgehalte maar door andere factoren zoals een te lage pH, koude, laag vochtgehalte of slechte bodemstructuur (zie Hoofdstuk 3). Maatregelen om deze factoren te verbeteren hebben vaak meer effect dan het toepassen van extra fosforbemesting (Oost, 2015).



Figuur 6. Paarskleuring bij maïs ten gevolge van (tijdelijk) fosforgebruik bij jonge maïsplantjes

5.5.2.4 Plaatsing met dierlijke mest

Bemestingsplaatsing kan niet alleen met kunstmest (of kunstmestvervangers), maar ook met dierlijke mest uitgevoerd worden (van Dijk et al., 2007b; van Schooten, 2010; Krebbers, 2010; Bittman et al., 2012). Plaatsen van dierlijke mest bij maïs kan het gebruik van startfosfor vervangen (Schröder et al., 1997). Bijkomend voordeel is dat zo ook N en K dicht bij de plant worden gebracht. Door de herziening van het Nederlandse bemestingsadvies voor maïs (van Dijk & van Geel, 2012) is het advies voor de volleleveldsbemesting met dierlijke mest gedaald en wordt het advies grotendeels voor rijbemesting gegeven (zie 6.3.1.2.2). Indien de rijbemesting met kunstmestfosfaat wordt gegeven, kan de voorziening van N en K in het gedrang komen. Vervanging van de rijbemesting met kunstmest door dierlijke mestplaatsing kan dit tekort opvangen (Bussink *et al.*, 2011a). In het advies wordt aangeraden om de drijfmest op een afstand van 8-10 cm van de zaadrij te injecteren. Indien het zaad in de drijfmest terechtkomt, kan een slechte opkomst het gevolg zijn. Met behulp van GPS is het mogelijk om de drijfmestinjectie en het zaaien apart uit te voeren. In een Canadese studie (Bittman et al., 2012) werd een toenemende respons van maïs op rijbemesting waargenomen bij kleinere afstand (5-10-15 cm) tussen de drijfmest en de plantrij.

Tijdens demoproeven uitgevoerd door LCV kwam naar boven dat rijbemesting met dierlijke mest geen meeropbrengst gaf ten opzichte van volleleveldsbemesting, het nitraatresidu vergelijkbaar is en er nog wat technische problemen zijn en opgelet moet worden voor structuurschade door het gewicht van de mestkar (Van de Ven *et al.*, 2014).

5.5.2.5 Coaten van zaden en pootgoed

Bemesting kan ook geplaatst worden door rechtstreeks de zaden of pootgoed te coaten met fosformeststof. Onderzoek in Nederland toonde echter aan dat coaten een lagere opbrengst van zaaiuien ten opzichte van volleveld- of plaatsingsbemesting gaf (Malda & Rutgers, 2012). In Vlaamse bodems met (vrij) hoge fosfortoestand zal coaten wellicht weinig effect hebben (van Middelkoop & van Schooten, 2010). Het kan voor maïs eventueel de startgift vervangen. Er wordt momenteel in Nederland onderzocht of dompelen of coaten van poot aardappelen met fosformeststoffen een effect heeft op de opbrengst (onderzoek van NMII).

In een eerste veldproef werd geen effect van coaten gevonden (Postma *et al.*, 2014). Ook voor gewone fosforbemesting werd geen effect van fosfor gevonden, wellicht omdat de fosforbeschikbaarheid in de bodem (P-AL = 21 mg P/100 g, klasse ‘tamelijk hoog’ volgens BDB) ruim voldoende is.

5.5.2.6 Bladvoeding

Fosforbemesting via het blad (door middel van sproeien) zou efficiënter zijn dan bemesting via de bodem (Mosali *et al.*, 2006; Noack *et al.*, 2010). Een groot deel van de fosfor die op het blad terechtkomt, wordt ook effectief opgenomen, terwijl dit voor de bodemfosfor maar 5-20% is in het eerste jaar (zie 5.3). Bladbemesting kan bodembemesting echter niet volledig vervangen door het gevaar voor bladverbranding en doordat, zeker in het beginstadium, het bladoppervlak te klein is om via deze weg de nodige fosfor op te nemen (Girma *et al.*, 2007). Zo zou er maar een tiental kg P_2O_5 /ha/jr toe te dienen zijn via bladvoeding (Mike McLaughlin van University of Adelaide, persoonlijke communicatie). Studies met granen en maïs in de drogere streken in Australië en de VS (Mosali *et al.*, 2006; Girma *et al.*, 2007; Noack *et al.*, 2010) toonden soms hogere gewasopbrengsten aan bij toepassing van bladbemesting, maar meestal werd geen respons waargenomen bij bodems met voldoende hoge fosfortoestand.

5.5.2.7 Belang van plaatsing in Vlaanderen

Er wordt soms waargenomen dat het effect van bemestingsplaatsing verdwijnt bij hogere fosfortoestand van de bodem (van Dijk *et al.*, 2007b; van Middelkoop & van Schooten, 2010). Ook het effect van startfosfor bij maïs is kleiner bij grotere fosforbeschikbaarheid (Schröder *et al.*, 1997). Dit lijkt logisch aangezien er ook bij vollelvdstoepassing geen fosforbemesting meer geadviseerd wordt bij hoge fosfortoestanden (zie hoofdstuk 6) en langetermijnexperimenten vaak geen opbrengstdalingen aantonen bij weglaten van fosforbemesting (zie hoofdstuk 7). Toename in opbrengsten door bemestingsplaatsing zal bijgevolg op het grootste deel van de Vlaamse bodems beperkt zijn, maar kan wel toenemen als de fosfortoestand in de toekomst gaat dalen. Aangezien de efficiëntie van bemestingsplaatsing wel hoger is, kunnen lokaal hogere dosissen worden toegediend of algemeen lagere dosissen worden toegepast in vergelijking met vollelvdsbemesting.

5.6 Belang van type fosforbemesting

5.6.1 Fosforkunstmest

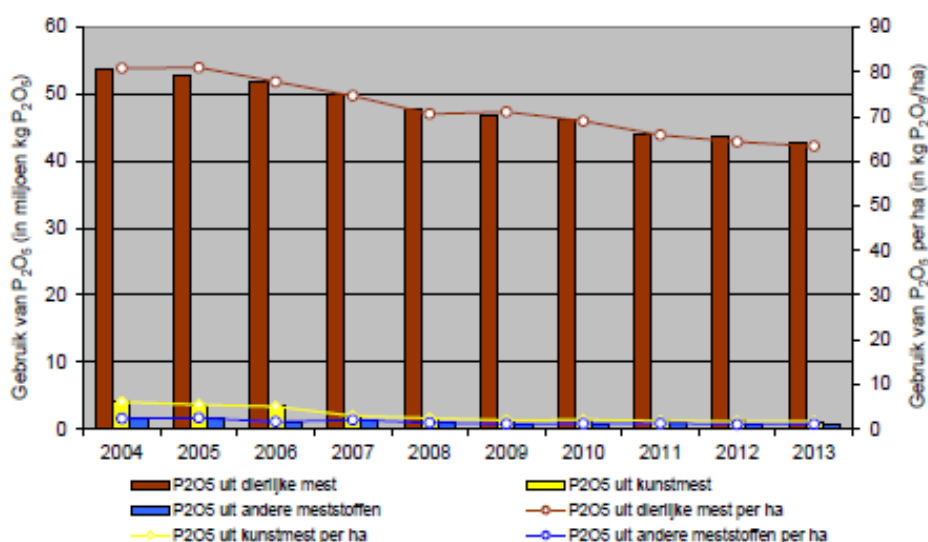
Fosforkunstmest kan als korrel of als vloeistof worden toegediend (Dekker & Postma, 2008). Vloeibare meststoffen kunnen bij extreme droogte eventueel een meerwaarde bieden ten opzichte van korrelmeststoffen. Bij deze laatste bepaalt de korrelgrootte de heterogeniteit van de verdeling en de oplosbaarheid. Fosforkunstmest is over het algemeen goed oplosbaar en zal bij testen van andere vormen van fosforbemesting (zie 5.6.2 en 5.6.3) vaak als vergelijkingsmaatstaf gebruikt worden. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat ook kunstmestfosfor niet allemaal meteen opgenomen wordt door de plant (zie 5.3): slechts 5-20% van de toegediende fosfor wordt in het eerste jaar opgenomen.

Van de totale fosforbemesting op Vlaamse bodems maakt fosforkunstmest maar een klein deel uit (Figuur 7). Volgens de cijfers van de mestbankaangifte schommelde het gebruik van fosforkunstmest in 2009-2013 tussen 1,2 en 1,4 miljoen kg P_2O_5 /jr, dit komt overeen met 2,0 kg P_2O_5 /ha/jr oftewel 3% van het totale fosfaatgebruik (Vlaamse Landmaatschappij, 2010; Vlaamse Landmaatschappij, 2012a; Vlaamse Landmaatschappij, 2012b; Vlaamse Landmaatschappij, 2014; Vlaamse Landmaatschappij, 2015). Het gebruik

was in 2009 het hoogst voor Vlaams-Brabant (3,2 kg P_2O_5 /ha/jr) en het laagst voor West-Vlaanderen (0,8 kg P_2O_5 /ha/jr). Volgens een steekproef bij 720 LMN-bedrijven zou het gebruik van fosforkunstmest echter een pak hoger liggen: 4,4 miljoen kg P_2O_5 /jr oftewel 7 kg P_2O_5 /ha/jr (Lenders et al., 2011) in 2009, het landbouwrapport 2014 spreekt van 4,6 miljoen kg P_2O_5 in 2012 (Platteau *et al.*, 2014). Echter, zelfs bij deze cijfers is het gebruik van kunstmestfosfaat nog steeds beperkt (10%) in vergelijking met het gebruik van dierlijke fosforbemesting (Figuur 7). Het fosforkunstmestgebruik daalde volgens het Landbouwrapport 2014 tussen 2005 en 2012 met meer dan 50%, wat vooral te verklaren valt door de evoluties in de prijs van fosforkunstmest (Figuur 8) en het Mestactieplan.

Voor de tuinbouwsector maakt gebruik van fosfor uit kunstmest boven dierlijke mest (Platteau *et al.*, 2014). De daling in fosforkunstmestgebruik in 2005-2012 is het minst groot voor de serreteelten waardoor hun aandeel stijgt van 12% naar 16% (Figuur 8). Voedermaïs neemt ongeveer 20% in van het totale fosforkunstmestgebruik. Gewassen met de hoogste fosforkunstmesttoedieningen zijn cichorei (20 kg P_2O_5 /ha/jr), laagstamfruit, bewaaraardappelen, bieten en maïs (Lenders et al., 2011).

Terwijl in dierlijke mest altijd de totale fosforinhoud bepaald wordt (en gebruikt voor bijvoorbeeld de mestbankaangifte, zie 5.6.3.1.1), wordt voor kunstmest altijd met het extraheerbaar fosforgehalte gewerkt. Het gebruikte extractiemiddel is afhankelijk van het type meststof en kan zijn: water, alkalisch ammoniumcitraat (volgens Joulie of volgens Petermann), neutraal ammoniumcitraat, 2% citroenzuur, 2% mierenzuur of minerale zuren (Anon., 2013b). Mogelijk wordt met deze extractiemiddelen niet alle fosfor geëxtraheerd waardoor het vermelde fosforgehalte lager kan liggen dan het totale fosforgehalte. Doordat in Vlaanderen weinig kunstmestfosfor wordt gebruikt heeft dit wellicht een beperkte impact op de totale hoeveelheid fosfor die op de bodem wordt gebracht, maar in andere landen of in het verleden wordt/werd zo mogelijk meer fosfor bemest dan aangenomen.

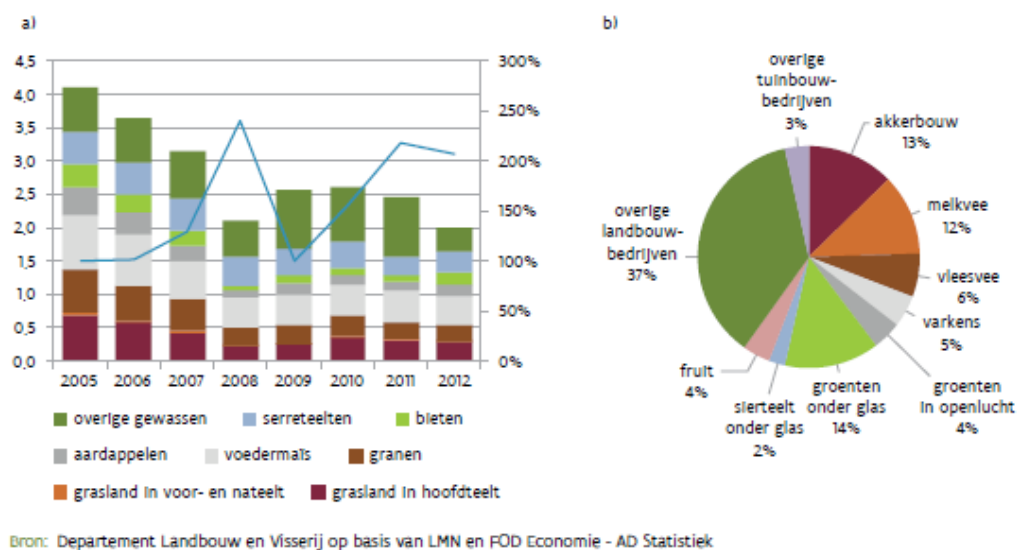


Figuur 7. Evolutie van het gebruik van fosforbemesting (dierlijk mest, andere meststoffen en kunstmest) in Vlaanderen sinds 2004 (Vlaamse Landmaatschappij, 2015)

Struviet ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) kan uit de dunne fractie van dierlijke mest neergeslagen worden, waardoor fosfor gerecycleerd kan worden (zie deel 3 van deze rapportreeks, Amery & Vandecasteele (2015b)). Struviet kan als meststof gebruikt worden. Recyclage van fosfor kan nog sterk toenemen aangezien fosfor ook uit

menselijke urine en afvalwaterslib kan gehaald worden (Oberson et al., 2013). In Nederland is het gebruik van drie types van gerecycleerde P (struviet, magnesiumfosfaat en dicalciumfosfaat) als kunstmest toegestaan. Ook indien de bron van struviet landbouwkundig afvalwater betreft, mag struviet als kunstmest beschouwd worden.

Ook assen van kippenmest worden als fosfor- en kaliummeststof gerecycleerd, met een wat lagere eerstejaarsbeschikbaarheid in vergelijking met kunstmestfosfor (Bachmann & Eichler-Lobermann, 2010; Codling, 2013).



Figuur 8. Fosforkunstmestgebruik in de Vlaamse landbouw; a) in miljoen kg P per gewasgroep en kunstmestprijs van enkelvoudig fosfaat (2005 = 100%), 2005-2012; b) per deelsector, %, 2012 (Platteau et al., 2014)

5.6.2 Slakkenmeel

Vroeger werd soms slakkenmeel als fosfaatmeststof op de Vlaamse landbouwbodems toegepast. Slakkenmeel is tot poeder gemalen slakken, een nevenproduct van de staalproductie (Thomas-procédé dat momenteel nog weinig wordt toegepast). Het bestaat vooral uit calcium-, silicium- en ijzeroxide en bevat variabele hoeveelheden fosfor (tot 20%). Naast het rechtstreeks toevoegen van fosfor aan de bodem kan slakkenmeel ook bijdragen aan de fosforbeschikbaarheid door de aanwezigheid van silicium (zie 3.9) (Russchen et al., 2011).

Over de plantbeschikbaarheid van fosfor in slakkenmeel ten opzichte van de plantbeschikbaarheid van fosforkunstmest zijn uiteenlopende resultaten te vinden in de literatuur. Deze variatie is wellicht deels te verklaren door de variatie in de aard, oorsprong en bijgevolg ook de samenstelling van het slakkenmeel. Zo lijkt het dat slakken met minder dan 1% P een veel kleiner effect hebben op de plantfosforopname in vergelijking met fosforkunstmest (Anderson et al., 1992; Yusiharni et al., 2007). In Vlaanderen zouden metaalslakken meer fosfaat bevatten (16-20%) (Roggen, 1949).

Door een minder goede oplosbaarheid van fosfor uit slakkenmeel dan uit kunstmest zou de beschikbaarheid van slakkenmeelfosfor kort na toepassing lager zijn dan van kunstmestfosfor (Van der Pauw, 1937;

MacNaeidhe, 2001; Römer, 2006). Bij tijdige toediening zou slakkenmeel even effectief zijn op kalkarme zandgrond als kunstmestfosfor (Ehlert et al., 2003). Bij langdurige toepassing van slakkenmeel verdwijnen de verschillen grotendeels zodat de gewasopbrengsten en fosforopname niet of nauwelijks verschillen bij bemesting met slakkenmeel of fosforkunstmest (Van der Pauw, 1937; MacNaeidhe, 2001; Spiegel et al., 2001). De gemeten beschikbaarheid na jarenlange toepassing kan echter wel lager lijken voor slakkenmeel (Spiegel et al., 2001; Ehlert et al., 2008), maar dit kan eventueel ook verklaard worden vanuit de gebruikte specifieke chemische beschikbaarheidsmethode die de plantbeschikbaarheid niet altijd even goed weerspiegelt (zie 2.1.2).

5.6.3 Organische en dierlijke fosforbemesting

Het grootste deel van de fosforbemesting in Vlaanderen gebeurt onder de vorm van organische bemesting (zie Figuur 7).

5.6.3.1 *Samenstelling dierlijke en andere organische mest*

5.6.3.1.1 Totale samenstelling

Bij analyse van dierlijke mest wordt over het algemeen de totale fosforinhoud gemeten. Dit gebeurt na destructie van het meststaal of zijn asrest met zwavel- en/of salpeterzuur (Coppens et al. (2009), BAM-compendium voor Vlaanderen). De nieuwste ontwikkelingen zijn sensoren met Near Infra Red-technologie die de mestsamenstelling in of aan de uitgang van de drijfmesttank kunnen meten. Daardoor zou zeer nauwkeurig met gekende dosissen bemest kunnen worden.

Uit Tabel 6 blijkt dat rundermest minder fosfor bevat dan varkensmest. De N/P-verhouding van rundermest is groter dan bij varkensmest. Indien dierlijke mest wordt toegediend op basis van de N-behoefte van het gewas, wordt met varkensmest dus meer fosfaat opgebracht dan met rundermest. Kippenmest bevat het meest fosfor. De N/P-verhouding van dierlijke mest varieert tussen 2 en 8 (Tabel 6), terwijl de N/P-behoefte van planten varieert tussen 7 en 11. Bijgevolg resulteert bemesting op basis van N-behoefte in een fosforoverschot in de bodem, wat de hoge bodemfosfortoestand in Vlaanderen kan verklaren (De Bolle, 2013).

De dikke, vaste fractie van gescheiden drijfmest heeft een hoog gehalte aan fosfor en organische stof, het effluent (dunne fractie) van gescheiden drijfmest heeft een laag fosforgehalte. Voor varkensdrijfmest komt 70-95% van de fosfor terecht in de dikke fractie en 5-30% in de dunne fractie (Schoumans et al., 2010).

5.6.3.1.2 Organische en anorganische fosforfracties

In organische meststoffen is het grootste deel van de fosfor aanwezig onder een anorganische vorm (Gagnon et al., 2012). Zestig tot 95% van de fosfor komt in anorganische mineralen voor als struviet ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), magnesium- en calciumfosfaten. In stalrest en compost komen ook de minder oplosbare apatietmineralen voor (van Dam & Ehlert, 2008). De overige 5-40% van de fosfor in organische bemesting betreft organische fosfor, waarvan het grootste deel gemakkelijk mineraliseerbaar is (Dekker & Postma, 2008). Indien dierlijke mest gedurende enkele maanden bewaard wordt, vergroot de anorganische fosforfractie door microbiële degradatie van organische fosforcomponenten (Haygarth & Jarvis, 1999).

Tabel 6. Gemiddelde samenstelling van organische meststoffen op basis van BDB-ontledingen in Vlaanderen tot 2007 (Coppens et al., 2009), richtwaarden van de Mestbank Vlaanderen (Anon., 2014) en Vlaco-analyses (Anon., 2012c)

Mesttype	P ₂ O ₅		N		N/P	
	Ontleding	Richtw	Ontleding	Richtw	Ontleding	Richtw
<i>Drijfmest (in kg/1000 l)</i>						
Runderen	1,5	1,4	5,2	4,8	7,9	7,9
Kalveren	1,5	1,3	2,8	3,0	4,3	5,3
Mestvarkens	4,2	5,0	8,6	8,1	4,7	3,7
Mestvarkens laag fosforvoer	-	4,5	-	8,1	-	4,1
Mestvarkens brijbakken	4,5	4,9	9,9	9,2	5,0	4,3
Zeugen	3,2	2,9	5,0	4,4	3,6	3,5
Biggen	3,3	4,0	6,1	6,7	4,2	3,8
<i>Vaste mest (in kg/1000 kg)</i>						
Runderen	4,0	2,9	8,5	7,1	4,9	5,6
Varkens	9,2	9,0	10,7	7,5	2,7	1,9
Slachtkuikens	17,2	14,1	29,5	27,1	3,9	4,4
Leghennen	21,7	14,3-28,5	26,2	22,7-26,9	2,8	2,5-3,6
<i>Compost (in kg/1000 kg)</i>						
Gft-compost	7		12		3,9	
Groencompost	2,8		7		5,7	

5.6.3.2 Werkzaamheid van organische en dierlijke fosforbemesting

De extraheerbaarheid van fosfor is lager voor organische meststoffen dan voor kunstmest (Ehlert et al., 2004; Schröder et al., 2010). De werking van fosfor uit organische meststoffen is dan ook wat lager dan voor kunstmest indien enkel het eerste jaar van toepassing wordt beschouwd. De eerstejaarswerking van stalmest en compost is gemiddeld respectievelijk 80% en 60% van die van kunstmest (van Dam & Ehlert, 2008). Verschillende mestverwerkingsproducten hebben een eerstejaarswerking gelijkaardig aan die van kunstmest (Achat et al., 2014), door compostering of verbranding kan de fosfor wel trager vrijgesteld worden (Christel et al., 2014). De fosfaatwerking van organische meststoffen bij éénjarige toepassing wordt in Vlaanderen en Nederland tussen 40 en 100% ingeschat, met de grootste beschikbaarheid voor varkensmest (Tabel 7). De lagere fosforbeschikbaarheid in compost is wellicht te verklaren doordat fosfor in compost vaak voorkomt in apatietmineralen (zie 5.6.3.1.2) die minder oplosbaar zijn dan de fosformineralen die aanwezig zijn in drijfmest (Rietra et al., 2009). De beperkte beschikbaarheid van fosfor in organische meststoffen in het eerste jaar van toepassing is vooral belangrijk voor gewassen geteeld op bodems met een lage fosfortoestand (Anon., 2010b), omdat in dit geval de gewassen wel reageren op fosforbemesting (zie 5.2).

Op middellange en lange termijn is de fosforwerking van organische meststoffen echter dezelfde als van kunstmest (Smith & van Dijk, 1987; Smith et al., 1998). Veldproeven waar jarenlang fosfor ofwel via kunstmest of via organische mest werd toegevoegd, tonen over het algemeen geen verschil in fosforbeschikbaarheid

(extraheerbaarheid) (Zhang et al., 2013), in fosforopname door het gewas (Ehlert et al., 2004) en in opbrengst (Krey et al., 2013). Algemeen wordt dan ook een werkzaamheid van 100% aangenomen voor langdurig gebruik (Bomans et al., 2005; van Dijk & van Geel, 2012). In een literatuurstudie werden wel lagere werkingscoëfficiënten en werkingsfactoren gevonden: gemiddeld 90% voor stalmest en 70% voor compost (van Dam & Ehlert, 2008). Andere studies tonen dan weer een grotere beschikbaarheid voor fosfor in bodem toegediend via stalmest dan via kunstmest (Haygarth & Jarvis, 1999; Johnston, 2000; Renneson *et al.*, 2013b), wat eventueel ook kan wijzen op een groter risico op fosforverliezen bij bemesting met stalmest (zie deel 2 van deze rapportenreeks, Amery & Vandecasteele (2015a)).

Tabel 7. Aangenomen fosfaatwerking van organische meststoffen bij éénjarige toepassing in Vlaanderen en Nederland (Bomans et al., 2005; van Dijk & van Geel, 2012)

Type organische meststof	Fosfaatwerking eerste jaar (% ten opzichte van kunstmest)	
	Vlaanderen	Nederland
Runderdrijfmest	70	60
Varkendrijfmest	90	100
Kippenmest	70	70
Varkensstalmest	60	100
Runderstalmest	60	60
Compost	-	60-80
Zuiveringsslib	-	40-100

Aangezien het deel van de fosforbemesting dat als niet-beschikbaar wordt beschouwd in het eerste jaar wel beschikbaar wordt in de volgende jaren, wordt de beschikbaarheid van dierlijke mest in de wetgeving vaak als 100% aangenomen. In Ierland en Vlaanderen is echter voor de bodems met een lage fosforstatus een wettelijke fosforbeschikbaarheid van 50% in organische meststoffen vastgelegd (voor Vlaanderen beperkt tot compost en stalmest). Deze reglementering is sinds 2014 in Ierland toegepast vanuit de filosofie dat gewassen geteeld op bodems met een lage fosfortoestand wél duidelijk reageren op fosforbemesting en het dus belangrijk is om de eerstejaarsbeschikbaarheid van dierlijke mest in rekening te brengen bij het berekenen van de benodigde fosforbemesting (Anon., 2010b; Shortle *et al.*, 2013). In Vlaanderen is de motivatie voor deze maatregel eerder het vergroten van de mogelijkheid om het organisch stofgehalte in de bodem te verhogen of op peil te houden. In realiteit kan door deze regel de totale toegestane fosfordosis verdubbeld worden. Vanuit wetenschappelijk standpunt bekeken is de beschikbaarheid van P in organische meststoffen ook voor bodems met lage fosfortoestand 100% op lange termijn.

5.6.3.3 Voordelen van organische fosforbemesting ten opzichte van fosforkunstmest

Het gebruik van organische bemesting in plaats van fosforkunstmest kan resulteren in hogere bodem-pH en meer fosfatase-activiteit in de bodem waardoor de fosforbeschikbaarheid verhoogt (Krey et al., 2013). Het grootste voordeel van organische bemesting is echter het inbrengen van organische stof in de bodem. Vooral bij gebruik van meststoffen met een hoog gehalte aan effectieve organische stof zoals stalmest en compost kan het koolstofgehalte in de bodem op peil gehouden of verhoogd worden. Een voldoende hoog koolstofgehalte is positief voor de watervoorziening in drogere periodes, de bodemvruchtbaarheid en voor erosiebescherming (van Dijk et al., 2007a). Dit laatste voordeel is extra belangrijk voor fosfor aangezien

erosie een belangrijke fosforverliespost is (zie deel 2 van deze rapportenreeks, Amery & Vandecasteele (2015a)).

Als koolstof wordt toegevoegd aan een bodem, wordt automatisch ook fosfor toegevoegd. Als dierlijke mest wordt gescheiden, zitten fosfor en koolstof in dezelfde dikke fractie. Indien fosfaatbemesting wordt beperkt (zoals in MAP 5 en in de Nederlandse mestwetgeving) wordt dus ook de toevoeging van organische stof beperkt. Bijgevolg ontstaat de vrees dat verlaagde fosfaatsnormen zullen resulteren in dalende bodemkoolstofgehaltenes.

Uit modelberekeningen blijkt dat de verlaging van de fosfaatgebruiksnorm naar 60 kg P₂O₅/ha/jr in Nederland nauwelijks effect heeft op het organische stofgehalte in de bodem, ook niet op langere termijn (van Dijk et al., 2007b). Hierbij wordt wel uitgegaan van een grote aanvoer van effectieve organische stof door wortels en gewasresten. Om de bodem op een constant koolstofniveau te houden is in sommige gevallen bovendien het toepassen van rundermest vereist (bevat minder fosfor, zie Tabel 6), maar deze is niet overal beschikbaar. Er werd geschat dat in Nederland maximaal 10% minder organische stof wordt aangebracht door de aanscherping van de normen (Rietra et al., 2009). Ook in recente rapporten worden geen grootschalige negatieve effecten op akkerland verwacht (Schils et al., 2012).

Tabel 8. Evolutie van het koolstofgehalte (%C) na 30 jaar toepassen van een akkerbouwrotatie of een groentenrotatie met verschillende types mest op verschillende bodems, gemodelleerd met de Demetertool. De hoeveelheid mest is de maximaal toedienbare mest volgens MAP 5 (klasse III bodem) en rekening houdend met de gemiddelde mestsamenstelling (Anon., 2014).

Rotatie	Type mest	Zandleem 1,4%C	Zand 2,2%C	Zand 1,6%C
Aardappel-wintertarwe-gras-maïs-suikerbieten	Vleesvarkensdrijfmest ¹	+ 0,15	- 0,1%	=
	Runderdrijfmest ²	+ 0,3%	=	+ 0,1%
	Runderstalmest ³	+ 0,5%	+0,15%	+ 0,3%
Japanse haver – bloemkool – aardappel – phacelia – prei – stamslaboon	Vleesvarkensdrijfmest ¹	- 0,05%	- 0,3%	-0,15%
	Runderdrijfmest ²	+ 0,05%	- 0,2%	-0,1%
	Runderstalmest ³	+ 0,2%	- 0,1%	+ 0,1%

¹Vleesvarkensdrijfmest: 14 ton/ha voor aardappel, tarwe en maïs (P is limiterend) en 11 ton/ha voor suikerbiet, groenten en andere gewassen (P is limiterend)

²Runderdrijfmest: 35 ton/ha voor alle gewassen (N is limiterend)

³Runderstalmest: 24 ton/ha voor aardappel, tarwe en maïs (N/P is limiterend) en 19 ton/ha voor suikerbiet, groenten en andere gewassen (P is limiterend)

Met de Demetertool (<https://eloket.vlm.be/Demeter/>) werd de evolutie van het koolstofgehalte gesimuleerd voor verschillende scenario's onder de Vlaamse mestwetgeving (Tabel 8). De Demetertool werd ontwikkeld door de dienst Bedrijfsadvies (VLM), vakgroep Bodembeheer (UGent) en het Nederlandse NMI binnen een Europees LIFE+ project. In deze tool werden twee rotaties getest: een vierjarige akkerbouwrotatie met achtereenvolgens aardappel, wintertarwe, Italiaans raaigras, korrelmaïs en suikerbieten, en een vierjarige groentenrotatie met Japanse haver, bloemkool, aardappelen, phacelia, prei en stamslaboon. In beide rotaties worden geen oogstresten afgevoerd. In beide rotaties werden drie scenario's met verschillende types mest (vleesvarkensdrijfmest, runderdrijfmest of runderstalmest) uitgevoerd. De hoeveelheid toegediende mest is de maximale dosis bepaald door MAP5 (klasse III bodem) en rekening houdend met de gemiddelde samenstelling van het type mest volgens de richtwaarden van de Mestbank (Anon., 2014). De dosis wordt soms door de fosfornorm (55 of 70 kg P₂O₅/ha) en soms door de dierlijke N norm (170 kg N/ha) bepaald

(meer details staan onderaan Tabel 8). Hierbij werd wel uitgegaan van een aftopping op perceelsnormen, terwijl in MAP5 een bedrijfsbenadering mogelijk is. De verschillende scenario's werden uitgevoerd voor 3 verschillende bodems. De eerste twee bodems, een zandleem- en een zandbodem, hebben een organisch koolstofgehalte dat midden in de streefzone voor akkerbodems gedefinieerd door de Bodemkundige Dienst van België ligt, namelijk 1,4% voor zandleem en 2,2% voor zand (Maes et al., 2012). Aangezien deze laatste streefwaarde voor zand (akkerbouw) wellicht wat hoog is (Bodemkundige Dienst van België & Universiteit Gent, 2009), werd dezelfde simulatie ook uitgevoerd voor een zandbodem met 1,6% koolstof (middenin een alternatieve streefzone voorgesteld door UGent).

Uit de simulaties met de Demetertool blijkt dat het voor de akkerbouwrotatie mogelijk is om het koolstofgehalte op peil te houden voor klasse III bodems (tamelijk hoog fosforgehalte) onder MAP5 (Tabel 8). Na 30 jaar is het koolstofgehalte enkel voor de zandbodem met 2,2% C en gebruik van varkensdrijfmest licht gedaald. Rundermest, en dan vooral runderstalmest, kan het koolstofgehalte beter op peil houden (en zelfs doen toenemen) in vergelijking met varkensmest. Voor varkensmest is het fosforgehalte limiterend en kan bijgevolg minder mest opgebracht worden dan op basis van 170 kg N/ha van dierlijke mest. Bij runderdrijfmest is stikstof over het algemeen limiterend (zie ook 5.6.3.1.1). De fosfornormen voor klasse III bodems kunnen volgens deze berekeningen wel een bedreiging vormen voor het koolstofgehalte bij groentenrotaties, zelfs indien de gewasresten niet afgevoerd worden (Tabel 8). Voor vleesvarkensdrijfmest daalt het koolstofgehalte van alle gesimuleerde bodems, bij rundermest hangt het af van de beschouwde bodem.

Ten slotte werd dezelfde simulatie herhaald voor de normen voor klasse IV bodems (hoog fosforgehalte). Deze hebben lagere fosfornormen dan klasse III bodems (45 of 50 kg P_2O_5 /ha, afhankelijk van het gewas). De verschillen in evolutie van het koolstofgehalte zijn echter klein tussen klasse III en IV bodems. Enkel voor runderstalmest wordt bij klasse IV zo'n 0,05-0,1% lager koolstofgehalte na 30 jaar in vergelijking met klasse III voorspeld. Het effect van de rotatie (en management zoals het verwijderen van oogstresten) op de koolstofevolutie blijkt doorslaggevender dan het effect van de fosfornormen voor deze simulatie.

5.6.3.4 Compost

De totale fosforinhoud is groter voor gft-compost dan voor groencompost (Tabel 6) (Anon., 2012c). Gft-compost bevat ook meer fosfor dan de meeste dierlijke mest. De langetermijns-werkingscoëfficiënt van compost zou 70-100% bedragen (zie 5.6.3.2).

In de Vlaamse en Nederlandse wetgeving wordt slechts 50% van de fosfor van compost die op een perceel wordt gebruikt, als opgebracht beschouwd (Anon., 2011a; Anon., 2013c). In Nederland is de fosfaat die niet in rekening moet worden gebracht beperkt tot 3,5 kg P_2O_5 /1000 kg, in Vlaanderen is er geen beperking. Tussen 2006 en 2009 waren deze bepalingen ook geldig voor schuimaarde in Nederland. Champost valt niet onder compost. Voor Vlaanderen valt alleen gecertificeerde gft- en groencompost onder deze regeling. Dit is compost die beschikt over een VLACO-keuringsattest of waarvan aangetoond wordt dat de kwaliteit gelijkwaardig is aan de kwaliteit van compost die beschikt over een VLACO-keuringsattest (Anon., 2011a). Boerderijcompost en stalmest kan ook genieten van deze regeling voor bodems met een laag of voldoende bodemfosforgehalte (klasse I of II). In Nederland mag compost pas als meststof verhandeld worden als het voldoet aan de verhandelingsisen, onder andere kennis over het fosforgehalte. Daarvoor moet het product bemonsterd en geanalyseerd worden (zie DR-loket).

De redenering om de helft van de opgebrachte fosfaat niet in rekening te brengen is gebaseerd op het idee dat er een aanzienlijke fractie bodemdeeltjes aanwezig is in compost. De fosfaat die van nature aanwezig is in de grond in compost (= basisvrucht), zou dan niet meegerekend moeten worden. Dit idee werd wetenschappelijk uitgewerkt door Ehlert (2005). De fractie grond aanwezig in compost werd bepaald op basis van het gehalte minerale delen in compost, dat in de meeste Nederlandse compoststalen tussen 65% en 75% ligt. Rekening houdend met een fosfaatgehalte in de minerale delen van landbouwbodems onder goede landbouwpraktijk, komt dit neer op een basisvrucht van 0,1-2,2 kg P_2O_5 /1000 kg droge stof in compost. Het aandeel van deze basisvrucht in het totaal fosfaatgehalte van compost (zie Tabel 6) is dus zeer variabel, in de wetgeving werd voor 50% basisvrucht gekozen die niet in rekening moet worden gebracht.

Door deze gedeeltelijke vrijstelling kan meer fosfaat dan bepaald door de norm opgebracht worden, en wordt het gebruik van compost gestimuleerd, wat positief is voor de koolstofopbouw in de bodem (zie 5.6.3.3). Het gebruik van compost in de landbouw is zeer beperkt, namelijk 15000 ton Vlaco-compost in 2012 (ongeveer gelijk verdeeld over de 3 sectoren boomkwekerij & sierteelt, tuinbouw en akkerbouw), en neemt zelfs af in de tijd (Braekevelt et al., 2013).

Ook stalmest bevat veel effectieve organische stof voor de opbouw van het koolstofgehalte in de bodem. Daarom is de regel van 50% zoals deze voor compost in MAP5 uitgebreid naar stalmest, maar enkel voor bodems met een lage tot voldoende fosforbeschikbaarheid (klasse I en II bodems). De redenering die gebruikt wordt voor de vrijstelling voor compost is moeilijk toepasbaar voor stalmest aangezien in stalmest geen grond aanwezig is. Het percentage minerale delen in stalmest is 23% voor varkensstalmest en 24% voor runderstalmest (Coppens et al., 2009), een flink pak lager dan de 65-75% voor compost (Ehlert, 2005). Er kan wel aangevoerd worden dat runderstalmest bij bemesting eigenlijk 'terugkeert' naar de bodem en positief is voor het bodemkoolstofgehalte. Zowel voor compost als voor stalmest kan er door deze regeling in realiteit een dubbele dosis van normaal toegestane fosforbemestingshoeveelheid opgebracht worden. Daardoor kan de toename in fosfor beschikbaar voor verliezen naar het milieu, versnellen. Dit risico is groter voor stalmest dan voor compost (zie deel 2 van deze rapportenreeks, Amery & Vandecasteele (2015a)).

5.6.3.5 Fosforinhoud in dierlijke mest verlagen

Indien dierlijke mest minder fosfaat zou bevatten, kan onder dezelfde bemestingsnormen meer dierlijke mest op het veld gebracht worden. Dit geldt vooral voor varkensmest waar het fosfaatgehalte eerder dan het stikstofgehalte limiterend is. Het fosfaatgehalte in dierlijke mest kan ten eerste verlaagd worden door de fosforvoederefficiëntie te verhogen, bijvoorbeeld door minder fosfor te voeren en fosfatases aan het dieet toe te voegen. Ook door mestverwerking kunnen mestfracties bekomen worden die minder fosfaat bevatten. Op beide benaderingen wordt in detail ingegaan in deel 3 van deze rapportreeks (Amery & Vandecasteele, 2015b).

6 Fosforbestedingsadviezen

6.1 Drie stappen bij het opstellen van bestingsadviezen

Fosforbestingsadviezen worden door verschillende instellingen opgesteld om landbouwers te helpen in het bepalen van de optimale fosforbestingshoeveelheden. Om tot een fosforbestingsadvies te komen, zijn normaal gezien drie stappen nodig (Jordan-Meille et al., 2012), die hieronder besproken worden.

6.1.1 Stap 1: Bepaling van de fosforbeschikbaarheid met bodemfosfortesten

Om te bepalen hoeveel bijkomende fosfor vanuit bemesting nodig is, is het nodig om de fosforbeschikbaarheid in de bodem te bepalen. Aangezien het gewas het grootste deel (80-90%) van de fosfor uit de bodem (voorgaande bestingsgiften) en niet uit de recente bemesting haalt (zie 5.3), is het belangrijk om de fosforbeschikbaarheid in de bodem goed te meten. De fosforbeschikbaarheid wordt doorgaans met chemische extractiemethodes gemeten (zie 2.1). Doordat chemische extractiemiddelen helemaal anders werken dan plantenwortels is er niet altijd een goede correlatie tussen de gemeten fosforbeschikbaarheid en de gewasopbrengst of P-opname door het gewas. De gemeten fosforbeschikbaarheid is bovendien afhankelijk van het bodemtype. Omdat de chemische extractiemethodes echter snel en relatief goedkoop zijn, worden deze algemeen in Europa toegepast (Jordan-Meille et al., 2012). In Europa worden meer dan 10 verschillende extractiemethodes gebruikt met grote verschillen in gerapporteerde fosforbeschikbaarheid tussen de methodes (Bomans et al., 2005).

6.1.2 Stap 2: Calibratie van de bodemfosfortesten

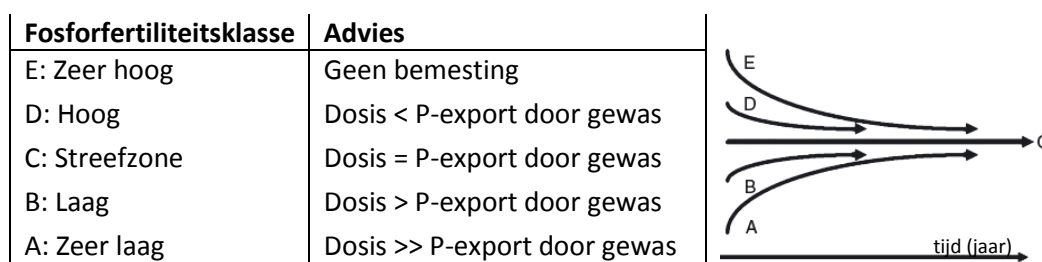
De bekomen bodemfosfortest (gemeten fosforbeschikbaarheid) wordt vervolgens gecalibreerd: gewasresponsen worden gerelateerd aan de fosforbeschikbaarheid (Bai et al., 2013). Er zijn bijzonder weinig publicaties over responscurves, noch over de modellen en drempelwaarden van maximale opbrengsten die gebruikt worden voor berekeningen in Europese bestingsadviezen (Jordan-Meille et al., 2012). Adviesinstellingen zijn over het algemeen weigerachtig om informatie te verstrekken over hoe de bestingsadviezen tot stand zijn gekomen. Het gevolg is dat bestingsadviezen vaak een 'zwarte doos' vormen, waarbij de gebruiker onvoldoende informatie heeft om de adviezen te kunnen evalueren en interpreteren.

Veel adviessystemen brengen niet alleen de fosforbeschikbaarheid, maar ook andere parameters in rekening voor het bepalen van de fosforadviezen (Jordan-Meille et al., 2012). Dit kunnen bodemparameters zijn als textuur, kleigehalte, organisch stofgehalte, pH, carbonaatgehalte of bodemtype. Fosforbestingsadviezen worden daarnaast ook soms opgedeeld volgens de gewassoort. In Vlaanderen is er bijvoorbeeld de opdeling tussen akkerland en grasland, in Nederland is er een opdeling volgens fosforbehoefte van het gewas.

Veelal resulteert de calibratie in een classificatie van de bodemfosfortest in een bepaalde fosforfertiliteitsklasse (van (zeer) laag tot (zeer) hoog). De middelste klasse is over het algemeen de 'optimale', 'goede' of 'streef-' fertiliteitsklasse (Jordan-Meille et al., 2012). Vreemd genoeg kunnen de fosforbeschikbaarheidswaarden voor deze middelste klasse sterk verschillen tussen verschillende landen (zie deel 6.5.2).

6.1.3 Stap 3: Berekening van de geadviseerde bemestingsdosis

De algemene strategie in Europa is om de fosforbeschikbaarheid tot een bepaalde streefwaarde te brengen die een bepaalde gewasopbrengst verzekert, en om deze streefwaarde te behouden door de gewasexport te balanceren met de bemestingsinput (Figuur 9). Eens je voldoende opbrengst hebt (en dus voldoende beschikbare fosfor in de bodem), volstaat het immers om wat geëxporteerd wordt terug aan te vullen (Johnston, 2000). De concrete invulling van deze berekeningswijze kan echter sterk van land tot land verschillen (Jordan-Meille et al., 2012). Soms wordt zowel een bodem- (dosis om de streefzone te bereiken) als een gewasadvies (dosis om de fosforexport door het gewas te compenseren) gegeven, zoals in Ierland en Nederland (Bomans et al., 2005). In andere landen zijn beide adviezen geïntegreerd in één advieswaarde.



Figuur 9. Berekening van de geadviseerde bemestingsdosis (Jordan-Meille et al., 2012)

6.2 Adviezen in Vlaanderen

De grote meerderheid van de fosforbemestingsadviezen in Vlaanderen wordt door de Bodemkundige Dienst van België (BDB) gegeven. De BDB gebruikt daarvoor het Bemex-expertsysteem. De fosforbeschikbaarheid in de bodem (stap 1, zie 6.1.1) wordt bepaald met behulp van een extractie met ammoniumlactaat in azijnzuur op pH 3,75 (P-AL, zie 2.1.3.1). De staalnamediepte is 23 cm voor akkerland en 6 cm voor grasland. Andere inputgegevens voor Bemex zijn de antwoorden op een vragenlijst naar bemestingsgeschiedenis en voorteelt, het gewas en de eventuele variëteit.

Het resultaat van de extractie catalogeert de bemonsterde bodem in één van de 7 fertiliteitsklassen volgens fosforbeschikbaarheid (Tabel 9 en Tabel 10). Deze classificatie (stap 2, zie 6.1.2) is verschillend voor akkerland en grasland. Er zijn geen verschillen in classificatie tussen bodemtypes. Een aparte indeling voor bijvoorbeeld kalkrijke bodems zou een mogelijkheid zijn, gezien de P-AL-methode de fosforbeschikbaarheid in kalkrijke bodems mogelijk overschat (zie 2.1.3.1). In bodems met veel klei of veel gehydrateerde aluminium- of ijzeroxides is dan weer een onderschatting mogelijk. Daarnaast is P-AL geen inschatting van de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid maar eerder van de fosforcapaciteit. Andere fosformethodes kunnen de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid beter inschatten, wat voor kortlopende gewassen noodzakelijk kan zijn. Zo bleek uit demoproeven van PCG dat niet P-AL maar wel P-CaCl₂ het effect van startfosfor op de groei van andijvie kan voorspellen (Verhaeghe, 2014b).

De streefzone gedefinieerd door BDB (Tabel 9 en Tabel 10) ligt veel hoger dan in andere Europese landen (zie 6.5.2), wat resulteert in relatief hoge fosforadviezen voor een bepaalde gemeten fosforbeschikbaarheid (Jordan-Meille et al., 2012) (zie 6.6). Er wordt hier geen grondige analyse van het bemestingsadvies gegeven aangezien er geen details over de opstelling en achterliggende studies beschikbaar zijn.

Tabel 9. Fosforfertiliteitsklassen volgens de fosforbeschikbaarheid (P-AL) bepaald door BDB voor akkerland (Maes et al., 2012)

Fosforfertiliteitsklasse	P-AL (mg P/100 g droge grond)
Zeer laag	< 5
Laag	5 – 8
Tamelijk laag	9 – 11
Streefzone	12 – 18
Tamelijk hoog	19 – 30
Hoog	31 – 50
Zeer hoog	> 50

Tabel 10. Fosforfertiliteitsklassen volgens de fosforbeschikbaarheid (P-AL) bepaald door BDB voor grasland (Maes et al., 2012)

Fosforfertiliteitsklasse	P-AL (mg P/100 g droge grond)
Zeer laag	< 8
Laag	8 – 13
Tamelijk laag	14 – 18
Streefzone	19 – 25
Tamelijk hoog	26 – 40
Hoog	41 – 60
Zeer hoog	> 60

In Vlaanderen geeft naast BDB ook Inagro bemestingsadvies voor akkerbouwgewassen. Dit gebeurt ook op basis van een extractie in ammoniumlactaat in azijnzuur. Er wordt rekening gehouden met de teelt (opname door het gewas) en de geschiedenis van het perceel (voorteelt, organische bemesting) (Inagro, persoonlijke communicatie). Ook hier zijn geen details over de opstelling van het advies beschikbaar. Andere praktijkcentra geven geen fosforbemestingsadviezen. Het Nederlandse bedrijf BLGG geeft ook adviezen voor Vlaamse bodems.

6.3 Adviezen in Nederland

In Nederland worden de bemestingsadviezen vastgesteld door de Commissie Bemesting voor Akkerbouw/Vollegroondsgroententeelt enerzijds en de Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen anderzijds. Beide commissies zijn samengesteld uit vertegenwoordigers van onderzoek, voorlichting en bedrijfsleven. In tegenstelling tot Vlaanderen is het advies vrij beschikbaar en zijn de achterliggende studies gekend (Brandsma et al., 2012; de Haan & van Geel, 2013). Toch zijn de in het verleden gemaakte keuzes niet altijd duidelijk (Ehlert et al., 2014a). Er zijn ook aparte adviessystemen voor bloembollen, boomkwekerij en buitenbloemen (gebaseerd op aardappel), en fruit (Ehlert et al., 2014a).

6.3.1 Adviezen voor akkergewassen en vollegrondsgroenten

Het fosforbemestingsadvies voor akkergewassen en vollegrondsgroenten is in Nederland opgesplitst in een bodemgericht- en een gewasgericht advies (de Haan & van Geel, 2013). De twee adviezen zijn doorgaans verschillend, maar er moet aan beiden voldaan worden. Het bodemgericht advies geldt voor een ganse

rotatie en kan zo verdeeld worden over de verschillende gewassen zodat ook aan het gewasadvies wordt voldaan. Bij de gewassen waar dat niet het geval is, wordt de bemesting zo verhoogd dat ook wordt voldaan aan het gewasadvies.

6.3.1.1 Bodemgericht advies

Het bodemgericht advies heeft als doel een goede fosfortoestand van de bodem te bekomen en te behouden. De fosfortoestand van de bodem wordt bepaald aan de hand van een waterextractie (Pw-getal, zie 2.1.3.3). In de jaren '50-'70 is een groot aantal veld- en potproeven uitgevoerd om relaties tussen Pw-getal en gewasopbrengsten vast te stellen. Deze empirische relaties vormen de basis voor de huidige fosfobemestingsadviezen. In een rotatie met aardappelen of andere fosfaatbehoefteige gewassen wordt een Pw van minstens 25 mg P_2O_5 /l (zeeklei en zeezand) of 30 mg P_2O_5 /l (dekzand, rivierklei of löss) nagestreefd. Zonder aardappelen of fosfaatbehoefteige gewassen is een bodemtoestand van 20 mg P_2O_5 /l voldoende (de Haan & van Geel, 2013). Naargelang de bodemtoestand hoger, gelijk of lager is dan deze streefwaarde, wordt geadviseerd om minder, evenveel of meer dan de fosfaatafvoer door de gewasrotatie plus onvermijdbare verliezen toe te dienen. Deze onvermijdbare verliezen variëren tussen 5 en 20 kg P_2O_5 /ha/jaar (de Haan & van Geel, 2013).

6.3.1.2 Gewasgericht advies

Het gewasgericht advies geeft de giften die nodig zijn om bij een bepaalde fosfortoestand van de bodem de economisch optimale opbrengsten te bereiken.

6.3.1.2.1 Advies op basis van Pw

De gewassen zijn onderverdeeld in 5 gewasgroepen (0-4) op basis van hun fosfaatbehoefteigheid. In een tabel van het algemeen beschikbaar bemestingsadvies (de Haan & van Geel, 2013) kan dan voor elke gewasgroep en bij verschillende Pw-getallen het advies afgelezen worden. Het advies is gebaseerd op de gewasreactie van aardappel op zand- en dalgrond, en bij de indeling van fosfaatklassen werd expert judgement toegepast (Ehlert et al., 2014a).

6.3.1.2.2 Advies op basis van P-CaCl₂ en P-AL

Recent zijn nieuwe adviezen voor maïs opgesteld omdat de oude adviezen verouderd waren, gebaseerd waren op aardappelproeven, te weinig rekening hielden met fosforaanrijking en fosforverliezen en omdat nieuwe kennis over fosfaatbeschikbaarheid voorhanden was (Bussink et al., 2011a). Met één chemische extractie (Pw) is het niet mogelijk om tegelijk de onmiddellijke beschikbaarheid en de nalevering van P door de bodem in te schatten (van Rotterdam-Los, 2010). Met behulp van het P-CaCl₂-getal (fosforintensiteit), het P-AL-getal (fosforvoorraad) en de verhouding (maat voor de buffercapaciteit) kan het dynamische proces van fosforopname door planten veel beter in rekening worden gebracht (zie 2.1.6). Uit veldexperimenten blijkt dat met deze dubbele extractie de gewasopbrengsten beter voorspeld kunnen worden en de accuraatheid van de bemestingsadviezen verhoogd wordt (Bussink et al., 2011a; Ehlert et al., 2014b). Let wel: dit advies is er op gericht om de gewasopbrengst te verhogen, en werkt dus niet naar een bepaalde streeftoestand voor de fosforbeschikbaarheid zoals bij de meeste adviezen het geval is (zie 6.1.3 en Figuur 9). Ook voor andere akkerbouwgewassen zijn er proeven lopende om het advies aan te passen naar een combinatie van de twee extractiemethodes (Debby van Rotterdam van NMI, persoonlijke communicatie).

Voor de nieuwe fosfobemestingsadviezen voor maïs wordt alleen nog een advies 'in de rij' gegeven, eventueel in combinatie met een beperkte breedwerpig fosfaatgift (de Haan & van Geel, 2013). De

maïsoptbrengst wordt immers veel sterker beïnvloed door rijenbemesting dan door breedwerpig bemesting. Er wordt aangeraden om de rijbemesting ook met dierlijke mest uit te voeren om zo N- en K-tekorten te voorkomen (zie 5.5.2.4). Algemeen ligt het nieuwe advies lager dan het oude bemestingsadvies. Uitzondering vormen de bodems met hoge fosfortoestand waar in tegenstelling tot het oude advies toch nog een beperkte fosforbemesting wordt aangeraden (Bussink et al., 2011a). In tegenstelling tot het oude advies wordt ook bijna nooit een fosforbemesting boven de norm geadviseerd.

6.3.2 Adviezen voor grasland

Voor grasland is er geen opsplitsing in een bodem- en een gewasgericht advies. Ook het advies voor grasland (eerste snede) is recent aangepast aan de nieuwe omstandigheden (meer fosforaanrijking in de bodem) en nieuwe kennis over fosforgehaltes in gras (3,5-3,7 g P/kg in plaats van 4,0 g P/kg in vers gras is voldoende voor de prestaties van runderen, zie deel 3 van deze rapportreeks (Amery & Vandecasteele, 2015b)) en over fosforbeschikbaarheid (de dubbele extractie, zie 2.1.6). Uit veldexperimenten bleek dat het fosforgehalte in gras beter kan voorspeld worden op basis van de combinatie P-CaCl₂ + P-AL dan op basis van één parameter alleen (Bussink et al., 2011b). Let wel: dit advies is erop gericht om het fosforgehalte in het gewas te verhogen, en werkt dus niet naar een bepaalde streeftoestand voor de fosforbeschikbaarheid in de bodem zoals bij de meeste adviezen het geval is (zie 6.1.3 en Figuur 9).

Het belang van het meenemen van de onmiddellijk beschikbare fosforbeschikbaarheid (P-CaCl₂) blijkt uit een veldstudie op fosfaatfixerende bodems (Tabel 11). De nieuwe bemestingsadviezen zijn het hoogst voor de bodems met de laagste P-CaCl₂. Deze bodems vertonen een duidelijk fosforgebrek, zoals bewezen door het lage fosforgehalte in het gras (laatste kolom Tabel 11). De oude bemestingsadviezen houden hier geen rekening mee want deze zijn alleen op P-AL gebaseerd (van Rotterdam-Los et al., 2013). De nieuwe adviezen voor bodems met voldoende fosforbeschikbaarheid zijn lager dan de oude adviezen.

Tabel 11. Vergelijking van het oud en nieuw fosforbemestingsadvies voor gras en bijbehorend fosforgehalte (van Rotterdam-Los et al., 2013)

Veld	P-AL (mg P/100 g)	P-CaCl ₂ (mg P/kg)	Oud advies (kg P ₂ O ₅ /ha)	Nieuw advies (kg P ₂ O ₅ /ha)	P-gehalte gras (mg P/g)
1	15	1,0	45	55	3,1
2	14	4,1	45	15	4,6
3	9	0,2	70	79	2,7
4	10	6,0	70	15	4,1

Het vernieuwde fosforadvies voor de eerste snede is afhankelijk van P-CaCl₂, P-AL, de grondsoort (zand, klei, löss of veen) en het beoogde fosforgehalte van het gras (3,5 of 3,7 g P/kg). Het advies voor de overige snedes is niet gekoppeld aan bodemanalyses maar compenseert louter de fosforexport door het gewas. Bij hoge fosforgehaltes (P-AL > 22 mg P/100 g bodem, in Vlaanderen gecatalogeerd als streefzone) wordt zelfs geen fosforbemesting meer aangeraden na de eerste snede (Brandsma et al., 2012).

Naast het bemestingsadvies voor grasland bestaat er in Nederland ook een MestverdelingsWijzer. Dit programma is ontwikkeld door de Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen en is vrij beschikbaar. Het berekent de beschikbare hoeveelheid fosfaat op het bedrijf en verdeelt deze op basis van

bodemeigenschappen en het bemestingsadvies over de gras- en maïspercelen voor een optimale fosforbenutting.

6.4 Adviezen in andere landen

In Tabel 12 wordt beknopte informatie gegeven over het fosforbemestingsadvies in naburige Europese landen (Bomans et al., 2005).

Tabel 12. Informatie over fosforbemestingsadviezen in naburige Europese landen/regio's (Bomans et al., 2005)

Land	Fosforanalysemethode	Extra informatie
Oostenrijk	Calciumlactaat + calciumacetaat + azijnzuur	Advies door de overheid. Ook bodeminformatie wordt meegenomen.
Wallonië	Ammoniumacetaat + EDTA pH 4,65	Deels BDB, maar vooral provinciale labo's van Requasud.
Denemarken	Olsen (natriumacetaat pH 8,5)	Door praktijkcentra. Gebaseerd op bodemanalyse en verwachte opname door het gewas.
Ierland	Morgan's extract (natriumacetaat pH 4,8)	Advies geleverd door overheid (Teagasc).
Frankrijk (Anon., 2009)	Ammoniumoxalaat, Olsen of Dyer (citroenzuur)	Bemestingsadvies = geschatte opbrengst x fosfaatinhoud van het gewas x factor die de fosfortoestand van de bodem in rekening brengt (varieert tussen 0 (hoge fosfortoestand) en 1,3-2,3 (lage fosfortoestand) en wordt groter bij fosforbehoeftige gewassen en indien de laatste bemesting meer dan één jaar geleden is)
Verenigd Koninkrijk (Anon., 2010b)	Olsen (natriumacetaat pH 8,5)	Advies in uitgebreide handleiding (Anon., 2010b). Advies afhankelijk van gewas, Olsen-P en opbrengstverwachting.

6.5 Mogelijk verklaringen voor verschillen tussen adviezen

In tegenstelling tot de zeer grondige controle op landbouwrassen, is de controle op adviessystemen in Europa zeer gebrekkig tot afwezig (Csathó et al., 2009). Het is niet eenvoudig om fosforbemestingsadviezen van verschillende landen te vergelijken. Verschillen kunnen immers niet alleen te maken hebben met andere bodemanalysemethodes, calibraties en berekeningswijzen (zie hieronder), maar ook met verschillen in klimaat, de lengte van het groeiseizoen en bijgevolg de beoogde opbrengst.

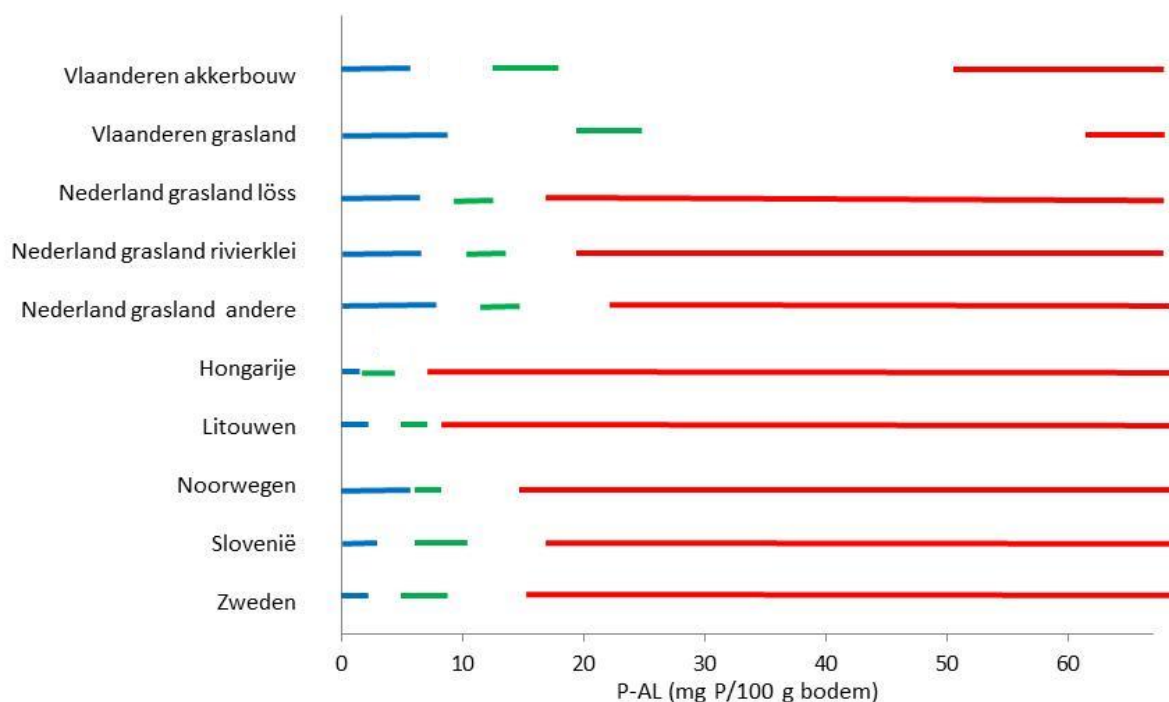
6.5.1 Verschillen in stap 1: analysemethode voor fosforbeschikbaarheid in bodem

De bepaling van de fosforbeschikbaarheid in een bodem begint met een bodemstaalname. Zelfs hierin zijn al grote verschillen tussen landen, vooral wat betreft de staalnamediepte. In 2.1.5 wordt beschreven dat de staalnamediepte varieert tussen 6 cm (Vlaanderen) en 15 cm (Wallonië) voor grasland en tussen 10 cm (Nederland, gedeeltelijk) en 25 cm (Wallonië) voor akkerbouw. Aangezien de fosforbeschikbaarheid doorgaans daalt met de diepte, zal een lagere fosforbeschikbaarheid gemeten worden indien een dieper bodemstaal genomen wordt. Dit verschil is beperkt bij ploegen, maar kan aanzienlijk zijn bij niet-kerende bodembewerking.

In Europa worden meer dan 20 verschillende extractietechnieken toegepast om de fosforbeschikbaarheid te bepalen. Gedetailleerde informatie over de verschillende methodes met hun voor- en nadelen is terug te vinden onder 2.1.3. Fosforbeschikbaarheden gemeten met verschillende extracties kunnen door de grote variaties moeilijk naar elkaar omgezet worden, zodat vergelijking moeilijk is. Zelfs indien de zelfde extractie wordt gebruikt, kunnen kleine verschillen in protocols (schudtijd, meetapparatuur,...) verschillen in resultaten veroorzaken (zie 2.1.4). Zelfs bij gebruik van zelfde methodes kunnen vrij grote verschillen in resultaten bekomen worden (zie 2.1.5).

6.5.2 Verschillen in stap 2: calibratie

Zelfs bij eenzelfde extractiemethode kan de indeling van de bodemfosfortest in (zeer) lage – normale – (zeer) hoge fosforbeschikbaarheidsklassen sterk verschillen. Over het algemeen liggen kritieke waarden voor opbrengstverlies hoger in Europa dan in de Verenigde Staten en Canada (Sibbesen & Sharpley, 1997).



Figuur 10. Fosforbeschikbaarheidsklassen van verschillende Europese landen volgens P-AL-gehalte voor de klasse zeer laag (blauw), medium/streepzone (groen) en zeer hoog (rood) (Aurell, 2000; Krogstad et al., 2008; Schoumans et al., 2011; Hoeks et al., 2012; Jordan-Meille et al., 2012)

In Figuur 10 wordt voor Europese landen die net als Vlaanderen de ammoniumlactaatextractie gebruiken de fosforbeschikbaarheidsklassengrenzen voor de laagste, medium (streepzone) en hoogste fosforbeschikbaarheidsklassen weergegeven. Deze waarden verschillen sterk. Nederland heeft hogere fosforbeschikbaarheidsgrenzen dan de andere landen, maar vooral Vlaanderen springt er met de grenzen die tot 6 keer hoger liggen, bovenuit. Waarden voor P-AL van 18 mg P/100 g bodem vallen voor Vlaams grasland onder ‘tamelijk laag’, terwijl dit in alle andere landen als zeer hoog wordt beschouwd. De grote verschillen in fosforbeschikbaarheidsclassificatie tussen landen zijn naast verschillen in bodemtype, klimaat en exact protocol van de extractie (zie 6.5.1) vooral te verklaren door verschillen in de uitgevoerde testexperimenten en het gebruikte testgewas (Jordan-Meille et al., 2012). Mogelijke verklaringen voor de

grote verschillen tussen Nederland en Vlaanderen zijn de staalnamediepte, de gebruikte testexperimenten, de modellering van de responscurves van de gewassen, over-/onderschattingen van opbrengstresponsen (Valkama et al., 2009; Valkama et al., 2011), verschillen in eisen voor de relatieve opbrengst (geen of wel 'insurance application' (Tunney et al., 1997)), verschillen in aandeel van fosforbehoefte en of -gevoelige teelten in de doorsnee teeltrotaties,... Doordat de nodige informatie niet beschikbaar is, is niet te beoordelen wat de precieze oorzaken zijn voor de grote verschillen.

Ook voor andere beschikbaarheidsmetingen zijn er grote verschillen tussen landen. Zo gebruiken Denemarken, Engeland, Frankrijk, Italië en Spanje (Navarra) dezelfde Olsen-test, maar vallen bodems met als Olsenresultaat 20 mg P/kg in de klasse 'zeer laag' in Denemarken en Frankrijk, 'medium' in Engeland en in de klasse 'zeer hoog' in Italië en Spanje (Navarra) (Jordan-Meille et al., 2012).

Het is steeds moeilijker om opbrengstdalingen omwille van fosforgebrek of fosfordeficiëntiesymptomen te vinden. Er lijkt een tegenstelling te zijn: nogal wat bodemtesten lijken een (zeer) lage P-toestand te detecteren, maar opbrengstbeperkingen of deficiëntiesymptomen zijn afwezig (Neyroud & Lischer, 2003). Bijgevolg kan de vraag gesteld worden of deze gedetecteerde (zeer) lage P-toestand werkelijk een te lage fosforbeschikbaarheid (fosforgebrek) voor de plant inhoudt. Alternatief is het ook mogelijk dat fosfor aanwezig in bodemlagen onder de staalnamediepte kan instaan voor een voldoende fosforvoorziening voor het gewas.

6.5.3 Verschillen in stap 3: berekeningsmethode

Zelfs indien de fosforbeschikbaarheidsclassificatie (stap 2) gelijk is tussen verschillende landen, kunnen de adviezen nog sterk verschillen. Over het algemeen zijn adviezen erop gericht de bodems in de streefzone te houden door de gewasexport te compenseren door bemesting (zie 6.1.3). Indien verschillende fosforgehaltes en/of gewasopbrengsten gehanteerd worden door verschillende landen, zal de geschatte fosforexport en dus ook het bemestingsadvies voor de streefzone daardoor verschillen (Jordan-Meille et al., 2012). Vaak zijn de adviezen gebaseerd op een optimale opbrengst. Indien deze niet wordt gehaald, is de fosforexport kleiner dan verwacht en zal er dus fosfor ophopen in de bodem.

Daarnaast zijn ook grote verschillen in bemestingsadviezen mogelijk doordat sommige landen veel 'veiligheidsmarge' inbouwen zodat fosforgebrek zeker wordt vermeden. Dit is de zogenaamde 'insurance application'. In Ierland is deze marge bijvoorbeeld groot, zodat bemestingsadviezen soms dubbel zo hoog zijn als in het Verenigd Koninkrijk (Tunney et al., 1997).

De berekening van het advies voor bodems met een fosforbeschikbaarheid onder of boven de streefzone (zoals weergegeven in Figuur 9) kan eenvoudig opgesteld worden door fosforexport (advies bij streefzone) te vermenigvuldigen met een bepaalde factor of een bepaalde hoeveelheid af te trekken of bij te tellen afhankelijk van de fosforbeschikbaarheid. Er wordt zelden rekening gehouden met de fosforbuffercapaciteit van een bodem (zie 1.2) voor het geven van een bemestingsadvies. Nochtans zal deze fosforbuffercapaciteit bepalen hoe de fosforbeschikbaarheid verandert bij het toevoegen (bemesten) of afvoeren (uitmijnen) van een bepaalde fosforhoeveelheid, wat belangrijk is indien het doel is om de streefzone te bereiken. Dit doel zal gerichter bereikt kunnen worden indien de fosforbuffercapaciteit van de bodem meegenomen wordt in het opstellen van het bemestingsadvies (Quintero *et al.*, 2003).

6.6 Vergelijking van bemestingsadviezen

Verschillen in één of meerdere van de drie bovenstaande stappen resulteren in verschillen in het uiteindelijke bemestingsadvies. Vergelijking van bemestingsadviezen op papier is enkel mogelijk tussen landen die eenzelfde extractieprocedure gebruiken. Hieronder zijn enkele vergelijkingen tussen Vlaanderen en andere landen die P-AL gebruiken voor verschillende gewassen weergegeven. De adviezen in Vlaanderen zijn gebaseerd op het gemiddelde advies voor de desbetreffende klasse en kunnen in realiteit licht afwijken (Maes et al., 2012).

6.6.1 Gras (maaïen)

Vergelijking van fosforbemestingsadviezen voor gras (maaïen) tussen Vlaanderen en Nederland is niet eenvoudig aangezien het Nederlandse advies afhangt van het type bodem, het aantal sneden en vooral van een extra fosforbepaling in de bodem (P-CaCl₂). Uitgaande van 5 sneden waarvan de opbrengst van de tweede snede hoger en de derde, vierde en vijfde lager is dan 2,5 ton, is het bemestingsadvies in Nederland bij P-AL 10-11 (klasse 'laag' in Vlaanderen) over het algemeen minder dan het advies in Vlaanderen (Tabel 13). Enkel voor zandgronden met een lage onmiddellijke beschikbaarheid is het advies vergelijkbaar. Voor bodems met P-AL hoger dan 22 ('streefzone' in Vlaanderen) wordt in Nederland geen fosforbemesting geadviseerd, terwijl dit in Vlaanderen nog gemiddeld 20-78 kg P₂O₅/ha is (afhankelijk van P-AL). Het merendeel van de Vlaamse bodems valt hieronder.

Tabel 13. Advies voor gras (maaïen) in Vlaanderen en Nederland (Brandsma et al., 2012; Maes et al., 2012). De adviezen in Vlaanderen zijn gebaseerd op het gemiddelde advies voor de desbetreffende klasse en kunnen in realiteit licht afwijken

P-AL (mg P/100 g)	Advies (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)		Vlaamse norm (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)
	Vlaanderen	Nederland	
10-11	117	85* (+ 25/35 indien zandgrond met P-CaCl ₂ < 1,0/0,8 mg P/kg)	115
15-16	100	85* (+ 10/20 indien zandgrond met P-CaCl ₂ < 1,0/0,8 mg P/kg)	115
22	78	0	95
26-40	57	0	90
41-60	20	0	70-90

* opbrengst 2^e snede >2,5 ton, opbrengst snede 3-5 <2,5 ton.

6.6.2 Gras (maaïen + grazen)

De geadviseerde bemestingshoeveelheid voor gras (maaïen + grazen) is, telkens beschouwd per fosforklasse, in Vlaanderen veel hoger dan in Noorwegen en Zweden (Tabel 6). Vanaf een P-AL van 8 mg P/100 g in Zweden en 15 mg P/100 g in Noorwegen wordt zelfs geen fosforbemesting meer aangeraden, voor Vlaanderen is dit nog zo'n 85 kg P₂O₅/ha/jr (Albertsson, 2008; Krogstad et al., 2008; Maes et al., 2012). Deze verschillen kunnen gedeeltelijk worden door het verschil in beoogde opbrengst (5 ton/ha in Noorwegen, 6 ton/ha in Zweden) en in klimaat.

Tabel 14. Advies voor gras (maaïen + grazen) in Vlaanderen, Zweden en Noorwegen (Albertsson, 2008; Krogstad et al., 2008; Maes et al., 2012). De adviezen in Vlaanderen zijn gebaseerd op het gemiddelde advies voor de desbetreffende klasse en kunnen in realiteit licht afwijken.

P-AL (mg P/100 g)	Advies (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)			Vlaamse norm (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)
	Vlaanderen	Zweden	Noorwegen	
7	120	23	39	115
12	85	0	10,5	115
15	70	0	0	115
19-25	48	0	0	90-95
26-40	20	0	0	90
>40	0	0	0	70-90

6.6.3 Granen

6.6.3.1 Algemeen

De geadviseerde bemestingshoeveelheid voor granen is in Vlaanderen bij lage bodemfosfortoestand 6-7 keer zo hoog als in Zweden (Tabel 15) (Albertsson, 2008; Maes et al., 2012). Vanaf een P-AL van 9 mg P/100 g (klasse 'tamelijk laag' in Vlaanderen) wordt zelfs geen fosforbemesting meer aangeraden in Zweden, in Vlaanderen is dit nog 110-140 kg P₂O₅/ha/jaar, een stuk boven de bemestingsnorm. Dit kan gedeeltelijk verklaard worden door het verschil in beoogde opbrengst (6 ton/ha in Zweden) en in klimaat.

Tabel 15. Advies voor granen in Vlaanderen en Zweden (Albertsson, 2008; Maes et al., 2012). De adviezen in Vlaanderen zijn gebaseerd op het gemiddelde advies voor de desbetreffende klasse en kunnen in realiteit licht afwijken

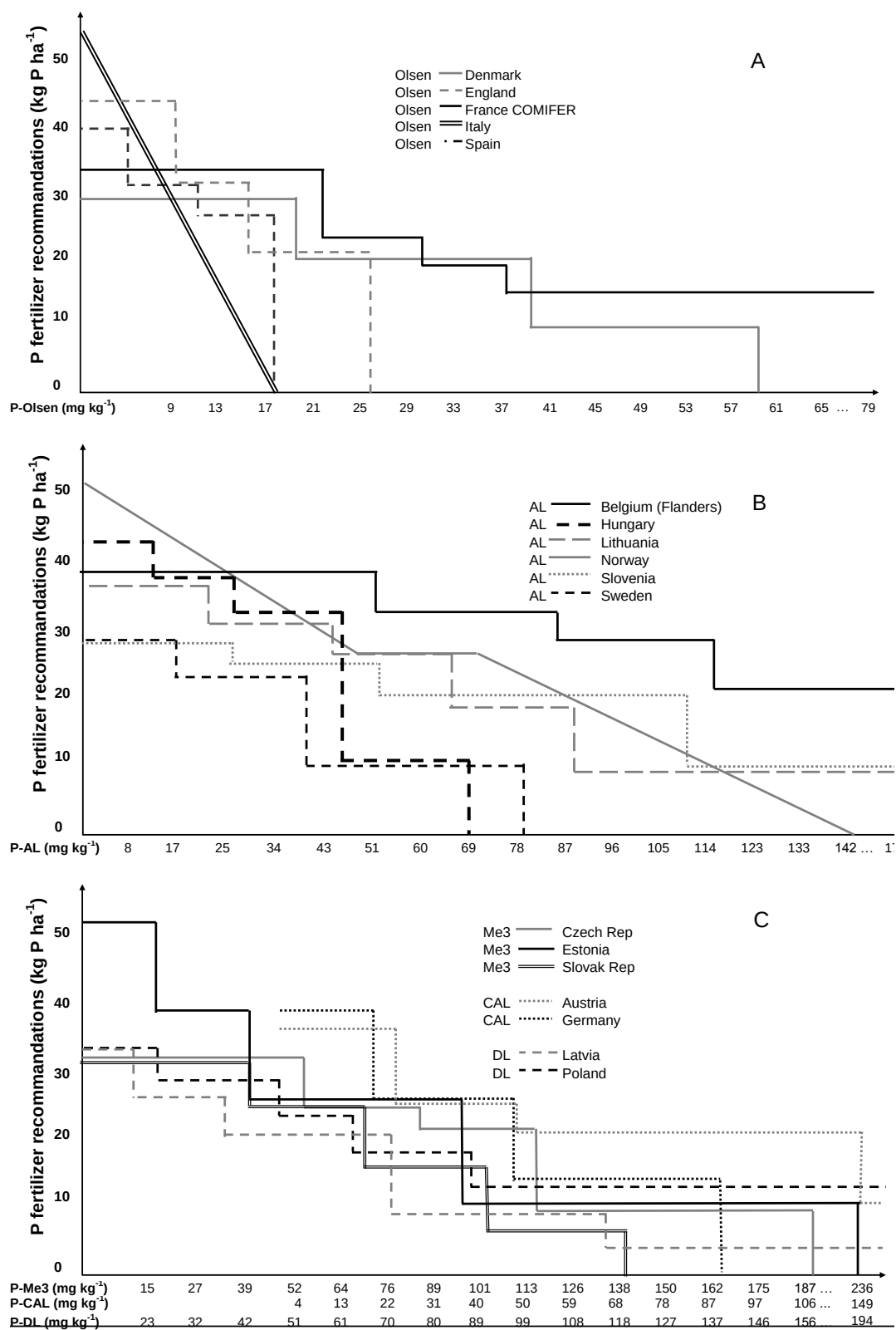
P-AL (mg P/100 g)	Advies (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)		Vlaamse norm (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)
	Vlaanderen	Zweden	
5-8	125-150	23	95
9-11	110-140	0	95
12-18	76-100	0	75
19-30	35-50	0	70
31-50	21-30	0	55-70

6.6.3.2 Gerst

De geadviseerde bemestingshoeveelheid voor gerst is, telkens beschouwd per fosforklasse, in Vlaanderen 5 tot meer dan 10 keer zo hoog als in Noorwegen (Tabel 16) (Krogstad et al., 2008; Maes et al., 2012). Vooral bij hogere bodemfosfortoestand zijn de verschillen groot. Dit kan gedeeltelijk verklaard worden door het verschil in beoogde opbrengst (4 ton/ha in Noorwegen) en in klimaat.

Tabel 16. Advies voor gerst in Vlaanderen en Noorwegen (Krogstad et al., 2008; Maes et al., 2012). De adviezen in Vlaanderen zijn gebaseerd op het gemiddelde advies voor de desbetreffende klasse en kunnen in realiteit licht afwijken

P-AL (mg P/100 g)	Advies (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)		Vlaamse norm (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)
	Vlaanderen	Noorwegen	
7	150	32	95
12	120	18	95
15	100	9	75
19-30	48	0	70
31-50	30	0	55-70



Figuur 11. Fosforbestedingsadviezen voor tarwe (6,5 ton/ha, 85% droge stof) op een neutrale Aeolische leembodem in functie van de bodemfosfortest in 10 Europese landen. De bodemfosfortesten ((a): P-Olsen, (b): P-AL en (c): P-Mehlich3, P-CAL en P-DL) zijn gerelateerd aan elkaar waardoor de schaal van de x-assen dezelfde is (Jordan-Meille et al., 2012). Voor P-AL is de x-as uitgedrukt in mg/kg, voor de Vlaamse eenheden (mg/100 g) moet gedeeld worden door 10.

6.6.3.3 Tarwe

Recent werden bemestingsadviezen in Europa vergeleken in een A1-publicatie (Jordan-Meille et al., 2012). De bemestingsadviezen in verschillende Europese landen voor tarwe worden vergeleken in Figuur 11. Hierbij werd wel rekening gehouden met beoogde opbrengst (overal gelijkgesteld aan 6,5 ton, 85% droge stof) en bodemtype (overal een bepaald type leembodem). De Vlaamse adviezen werden daarom met een factor 0,65 vermenigvuldigd (omdat in Vlaanderen een opbrengst van 10 ton wordt beoogd en uitgaande van een vooropgesteld lineair verband tussen opbrengst en bemestingsdosis). Zelfs met deze correctie naar beneden zijn de Vlaamse adviezen, telkens vergeleken bij dezelfde bodemfosfortoestand, hoger dan in de andere 9 landen. Waar de meeste bemestingsadviezen 0 kg P₂O₅/ha/jaar bedragen vanaf een bodemgehalte van 8-18 mg P/100g, is dit in Vlaanderen pas vanaf de klasse 'zeer hoog' (>50 mg P/100g). De laagste adviezen worden gegeven door Italië, Spanje en Zweden.

6.6.4 Aardappel

De geadviseerde bemestingshoeveelheid voor aardappel is, telkens beschouwd per fosforklasse, in Vlaanderen 2 tot 4 keer zo hoog als in Zweden (Tabel 17) (Albertsson, 2008; Maes et al., 2012). Vooral bij hogere bodemfosfortoestand zijn de verschillen groot. Daarenboven volstaat de geadviseerde bemesting voor de aardappelen in Zweden ook voor het volgende gewas. De verschillen kunnen gedeeltelijk verklaard worden door het verschil in beoogde opbrengst (30 ton/ha in Zweden) en in klimaat.

Tabel 17. Advies voor aardappel in Vlaanderen en Zweden (Albertsson, 2008; Maes et al., 2012). De adviezen in Vlaanderen zijn gebaseerd op het gemiddelde advies voor de desbetreffende klasse en kunnen in realiteit licht afwijken

P-AL (mg P/100 g)	Advies (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)		Vlaamse norm (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)
	Vlaanderen	Zweden*	
5-8	200	92	95
9-11	180	57	95
12-18	135	34	75
19-30	75		70
31-50	41		55-70

* De geadviseerde bemesting in Zweden volstaat ook voor het volgende gewas

Fosforbemestingsadviezen voor aardappelen (40 ton/ha, 20% droge stof) voor eenzelfde bodemstaal opgestuurd naar 11 adviesinstellingen in Europa zijn sterk verschillend (Jordan-Meille et al., 2012). Voor een kalkrijke kleibodem varieerden deze tussen 0 en 183 kg P₂O₅/ha/jaar, voor een zure leembodem was dit 0 – 204 kg P₂O₅/ha/jaar.

6.6.5 Suikerbieten

De geadviseerde bemestingshoeveelheid voor suikerbieten is, telkens beschouwd per fosforklasse, in Vlaanderen ongeveer 4 keer zo hoog als in Zweden (Tabel 18) (Albertsson, 2008; Maes et al., 2012). Vanaf een P-AL van 16 mg P/100 g (klasse 'streefzone' in Vlaanderen) wordt zelfs geen fosforbemesting meer aangeraden in Zweden, in Vlaanderen is dit nog 58 kg P₂O₅/ha/jaar. Dit kan gedeeltelijk verklaard worden door het verschil in beoogde opbrengst (45 ton/ha in Zweden) en in klimaat.

Tabel 18. Advies voor suikerbiet in Vlaanderen en Zweden (Albertsson, 2008; Maes et al., 2012). De adviezen in Vlaanderen zijn gebaseerd op het gemiddelde advies voor de desbetreffende klasse en kunnen in realiteit licht afwijken

P-AL (mg P/100 g)	Advies (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)		Vlaamse norm (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)
	Vlaanderen	Zweden*	
5-8	174	46	85
9-11	160	34	85
12-16	135	34	65
19-25	58	0	55
31-50	35	0	45-55

6.6.6 Conclusie

In Vlaanderen liggen de fosforfertiliteitsklassen hoger dan in andere Europese landen (zie Figuur 10). Bij eenzelfde fosforbeschikbaarheid worden grasbodems in Nederland veel sneller als ‘hoog’ of ‘zeer hoog’ gecatalogeerd dan in Vlaanderen. Ook de bemestingsadviezen zijn in Vlaanderen bij eenzelfde fosfortoestand veel hoger dan in andere landen, zelfs indien gecorrigeerd wordt voor het verschil in opbrengst. Door de gemiddeld vrij hoge fosfortoestand van de Vlaamse bodems zijn de geadviseerde fosforbemestingshoeveelheden wel vaak lager dan deze van de streefzone.

6.7 Herzieningen

Er zijn grote verschillen in bodemfosfortesten, de interpretatie, de calibratie en de berekening van het advies. Door de ophoping van fosfor in de bodem, de nieuwe kennis en de mogelijke overschatting van de opbrengstrespons vroeger, zijn fosforbemestingsadviezen aan herziening toe. Mogelijke punten van verbetering zijn (Pellerin & Nesme, 2013):

- Een meer mechanistische benadering van de fosforbeschikbaarheid
- Het advies meer aanpassen aan lokale condities
- Veel lagere streefwaarden
- Technieken en strategieën voorzien om fosfor toe te passen op de kritieke momenten (bijvoorbeeld door plaatsing van bemesting, zie 5.5.2)

De huidige adviessystemen zijn vooral empirisch-gebaseerd en het risico op verliezen naar het milieu wordt niet of nauwelijks in rekening gebracht. Ook Jordan-Meille et al. (2012) roepen op om een meer mechanistisch interactief bodem-plant model te ontwikkelen voor een correcter advies. Daarenboven zou een betere controle op adviessystemen in Europa wenselijk zijn (Csathó et al., 2009).

Recent zijn fosforbemestingsadviezen in Nederland (deels), in Noorwegen (Krogstad et al., 2008) en in Zweden (Albertsson, 2008) herzien. De vroegere bemestingsadviezen waren gebaseerd op te verouderde data, fosfor is ondertussen sterk opgehoopt in de bodems en er zijn veel nieuwe inzichten over het optimale fosforgehalte in gewassen en over fosforbeschikbaarheid in de bodem. Er werd in verschillende veldproeven vastgesteld dat er vanaf een bepaalde fosforbeschikbaarheid geen opbrengststijging meer werd waargenomen. Dit was bijvoorbeeld vanaf P-AL 14 mg P/100 g in Noorwegen (Krogstad et al., 2008), vanaf P-AL 8 mg P/100 g in Zweden (Albertsson, 2008) en vanaf P-AL 5 (maïs) – 9 mg P/100 g (wintertarwe) in Hongarije (Németh, 2006). Voor bodems met een hogere fosforbeschikbaarheid wordt dan geen bemesting

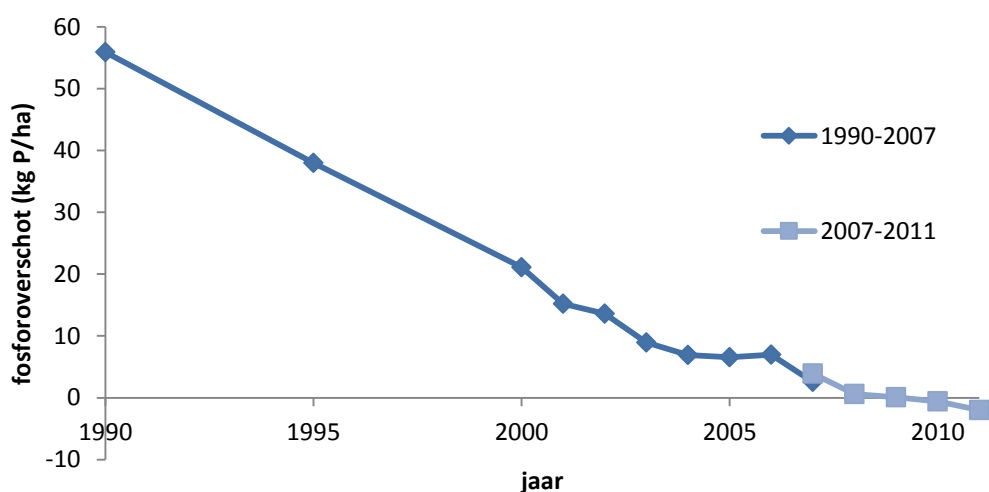
meer geadviseerd. In Vlaanderen worden bij dergelijke fosfortoestanden nog fosforadviezen gegeven die boven 100 kg P_2O_5 /ha/jaar liggen. Meer informatie over de herziening in Nederland is te vinden in deel 4.

Ten slotte zijn niet alleen de adviezen zelf belangrijk, maar ook de interpretatie door de landbouwers. Uit veldstudies en interviews met Nederlandse landbouwers bleek dat 45% van de landbouwers een bodemfosfortoestand boven 'optimaal' willen en meer dan 70% gaf aan onzeker te zijn of de toename in Pw (fosforbeschikbaarheidsmaat in Nederland) wel plantbeschikbaar was. Landbouwers bemesten bijgevolg vaak meer dan de geadviseerde hoeveelheid om risico's te vermijden, ook al zijn ze goed voorgelicht (Reijneveld, 2012; van Rotterdam-Los et al., 2013). Mogelijke oplossingen hiervoor zijn betere en meer intensieve communicatie van adviezen, en meer verfijnde adviezen (bijvoorbeeld op basis van twee in plaats van één bodemparameter, focus op regionale verschillen, update met nieuwe economische data, ...).

7 Effecten van gereduceerde bemesting

7.1 Reductie in bemesting als maatregel om fosforverliezen te beperken

Eén van de maatregelen om de grote fosfordruk vanuit de landbouw naar waterlichamen te verminderen, is het reduceren van de fosforbemesting (zie deel 3 van deze rapportreeks (Amery & Vandecasteele, 2015b)). In Vlaanderen werd de bodembalans de laatste jaren licht negatief (Figuur 12). Verdere verstrenging van de fosforbemestingsnormen kunnen een beperkte fosforuitmijning veroorzaken. Wat de gevolgen zijn van deze reductie in fosforbemesting voor het gewas (opbrengst, fosforgehalte en kwaliteit) en voor de bodem wordt in dit hoofdstuk onderzocht aan de hand van data van langetermijnexperimenten.



Figuur 12. Fosfaatoverschot op de bodembalans van 1990-2007 (bron: MIRA op basis van ILVO, VLM, VMM) en van 2007-2011 (bron: AMS-MIRA op basis van ALV, VLM, VMM) in Vlaanderen.

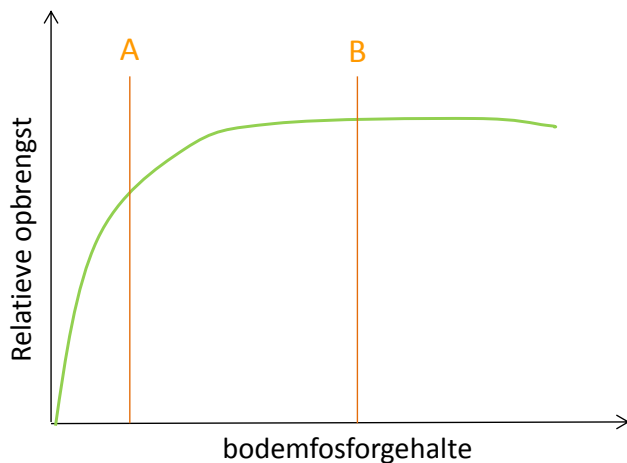
Bij een hogere fosforexport dan fosforinput zal de fosforvoorraad in de bodem verminderen en daardoor ook de fosforvoorziening voor het gewas. De beste methode om de eventuele gevolgen voor het gewas vast te stellen, is om rechtstreeks de effecten op het gewas te meten (opbrengst, fosforgehalte en kwaliteit). Metingen van evoluties in de fosforbeschikbaarheid, gemeten op de bodem in plaats van op het gewas, zijn altijd onrechtstreeks en afhankelijk van de gekozen meetmethode. Sterke chemische extractanten zullen maar zeer traag evoluties waarnemen (Koopmans *et al.*, 2004b). Mildere extractanten zullen sneller veranderingen waarnemen, maar zijn niet zo stabiel in de tijd en meten wellicht een deel van de plantbeschikbare fosfor niet (zie hoofdstuk 2). Studies die verschillen van meetmethodes kunnen bijgevolg moeilijk onderling vergeleken worden. In dit deelrapport worden de evoluties in het bodemfosforgehalte wel besproken, maar de nadruk wordt gelegd op de direct gemeten effecten voor het gewas.

7.2 Beïnvloedende factoren voor effecten

7.2.1 Initieel bodemfosforgehalte

Het initiële bodemfosforgehalte zal het effect van minder bemesting op het gewas beïnvloeden. Aangezien bemestingsdosissen in Vlaamse bodems vaak minder dan 1% van de bodemfosforvoorraden uitmaken (zie

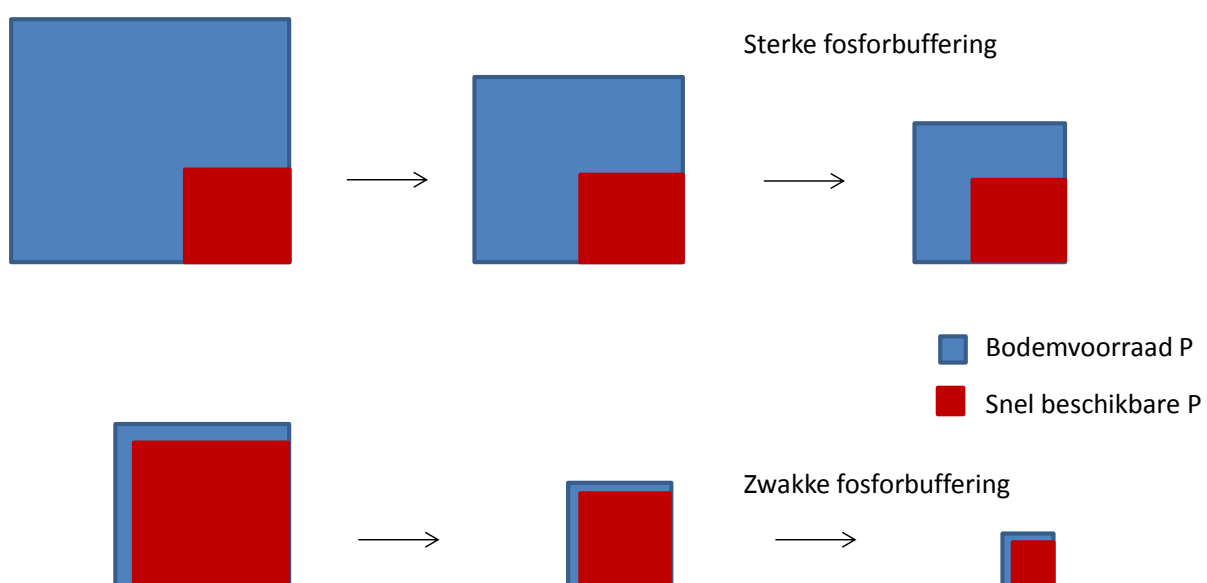
5.2), zal de bemestingsdosis meestal geen of weinig effect hebben bij hoge fosfortoestand (bodem B in Figuur 13). Wanneer echter de fosforvoorraad en de bijhorende fosforbeschikbaarheid kleiner wordt, zijn effecten van verminderde bemesting op het gewas onvermijdelijk (bodem A in Figuur 13).



Figuur 13. Evolutie van de relatieve gewasopbrengst (groene curve) bij toenemend bodemfosforgehalte. Bodem A heeft een lager bodemfosforgehalte dan benodigd voor een optimale opbrengst, bodem B heeft een ruim voldoende bodemfosforgehalte.

7.2.2 Bodembuffercapaciteit

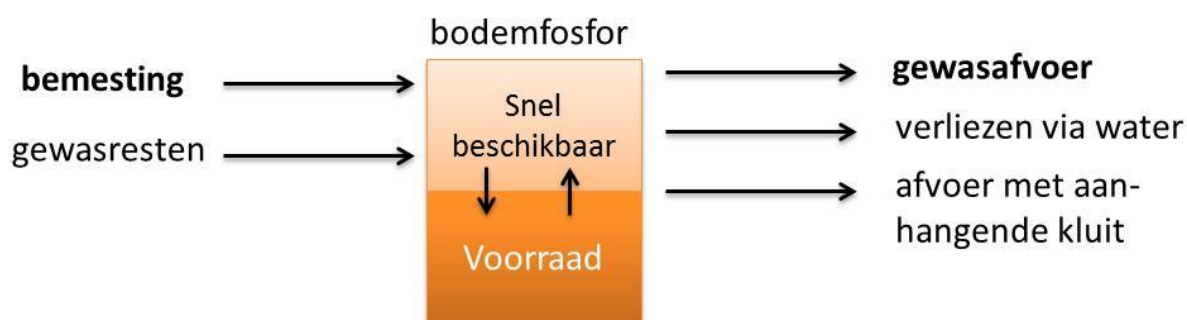
Hoe meer informatie over de fosfortoestand voorhanden is, des te beter is de invloed van gereduceerde bemesting na te gaan (Quintero *et al.*, 2003). Voor bodems met een hoge buffercapaciteit zal de direct beschikbare fosforpool minder snel afnemen bij gereduceerde bemesting, ook al was deze pool initieel kleiner dan in een bodem met lagere buffercapaciteit (Figuur 14).



Figuur 14. Schematisch model voor veranderingen in snel beschikbare fosfor en de fosforvoorraad bij grotere fosforexport dan fosforinput in de bodem, voor een bodem met hoog (boven) of laag (onder) bufferend vermogen (naar Murphy *et al.* (2013)). De rode fractie kan model staan voor $P\text{-CaCl}_2$, de blauwe fractie voor $P\text{-AL}$.

7.2.3 Verschil tussen input en export

Effecten van gereduceerde bemesting zullen groter worden als het verschil tussen input en export van fosfor in de bodem groter wordt (Figuur 15). Input van fosfor bestaat uit fosforbemesting, andere fosforbevattende producten die aan de bodem worden toegevoegd en fosfor in de gewasresten van het voorgaande gewas. De export van fosfor bestaat uit meerdere componenten die bovendien variabel zijn en hieronder besproken worden.



Figuur 15. Input- en exportcomponenten voor fosfor in de bodem

7.2.3.1 Fosforafvoer door het gewas

Gewassen die veel fosfor exporteren, zullen logischerwijs een groter verschil creëren tussen aangevoerde en afgevoerde fosforhoeveelheid bij gereduceerde bemesting. Hoe groter het verschil tussen aan- en afvoer, hoe sneller de gevolgen bij gewas en bodem duidelijk zullen worden. De fosforafvoer door het gewas is afhankelijk van verschillende factoren.

7.2.3.1.1 Soort gewas

Zoals te zien in Tabel 19 verschillen de fosforafvoercijfers sterk van gewas tot gewas. Verschillen kunnen veroorzaakt zijn door een verschil in fosforgehalte (g P/kg gewas) en/of een verschil in gewasopbrengst (ton gewas/ha). Zo voert gras meer fosfor af dan maïs, vooral door het hoger fosforgehalte in gras dan in maïs. Fosforgehalten zijn nog hoger in gewassen als veldbonen en vlas, maar de fosforafvoer van gras is een pak hoger door de hogere grasopbrengsten (Ehlert et al., 2009). Bij een bemesting van 50 kg P_2O_5 /ha zal gras een grote netto fosfaatafvoer hebben, terwijl er bij fruitteelt of bloemkolen een netto fosfaataccumulatie zal optreden. Tussen rassen kunnen ook verschillen geobserveerd worden (Eghball et al., 2003; Ehlert et al., 2009).

Voor gras zal de invloed van gereduceerde bemesting groter zijn dan voor akkerbouwgewassen, niet alleen wegens een grotere onttrekking, maar ook door een kleinere bewortelde bodemdiepte en grotere worteldensiteit.

7.2.3.1.2 Opbrengst

Een grotere gewasopbrengst resulteert in een grotere fosfaatafvoer door het gewas. Bij grotere opbrengsten kan het fosforgehalte in het gewas wat lager liggen, maar dit wordt ruimschoots gecompenseerd door de grotere droge stofopbrengst (Ehlert et al., 2006). Bij goede of slechte omstandigheden kunnen gewasafvoercijfers bijgevolg sterk afwijken van de gemiddelde waarden in Tabel 19. Ter illustratie: voor gras

varieert de gewasexport tussen 40 en 165 kg P₂O₅/ha/jaar in Nederland, voor wintertarwe is dit 26-86 kg P₂O₅/ha/jaar (Ehlert et al., 2009).

Tabel 19. Gemiddelde fosfaatafvoercijfers volgens verschillende bronnen.

Gewas	Fosfaatexport (kg P ₂ O ₅ /ha/jr)		
	Nederland (Ehlert et al., 2009)	Demeter [§]	Lenders et al. (2012)*
Gras	95	117	91-100
Snijmaïs	64	54	71
Korrelmaïs	60	60	
Wintertarwe	54	71	66 (zonder stro)
Triticale	61	55	46 (zonder stro)
Wintergerst	54	65	61 (zonder stro)
Suikerbieten	52	63	64
Aardappel	53	55	52
Kolen	32-64	40-57	39-55
Bloemkool	29	41	22
Prei	34	50	30
Bonen	16-19	79	83
Wortel	62	75	
Vezelvlas	47	18	92
Peer	19		7
Appel	18		9
Sierplanten	26-66		61

[§] Gewasopbrengst obv raming van de productie (FOD Economie), gewasfosforgehaltes op basis van verschillende rapporten en fosfaatgehalten uit de Nederlandse adviesbemesting (de Haan & van Geel, 2013), oorspronkelijke bron 'Kiezen uit gehalten 3. Forfaitaire gehalten voor de mineralenboekhouding (Beukenboom, 1996)'.

* Gemiddelden 2007-2009 obv Landbouwmonitoringsnetwerk (LMN) en ILVO

7.2.3.1.3 Bodemfosfortoestand en fosforbemesting

Fosforgehaltes in het gewas zijn meestal niet heel veel lager bij een lage bodemfosfortoestand dan bij een optimale voorziening (Ehlert et al., 2009). Bij hoge bemestingsdosissen en hoge bodemfosfortoestanden echter kunnen door luxeconsumptie hogere fosforgehaltes waargenomen worden. Dit leidt uiteraard tot hogere fosfaatafvoercijfers.

7.2.3.2 Fosforverliezen

Fosfor kan via watertransport uit de bodem geëxporteerd worden. De verschillende transportroutes en beïnvloedende factoren worden in deel 2 van deze rapportenreeks (Amery & Vandecasteele, 2015a) besproken. Over het algemeen worden de verliezen groter bij een hogere bodemfosfortoestand. Deze verliezen waren volgens de studie over fosforstofstromen in Vlaanderen gemiddeld 3,9 kg P₂O₅/ha/jr in 2009 (Coppens et al., 2013). Enkele metingen in Nederland wijzen op fosforverliezen tussen 1 en 9 P₂O₅/ha/jr, slechts een fractie van de fosforafvoer door het gewas (Tabel 19).

7.2.3.3 Fosforafvoer met de aanhangende kluit

Fosfor kan ook geëxporteerd worden door afvoer van de aanhangende kluit. Dit is niet bij alle gewassen het geval. Gemiddeld zou dit 1-1,5 kg P_2O_5 /ha betreffen, maar voor bieten kan dit oplopen tot 5 kg P_2O_5 /ha. Aangezien de bodem echter mee geëxporteerd wordt, zal deze fosforafvoer geen invloed hebben op het fosforgehalte van de bodem.

7.2.3.4 Vastlegging van fosfor door de bodem

Strikt genomen is de vastlegging van fosfor door de bodem geen exportfactor aangezien deze fosfor in de bodem aanwezig blijft en op termijn beschikbaar kan worden voor het gewas. Soms wordt deze factor echter wel in rekening gebracht, bijvoorbeeld in de term 'onvermijdbare verliezen' die in Nederland gehanteerd wordt. Deze onvermijdbare verliezen verwijzen naar de extra bemestingshoeveelheid die bovenop de gewasexportcijfers moet toegediend worden om de bodemfosfortoestand constant te houden. Hoe groot deze is, zal dus afhangen van de methode waarmee de bodemfosfortoestand wordt gemeten (zie hoofdstuk 2), waardoor duidelijk wordt dat dit eerder een theoretische fractie is.

7.3 Analyse van langetermijnexperimenten

Verschillende langetermijnexperimenten werden bestudeerd om de effecten van gereduceerde bemesting te kwantificeren. Enkel studies met gereduceerde fosforbemesting werden geselecteerd. Het is belangrijk dat de andere nutriënten in voldoende mate bemest worden zodat verschillen in respons louter verklaard kunnen worden door het effect van fosforbemesting. Daarom zijn bijna alle vermelde langetermijnexperimenten uitgevoerd met enkel minerale bemesting. Een gedetailleerde analyse is niet voor elke studie mogelijk, omdat niet altijd alle gegevens beschikbaar zijn. Voor een kwantificatie van de netto fosforinput (bemesting – export) zijn fosforexportgegevens nodig, en die zijn vaak niet voorhanden. Indien mogelijk werden deze ingeschat op basis van nationale opbrengstgegevens en fosforgehaltes in het gewas.

Gezien de invloed van het initieel bodemfosforgehalte (zie 7.2.1) wordt deze ook gerapporteerd. Daarbij wordt met behulp van een kleurcode weergegeven in welke fosforfertiliteitsklasse (laag, voldoende, hoog,...) dit gehalte zich bevindt (zie Tabel 20 en Tabel 21 voor meer details). Voor P-AL wordt de Vlaamse indeling gebruikt, voor andere methodes wordt de indeling gebruikt die in het desbetreffende land gangbaar is.

Gras wordt apart behandeld (deel 7.3.1), naast de akkerbouwgewassen (deel 7.3.2). Omwille van eerder aangehaalde redenen (hogere export en kleinere bodemdiepte) worden effecten voor gras sneller verwacht dan voor akkerbouwgewassen.

7.3.1 Gras

Een samenvatting van de langetermijnexperimenten rond gereduceerde fosforbemesting bij gras is weergegeven in Tabel 20.

Toepassen van gereduceerde bemesting kan een gevolg hebben voor de grasopbrengst. In de Nederlandse experimenten wordt over het algemeen een effect van bemesting gevonden, zelfs indien meer fosfor toegediend wordt dan geëxporteerd wordt door het gewas. Opbrengstverschillen variëren tussen 0,9 ton/ha in een zeer arme fosforbodem tot geen verschillen in een bodem in de fosforklasse 'tamelijk hoog'. Algemeen worden geen of nauwelijks effecten gevonden bij bodemfosforgehaltes boven de streefzone. Bij

de meeste experimenten op de Britse eilanden worden geen of beperkte opbrengstreducties geobserveerd bij verschillende fosforbestedingsniveaus (waaronder het weglaten van bemesting). Grote reducties (-6 ton/ha) werden wel waargenomen in Nieuw-Zeeland nadat gedurende 21 jaar niet bemest werd.

Effecten van gereduceerde bemesting op fosforgehaltes in het gras manifesteren zich sneller dan effecten op opbrengst. Deze verschillen in fosforgehaltes zijn enkel in de Nederlandse (en Zwitserse) veldproeven waargenomen, maar lopen op tot meer dan 1 g P/kg bij verschillen van 80 kg P₂O₅/ha/jaar (laag tot tamelijk laag bodemfosforgehalte). In één studie met 4 locaties werden zelfs bij evenwichtsbemesting fosforgehaltes waargenomen onder de kritieke waarde voor veevoeder (3,5 g P/kg).

Over het algemeen wordt er een reductie van het bodemfosforgehalte geobserveerd bij lagere fosforinput dan fosforexport, soms ook indien de netto fosforinput licht positief is. Dit kan wijzen op het verplaatsen van een deel van de fosfor in de bodem naar fracties die niet geëxtraheerd kunnen worden met de gebruikte extractiemethode. Dit wil echter niet meteen zeggen dat deze fracties niet meer beschikbaar zijn of kunnen worden voor het gewas.

7.3.2 Akkerbouwgewassen

Een samenvatting van de langetermijnexperimenten rond gereduceerde fosforbemesting bij akkerbouwteelten is weergegeven in Tabel 21.

Er worden bijna nooit opbrengsttoenames geobserveerd bij bemesten van grotere fosforhoeveelheden dan de fosforexport door het gewas. Er zijn wel opbrengstverschillen mogelijk tussen nulbemesting en evenwichtsbemesting (bemesting = fosforexport), en dit hangt af van de duur van het veldexperiment en het initiële bodemfosforgehalte. Bij experimenten korter dan 10 jaar worden nagenoeg geen opbrengstreducties bij nulbemesting waargenomen, met uitzondering van experimenten op bodems met zeer lage fosforgehaltes. Verschillen worden over het algemeen pas duidelijk voor studies die langer dan 10 jaar lopen. Voor bodems met een laag fosforgehalte dalen opbrengsten bij nulbemesting 10% tot 30%, voor een initieel voldoende fosforgehalte zijn verschillen afwezig of kleiner dan 10%. Voor bodems met een hoog fosforgehalte wordt in de eerste twintig jaar geen of nauwelijks een effect verwacht, daarna zijn wel verschillen mogelijk maar deze zijn beperkt tot 10%. Een uitzondering op dit alles vormen de aardappelen: voor dit fosforbehoefstig gewas kunnen de verschillen tussen de bestedingsniveaus groter zijn en sneller optreden dan voor andere gewassen. Wellicht zijn ook sommige groenten (andijvie, selder,...) wel gevoelig voor fosforbemesting door het korte groeiseizoen, vooral bij een laag onmiddellijk beschikbaar fosforgehalte in de bodem (Verhaeghe, 2014b). Echter, ook na zeer lange periodes zonder bemesting (>70 jaar) vallen bodemfosforgehaltes niet naar nul en blijven gewassen significante fosforhoeveelheden exporteren, afkomstig van de bodemreserve (Karpinets et al., 2004).

Opbrengstreducties door nulbemesting kunnen dus na meer dan 10 jaar, afhankelijk van het bodemfosforgehalte, verwacht worden. Dit is echter snel omkeerbaar. In de veeljarige trappenveldproef in het Nederlandse Lelystad (met P-AL-gehalte in Vlaamse streefzone) werd vastgesteld dat er na 15 jaar nulbemesting gemiddeld een 8% lagere opbrengst werd bekomen dan bij een bestedingsniveau iets hoger dan de fosfaatafvoer (van Wijk et al., 2013). Dit opbrengstverschil verdween nadat het veld zonder bemesting 3 jaar bestedingsdosissen had gekregen zoals op het ander veld.

Verschillen in fosforgehaltes van gewassen treden sneller en vooral in grotere mate op dan verschillen in opbrengst. Soms worden na 15 jaar nog geen verschillen in opbrengst geobserveerd, terwijl de verschillen in fosforgehalte enkele tientallen percenten bedragen. Er zijn ook hogere fosforgehaltes bij meer bemesten dan de gewasexport, wat kan wijzen op luxeconsumptie van fosfor.

Het bodemfosforgehalte blijft veelal gelijk of daalt licht bij evenwichtsbemesting. Een daling van het bodemfosforgehalte bij gelijke input als output is mogelijk doordat een deel van de bodemfosfor in de tijd minder extraheerbaar, maar daarom niet per se minder plantbeschikbaar wordt (Karpinets et al., 2004). Bij nulbemesting daalt het fosforgehalte in de bodem, de grootte van deze daling is afhankelijk van bodemeigenschappen (Sharpley & Rekolainen, 1997) en van de extractiemethode (Ehlert et al., 2014b). Het P-AL-gehalte daalde in de langetermijnexperimenten niet meer dan 7 à 8 mg P/100 g, zelfs na 25-45 jaar zonder bemesting. Voor mildere extractiemethodes als P-Olsen, P_{DL} en Mehlich 3 worden sterkere dalingen waargenomen dan voor P-AL, wat wijst op de relativiteit van de fosforbeschikbaarheidsmeting. De mildere extractiemiddelen meten een groot stuk van de fosforhoeveelheid die beschikbaar is voor de plant, niet, maar zijn eerder een maat voor de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid. Zelfs P-AL meet niet alle beschikbare fosfor. Na 23 jaar nulbemesting in een experiment in Ath (België) werd een daling van P-AL van 16 mg P/100 g (streefzone) naar 8 mg P/100 g (laag) geobserveerd (Vandendriessche et al., 1994). Dit komt overeen met het 'verdwijnen' van ongeveer 630 kg P_2O_5 /ha gemeten door de ammoniumlactaatextractie. De gewassen hebben echter bijna het dubbele van deze hoeveelheid afgevoerd, waaruit besloten kan worden dat het gewas meer fosfor ter beschikking heeft dan gemeten door de P-AL-methode. Dit is vermoedelijk wel afhankelijk van gewas tot gewas: terwijl suikerbieten en granen geen verschillen in opbrengst geven tussen nulbemesting en meer bemesten na 23 jaar, is dit wel het geval voor aardappelen. Ook in experimenten in Engeland was duidelijk dat de daling in extraheerbare P (Olsen-P) bij nulbemesting veel kleiner was dan de gewasafvoer, wat het bewijs is voor aanvulling vanuit een niet-extraheerbare bodemfractie (Johnston & Dawson, 2005). Een alternatieve verklaring is fosforvoorziening vanuit bodemlagen dieper dan de staalnamediepte.

Tabel 20. Resultaten van langetermijnexperimenten met gereduceerde fosforbemesting bij grasteelt. Effecten worden weergegeven als evolutie (verloop in de tijd) of als verschil (Δ , tussen verschillende behandelingen). Verschillende behandelingen worden gescheiden door '/'. Bodemfosforgehaltes worden ingedeeld in klassen volgens kleurcode: **rood**: laag, **geel**: tamelijk laag, **groen**: streefzone/voldoende, **blauw**: tamelijk hoog, **paars**: hoog, **grijs**: zeer hoog. Indeling is gebaseerd op classificatie voor P-AL van de Bodemkundige Dienst van België (Maes et al., 2012), op nationale classificatie bij andere methoden.

Referentie	Land	Looptijd (jaar)	Bodemfosforklasse	Netto input (kg P ₂ O ₅ /ha/jr) ^a	Effect op		
					opbrengst (ton/ha)	fosforgehalte (g P/kg)	bodemfosfor
(Verloop et al., 2010)	Nederland	18	P-AL 33 mgP/100g	-2	Evolutie: geen	Evolutie: geen	Evolutie: Pw -26%, P-AL -25%, P _{tot} -16%
(Aarts et al., 2008)	Nederland	5	P-AL 4 mgP/100g	-40/-20/0/+20/+40	Δ : -0,2/-0,1/0/+0,1/+0,3	Δ : -0,3/-0,1/0/+0,1/+0,3	P-AL blijft ongeveer gelijk bij netto input van 0 kg P ₂ O ₅ /ha/jr
			P-AL 11 mgP/100g			Δ : -0,5/-0,2/0/+0,2/+0,4	
			P-AL 10 mgP/100g			Δ : -0,5/-0,2/0/+0,2/+0,5	
			P-AL 14 mgP/100g			Δ : -0,6/-0,3/0/+0,3/+0,6	
(Aarts et al., 2008)	Nederland	6	P-AL 4-5 mgP/100g	+16/+57	Δ : +0,9	Δ : 0,3	+1/+10
(van Middelkoop et al., 2004; van Middelkoop et al., 2007; Ehlert et al., 2008; van Middelkoop & van der Salm, 2008; van Krimpen et al., 2010; van Middelkoop et al., 2012; van Middelkoop et al., 2014)	Nederland	15	P-AL 22 mgP/100g	0/+20/+40	Δ 0-40: geen statistisch effect	Δ 0-40: +0,4 (bij evenwichtsbemesting: 3,4 g P/kg, onder kritieke gehalten voor veevoeding)	Evolutie: -6/-6/0
			P-AL 17 mgP/100g		Δ 0-40: +0,5		Evolutie: -2/3/5
			P-AL 25 mgP/100g		Δ 0-40: geen statistisch effect	Δ 0-40: +0,1	Evolutie: 0/+6/+9
			P-AL 18 mgP/100g		Δ 0-40: +0,6	Δ 0-40: +0,3	Evolutie: -5/+2/+3

(Tunney et al., 1999; Power et al., 2005)	Ierland	10	Morgan 5 mg P/l	-95/-49/-26 /-3/20 ^b	Grootste verschil: 1,0	-	-2(laagst)/0(hoogst)
			Morgan 11 mg P/l				-5(laagst)/0(hoogst)
			Morgan 40 mg P/l				-26(laagst) /-23(hoogst)
(Herlihy et al., 2004)	Ierland, 31 velden	4	Gemiddeld Morgan 4,3 mg P/l	-57/-27/-7	Bij 25% significant hogere opbrengst bij meer bemesten	-	-2,6/-2,0/0
			Gemiddeld Morgan 13 mg P/l	-82/-47/-6	Bij 10% significant hogere opbrengst bij meer bemesten		-8,2/-5,9/-2,7
(Tunney et al., 1997)	Ierland	9	? (beperkte dierlijke bemesting in het verleden)	-92/+23	Geen verschillen	-	-
(Adams, 1974)	Noord-Ierland, 16 velden	2-3	Variabel	-30/0/+30 ^b	Geen verschillen	Geen verschillen	-
(Withers et al., 1999)	Engeland	3	+/- 20 mg Olsen-P/kg	+7/+39/+53	Geen verschillen	Geen verschillen	-
(Dodd et al., 2012)	Nieuw-Zeeland	26	29/28/51 mg Olsen-P/kg	Geen bemesting	Evolutie 4 jaar: alleen reductie (10-13%) voor hoogste P-bodem	-	Evolutie: -1/-6/-17
		7	26/39 mg Olsen-P/kg	Geen bemesting	Geen significante evolutie		Geen significante evolutie
		21	23/29 mg Olsen-P/kg	Geen bemesting	Evolutie: -6		Evolutie: -5/-7
		16	37/42 mg Olsen-P/kg	Geen bemesting	-		Evolutie: -15
(Gallet et al., 2003a)	Zwitserland	9	P _i 410 mg P/kg	-31/+21/+53	Geen verschillen	P-opname: verschil na 4 jaar	Evolutie: -/+10%/+45%

^a Netto input = Bemestingsdosis – fosforexport door het gewas. De fosforexport werd gemeten of geschat (^b)

^b Fosforexport werd niet gemeten maar geschat op basis van nationale opbrengstcijfers en fosforgehaltes.

Tabel 21. Resultaten van langetermijnexperimenten met gereduceerde fosforbemesting bij akkerbouwteelten. Effecten worden weergegeven als evolutie (verloop in de tijd) of als verschil (Δ , tussen verschillende behandelingen). Verschillende behandelingen worden gescheiden door '/'. Bodemfosforgehaltes worden ingedeeld in klassen volgens kleurcode: **zeer laag**, **laag**, **tamelijk laag**, **streefzone/voldoende**, **tamelijk hoog**, **hoog**, **zeer hoog**. Indeling is gebaseerd op classificatie voor P-AL van de Bodemkundige Dienst van België (Maes et al., 2012), op nationale classificatie bij andere methoden.

Referentie	Land	Looptijd (jaar)	Gewas	Bodem-fosforklasse	Netto input (kg P ₂ O ₅ /ha/jr) ^a	Effect op		
						opbrengst	fosforgehalte	bodemfosfor
(van Krimpen et al., 2010)	Neder-land	3/6	snijmaïs	Pw 30-35 mg P ₂ O ₅ /l	-34/+16 ^b	-	Geen Δ	-
(Reijneveld et al., 2003)	Neder-land	9	Voederbiet, maïs, triticale, gras/klover	PAL 62 mgP/100g	-72/-47/-28	Geen Δ	-	Lichte daling, blijft zeer hoog
(Krey et al., 2013)	Duits-land	10	maïs	FVG: +/- 45%, DL 33-46 mg P/kg	-60/0	Δ : 1 ton/ha	-	Δ : 3,8% FVG, DL: 52%
(Djodjic et al., 2005)	Zweden	30-40	Vershil-lende	PAL 5-10 mgP/100g	-29/0/+75	Afvoer: verschillen		dalen/ -1 /stijgen
(Vandendriessche et al., 1994)	België	23	Aardappel, suikerbieten, granen	PAL 16 mgP/100g	-49/+17/+148	Δ aardappel: -25%/ suikerbieten en granen: geen Δ	-	-8/-3/+3
(Alblas & van der Schoot, 2000)	Neder-land	14	Bieten, granen, groenten	Pw 24 mg P ₂ O ₅ /l, PAL 12 mgP/100g	-37/+25/+94/+224	Δ :-8%/geen Δ bij meer bemesten	-	Evolutie (-37): Pw -8, PAL -2; (+25): Pw +10, PAL +3
(Withers et al., 1999)	Enge-land	3	Gras en maïs	P-Olsen 20 mg/l	+7/+39/+53	Geen Δ	-	-
(Legrand et al., 2012)	België	45	Biet, wintertarwe, wintergerst	Voldoende	-60/0/+60	Geen Δ eerste 20 jr. Na 40 jr: -8-10% suiker biet/geen Δ bij meer bemesten	-	Δ PAL 45 jaar: -7/0/+6

(Ellmer et al., 2000)	Duits-land	60	Gerst, aardappelen, snijmaïs	Laag?	-37/+9	Δ na 40-60 jr: gerst -13%, aardappelen -18%, snijmaïs -2%	Δ P-afvoer na 25-60 jr: -20%, wellicht 10% verschil in P-gehalte	-
(Spiegel et al., 2001; Lindenthal et al., 2003)	Oosten-rijk	40	verschillende	P_{DL} 4,2/1,3/6,3 mg P/100g	-35/+63	Δ na 20-40 jr: granen -31→+8%; suikerbiet -35→-25%; maïs -9→+1%; aardappelen -22→-12%; groenten -26→+10%	Groter Δ bij afvoer dan bij opbrengst	-
(Ehlert et al., 2003; Ehlert et al., 2008; Dekker & Ehlert, 2010; Ehlert & Dekker, 2010; van Wijk et al., 2013)	Neder-land	24	Granen, suikerbiet, groenten, aardappel	P-AL 12 mg P/100g	-36/+45/+133/+290	Δ na 19-24 jr: -8%/0/-1%/0 (enkel bij aardappel effect van meer bemesten)	Δ afvoer na 19-24 jr: -16%/0/+6%/+15%	Evolutie PAL -1/+4/+10/+18
		36		P-AL +/-13 mg P/100g	Ongeveer: -30/+15/+70/+125	Geen verschillen	Wel verschillen	ΔPAL -4/0/+2/+7
(Vanden Nest et al., in prep)	België	4	Maïs, aardappelen, voederbiet, zomergraan	P-AL 21 mg P/100g	-75/+17	Geen verschillen	Geen verschillen	Geen verschillen
(Messiga et al., 2010)	Frank-rijk	17	Maïs	P-Olsen 17 mg/kg	-55/0/+116	Δ na 13-17 jr: -7%/geen Δ bij meer bemesten	Δ over 17 jr: -6%/0/+6%	Evolutie P-Olsen: -13/0/+28

(Dodd & Mallarino, 2005)	USA	22	Maïs en soja	Mehlich 22 mgP/kg	-40/-20/0/+20 ^b	Enkel Δ met laagste dosis na 10-15 jr, geen Δ bij meer bemesten	-	Evolutie P-Mehlich: -16/-11/+3/+20
		21		Mehlich 17 mgP/kg	-40/-20/0/+20 ^b	Na 4 jr Δ met laagste dosis, na 20 jr ook bij meer bemesten	-	Evolutie P-Mehlich: -9/-6/+5/+33
		23		Mehlich 28 mgP/kg	-40/0/+40 ^b	Enkel Δ met laagste dosis na 16-20 jr	-	Evolutie P-Mehlich: -18/+14/+70
(Gallet <i>et al.</i> , 2003a)	Zwitserland	9	Gras, granen, maïs en aardappel	P _i 500 mg P/kg	-16/+2/+21	Na 5 jr Δ, eerst voor aardappel	P-opname: Δ na 3 jaar	Geen evoluties
				P _i 440 mg P/kg	-23/+5/+26	Geen Δ	P-opname: geen Δ	Evolutie: -17%/-8%/-
				P _i 390 mg P/kg	-29/+3/+24	Geen Δ	P-opname: geen Δ	Evolutie: -19%/-/-
				P _i 445 mg P/kg	-30/+2/+22	Geen Δ	P-opname: geen Δ	Evolutie: -21%/-8%/-
				P _i 950 mg P/kg	-22/+2/+18	Geen Δ	P-opname: geen Δ	Evolutie: -4%/-/-
		27	Raap, maïs en granen	P _i 500 mg P/kg	-37/+34/+88	Geen Δ	P-opname: geen Δ	Evolutie: -12%/+16%/+25%
(Richards <i>et al.</i> , 1998)	Engeland	29	Gerst	P-Olsen 17 mg P/kg	-34/-16/+4/+45	Gemiddeld over 29 jr: -7%/0/+2%/+7%	Δ P-opname gemiddeld over 29 jr: -10%/0/+4%/+9%	Δ: -35%/0/+8%/+66%
(Gransee & Merbach, 2000)	Duitsland	50	Alfalfa, aardappel, winterrogge, suikerbiet, gerst	P _{DL} 9,4 mg P/100 g	-45/-16/+37	Enkel Δ na 25 jr voor laagste dosis (-18% na 45 jr)	Δ over 50 jr: 0/+2%/+4%	Evolutie: -63%/-49%/-7%

(Jungk et al., 1993)	Duits-land	15	Suikerbiet (sb) en granen (gr)	Pw 32 mg P/L	-62/+25/+109	Δ over 15 jr: 0/-1%/-1%	Δ na 14 jr: 0/+16%/+11% (gr) 0/+5%/+34% (sb)	Evolutie 15 jr: -5/+17/+33
				Pw 22 mg P/l	-63/+29/+117	Δ over 15 jr: 0/+1%/+1%	Δ na 14 jr: 0/+6%/+6% (gr) 0/+45%/+67% (sb)	Evolutie 15 jr: -10/+12/+30
				Pw 20-37 mg P/l	-69/+23/+110	Δ over 15 jr: 0/+2%/+1%	Δ na 14 jr: 0/+20%/+23% (gr) 0/+14%/+40% (sb)	Evolutie 15 jr: -9/0/0
(Sims et al., 2013)	USA	11	Maïs en soja	Mehlich 98/70 mg/kg	Geen bemesting	Geen effect	-	Evolutie: -43%/-27%
(Valkama et al., 2011)	Finland	2-16	Granen	Laag	Geen bemesting/optimaal	Δ :17-27%	-	-
				Voldoende		Geen Δ	-	-
				Hoog		Geen Δ	-	-
(Giroux & Royer, 2007)	Canada	8	Maïs, soja en granen	Mehlich: 394 kg P/ha	-43/-14/+15	Geen Δ	-	Evolutie: -124/-113/-100
				Mehlich: 354 kg P/ha	-43/-15/+14	Geen Δ	-	Evolutie: -118/-101/-39
(Renneson et al., 2013b)	België	41-49	Bieten, granen	Acetaat-lactaat 19 mg P/100g	- (geen)/0/+	Δ : -7%/0/+2%	-	Evolutie: -13/-5/+2
(Svanbäck et al., 2014)	Zweden	5	Granen, erwten	P-AL 5 mg P/100 g	-25/+16	Δ : -7%/0		Geen Δ

^a Netto input = Bemestingsdosis – fosforexport door het gewas. De fosforexport werd gemeten of geschat (^b)

^b Fosforexport werd niet gemeten maar geschat op basis van nationale opbrengstcijfers en fosforgehaltes of gelijkaardige studies.

7.4 Effecten op kwaliteit

Een gewas heeft voldoende beschikbare fosfor nodig voor zaad- en wortelvorming, voor de sterkte van stro (graangewassen) en voor het opslaan en vrijgeven van energie in het celmetabolisme (Haygarth & Jarvis, 1999). Bijgevolg zal fosforgebrek vooral een effect hebben op de opbrengst. Zo kan fosfortekort zich uiten in gereduceerde bladgroei en daardoor beperkte lichtinterceptie (Pellerin & Nesme, 2013). Bij granen wordt het uitstoelen beïnvloed. Fruitbomen vertonen vertraagde groei van nieuwe takken en vaak is de ontwikkeling en opening van nieuwe knoppen onvoldoende (Mengel & Kirkby, 1982).

Symptomen van fosforgebruik worden vaak eerst in de oude delen van de plant waargenomen, meestal door roodverkleuring door anthocyanines. Verminderde fosforbeschikbaarheid kan resulteren in een lager fosforgehalte in het gewas, wat voor voedergewassen eventueel een probleem kan worden indien het fosforgehalte beneden een kritische waarde daalt. Effecten op gewaskwaliteit worden zelden geobserveerd (niet vernoemd in de studies in Tabel 20 en Tabel 21), tenzij ze rechtstreeks in verband staan met de gewasopbrengst. Zo uit een fosfortekort bij granen zich in beperktere groei, kortere periode van graanvulling, een kleiner aantal vruchtbare scheuten en latere afrijping van de graankorrel, welke allemaal een effect hebben op de gewasopbrengst (Johnston, 2000; Noack et al., 2010). In een veeljarig fosfaattrappenveldproef in Nederland werd geconstateerd dat bij een fosforbeschikbaarheid onder een kritische waarde de kropvorming van sla sterk wordt geremd en dat de begingroei van zaaiuien achterblijft bij die van hogere toestanden (Dekker & Postma, 2008). Vorming van fruit en zaden bij fruitbomen kan onderdrukt worden bij fosfortekort (Mengel & Kirkby, 1982). In het Verenigd Koninkrijk werden 22 groenten en landbouwgewassen in 56 experimenten getest op effecten van fosforbemesting op opbrengst, fosforgehalte en kwaliteit (Greenwood et al., 1980). Vooral effecten op opbrengst en fosforgehalte werden waargenomen, de effecten op kwaliteit waren zeer klein. Onder deze laatste werden volgende fenomenen geobserveerd:

- Fosfortoediening kan bladverbranding bij spinazie onderdrukken
- Fosfortoediening kan soms stamrot in zomerkool wegnemen
- Fosfortoediening kan het vormen van bloeistengels bij uien beïnvloeden
- Fosfortoediening kan het aantal beschadigde spruiten beïnvloeden

8 Referenties

- Anon. 1996. NEN 5704. Bodem. Monstervoorbehandeling van grond. Extractie met een calciumchloride-oplossing (0,01 mol/l). Delft, Nederlands Normalisatie-instituut.
- Anon. 2009. Fertilisation PK. France, Comifer.
- Anon. 2010a. Bodem - Bepaling van fosfaat in grond extraheerbaar met een ammoniumlactaat-azijnzuurbuffer (P-AL). Brussel, VLM.
- Anon. 2010b. Fertiliser Manual (RB209), 8th Edition. Norwich, UK, The Stationary Office, Department for Environment Food and Rural Affairs.
- Anon. 2011a. Decreet van 22 december 2006 houdende de bescherming van water tegen de verontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen.
- Anon. 2011b. Soil analysis: key to nutrient management planning. York, The Potash Development Association.
- Anon. 2012a. Bijlage L. behorende bij artikel 103a van de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet. Protocol voor de bemonstering van de bodem ter bepaling van het PAL-getal en het Pw-getal (fosfaattoestand gronden laag, neutraal, hoog; derogatie).
- Anon. 2012b. Coalla 2012. Ringtest VITO. Mol, VITO.
- Anon. 2012c. Gemiddelde samenstelling van Vlaco-compost. <http://www.vlaco.be/professionele-verwerking/eindproducten/gemiddelde-samenstelling>.
- Anon. 2012d. P-11V1 Méthode d'échantillonnage des sols agricoles. Liège, Institut Scientifique de Service Public.
- Anon. 2012e. Soil sampling. <http://www.jseco.co.uk/services/soil-sampling>. Grantham, Johnson's Soil Eco-Systems.
- Anon. 2013a. Bijlage I van het Koninklijk Besluit van 28 januari 2013 betreffende het in de handel brengen en het gebruiken van meststoffen, bodemverbeterende middelen en teeltsubstraten.
- Anon. 2013b. Koninklijk besluit betreffende het in de handel brengen en het gebruiken van meststoffen, bodemverbeterende middelen en teeltsubstraten, bl. 14890. 28 januari 2013.
- Anon. 2013c. Regeling van de Minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit van 4 november 2005, nr. TRCJZ/2005/3295, houdende regels van de Meststoffenwet (Uitvoeringsregeling Meststoffenwet).
- Anon. 2013d. 7-1-2013d. Soil - Part 6: Phosphorus and potassium in the soil. USA, Plant & Soil Sciences eLibrary.
- Anon. 2014. N. Brussel, VLM.
- Aarts, H. F. M., den Boer, D. J., van Middelkoop, J. C., & Oenema, J. 2008. Landbouwkundige gevolgen van het aanscherpen en differentiëren van fosfaatgebruiksnormen voor de melkveehouderij. Plant Research International B.V., Wageningen.
- Abrams, M. M. & Jarrell, W. M. 1992. Bioavailability index for phosphorus using ion exchange resin impregnated membranes. *Soil Science Society of America Journal*, **56**, 1532-1537.
- Achat, D. L., Sperandio, M., Daumer, M. L., Santellani, A. C., Prud'Homme, L., Ekhtar, M. & Morel, C. 2014. Plant-availability of phosphorus recycled from pig manures and dairy effluents as assessed by isotopic labeling techniques. *Geoderma*, **232-234**, 24-33.
- Adams, S. N. 1974. Response of pastures in Northern-Ireland to N,P and K fertilizers and to animal slurries. 3. Effects in experiments continued for either 2 or 3 years. *Journal of Agricultural Science*, **82**, 129-137.
- Akhtar, M., McCallister, D. L. & Eskridge, K. M. 2002. Availability and fractionation of phosphorus in sewage sludge-amended soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **33**, 2057-2068.
- Albertsson, B. 2008. New P recommendations in Swedish agriculture. Rubaek, G. H. Stockholm, Nordiska jordbruksforskarens förening 4.
- Alblas, J. & van der Schoot, J. R. 2000. Pw-getal zegt niet alles... Kennisakker.nl.

- Amery, F. & Vandecasteele, B. 2015a. Wat weten we over fosfor en landbouw? Deel 2: Fosforverliezen en gevolgen voor water. Merelbeke, ILVO.
- Amery, F. & Vandecasteele, B. 2015b. Wat weten we over fosfor en landbouw? Deel 3: Mogelijke maatregelen om fosforconcentraties in water te verlagen. Merelbeke, ILVO.
- Amery, F., Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2013. ILVO-mededeling 137: Vlarisub ringtest mei 2013. Merelbeke, ILVO.
- Amery, F., Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2014a. ILVO-mededeling 154: Vlarisub ringtest november 2013. Merelbeke, ILVO.
- Amery, F., Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2014b. ILVO-mededeling 163: Vlarisub ringtest mei 2014. Merelbeke, ILVO.
- Amery, F., Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2015a. ILVO-mededeling 13: Vlarisub ringtest mei 2014. Merelbeke, ILVO.
- Amery, F., Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2015b. ILVO-mededeling 180: Vlarisub ringtest november 2014. Merelbeke, ILVO.
- Anderson, D. L., Snyder, G. H. & Warren, J. D. 1992. Availability of phosphorus in calcium silicate slag. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **23**, 907-918.
- Asghari, H. R., Chittleborough, D. J., Smith, F. A. & Smith, S. E. 2005. Influence of arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis on phosphorus leaching through soil cores. *Plant and Soil*, **275**, 181-193.
- Aurell, A. 2000. Evaluation of the P-AL method for fertilization of barley (*Hordum vulgare* L.), in relation to soil properties, especially P sorption. *Examensarbete - Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap, avd.för växtnäringslära*, **117**.
- Bachmann, S. & Eichler-Lobermann, B. 2010. Soil phosphorus pools as affected by application of poultry litter ash in combination with catch crop cultivation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **41**, 1098-1111.
- Baert, L., Depuydt, S., De Smet, J., Hofman, G., Scheldeman, K., Vanderdeelen, J., Van Meirvenne, M., Lookman, R., Merckx, R., Schoeters, I., Vlassak, K., De Gryse, S., Hartmann, R., Seuntjes, P., Verplancke, H., & Verschoore, P. 1997. Fosfaatverzaadiging van zandige bodems in Vlaanderen. Meise, Vlaamse Landmaatschappij.
- Bai, Z. H., Li, H. G., Yang, X. Y., Zhou, B. K., Shi, X. J., Wang, B. R., Li, D. C., Shen, J. B., Chen, Q., Qin, W., Oenema, O. & Zhang, F. S. 2013. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant and Soil*, **372**, 27-37.
- Beckie, H. J. & Ukrainetz, H. 1996. Lime-amended acid soil has elevated pH 30 years later. *Canadian Journal of Soil Science*, **76**, 59-61.
- Bittman, S., Liu, A., Hunt, D. E., Forge, T. A., Kowalenko, C. G., Chantigny, M. H. & Buckley, K. 2012. Precision placement of separated dairy sludge improves early phosphorus nutrition and growth in corn (*Zea mays* L.). *Journal of Environmental Quality*, **41**, 582-591.
- Blake, L., Johnston, A. E., Poulton, P. R. & Goulding, K. W. T. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil*, **254**, 245-261.
- Bodemkundige Dienst van België & Universiteit Gent .2009. Ontwikkelen van een expertsysteem voor het adviseren van het koolstofbeheer in de landbouwbodems. Brussel, Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie.
- Bomans, E., Fransen, K., Gobin, A., Mertens, J., Michiles, P., & Vandendriessche, H. 2005. Addressing phosphorus related problems in farm practice, Final report to the European Commission. Bodemkundige dienst België.
- Braekevelt, A., Hoekstra, B., Boogaerts, C., Anthonissen, E., Vandaele, E., Van Dale, G., Vandenbroucke, I., Vandenbroek, K., Van Stichelen, K., & Vanden Auweele, W. 2013. Vlaco activiteitenverslag 2012. Mechelen, Vlaamse Compostorganisatie vzw.
- Braems, B 2011. *Effecten van wortellexudaten op de fosforbeschikbaarheid in fosfaatverzaadigde bodems*. Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, UGent, Gent.

- Brandsma, J., van Middelkoop, J. C., Philipsen, A. P., Talens, B., Bussink, D. W., Bos, A. J., Velthof, G. L., van Dijk, W., Schröder, J. J., Abbink, G., & van Eekeren, N. 2012. Bemestingsadvies. Lelystad, Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen.
- Bünemann, E. K., Heenan, D. P., Marschner, P. & McNeill, A. M. 2006. Long-term effects of crop rotation, stubble management and tillage on soil phosphorus dynamics. *Australian Journal of Soil Research*, **44**, 611-618.
- Bussink, D. W., Bakker, R. F., van der Draai, H., & Temminghoff, E. J. M. 2011a. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 1 snijmaïs. 1246.1. Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.
- Bussink, D. W., Bakker, R. F., van der Draai, H., & Temminghoff, E. J. M. 2011b. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 2 grasland. Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.
- Cavigelli, M. A. & Thien, S. J. 2003. Phosphorus bioavailability following incorporation of green manure crops. *Soil Science Society of America Journal*, **67**, 1186-1194.
- Chapman, P. J., Shand, C. A., Edwards, A. C. & Smith, S. 1997. Phosphorus composition of soil solution: effects of sample preparation and soil storage. In: Phosphorus loss from soil to water (eds H. Tunney *et al.*), pp. 415-417. CAB International, Cambridge.
- Chardon, W., Sival, F., Kemmers, R., van Delft, B. & Koopmans, G. 2009. Is het mogelijk om met uitmijnen in plaats van ontgronden voldoende fosfaat kwijt te raken? *De Levende Natuur*, **110**, 39-42.
- Chardon, W. J. & Dorioz, J. M. 2010. Phosphorus immobilizing amendments to soil. Factsheet of the study of the COST action 869. Schoumans, O. F. and Chardon, W. J. Wageningen.
- Christel, W., Bruun, S., Magid, J. & Stoumann Jensen, L. 2014. Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment. *Bioresource Technology*.
- Codling, E. E. 2013. Phosphorus and arsenic uptake by corn, wheat and soybean from broiler litter ash and egg layer manure ash. *Journal of Plant Nutrition*, **36**, 1083-1101.
- Cooperband, L. R. & Logan, T. J. 1994. Measuring in-situ changes in labile soil-phosphorus with anion-exchange membranes. *Soil Science Society of America Journal*, **58**, 105-114.
- Coppens, G., Vandendriessche, H., Moens, W. & Bries, J. 2009. *De mestwegwijzer. Overzicht van 15 jaar mestanalyse door de Bodemkundige Dienst van België*. Bodemkundige Dienst van België vzw, Heverlee.
- Coppens, J., Stas, S., Dolmans, E., Meers, E., Vlaeminck, S. E., Buysse, J., & Overloop, S. 2013. Begroting van stikstof- en fosforstromen in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij. MIRA/2013/09. Gent, MIRA.
- Corré, W. J., Verloop, J., Hilhorst, G. J., & Oenema, J. 2004. Bodemvruchtbaarheid op De Marke; Ontwikkelingen bij aangepast mineralenbeheer en gevolgen voor productiviteit. 49. Wageningen, Plant Research International.
- Csathó, P. 2012. Determination of ammoniumlactate extractable phosphorus and potassium.
- Csathó, P., Árendás, T., Fodor, N. & Németh, T. 2009. Evaluation of different fertilizer recommendation systems on various soils and crops in Hungary. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **40**, 1689-1711.
- Csathó, P., Magyar, M., Debreczeni, K. & Sárdi, K. 2002. Correlation between soil P and corn leaf P contents in a network of Hungarian long-term field trials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **33**, 3085-3103.
- Culleton, N., Coulter, B. & Liebhardt, W. C. 2002. The fate of phosphatic fertiliser applied to grassland. *Irish Geography*, **35**, 175-184.
- Curtin, D. & Syers, J. K. 2001. Lime-induced changes in indices of soil phosphate availability. *Soil Science Society of America Journal*, **65**, 147-152.
- Daly, K. & Casey, A. 2005. Environmental aspects of soil phosphorus testing. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, **44**, 261-279.
- Damon, P. M., Bowden, B., Rose, T. & Rengel, Z. 2014. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biology & Biochemistry*, **74**, 127-137.

- de Boer, H. C. 2008. Verkenning van de mogelijkheden om de opname van bodemfosfaat door blijvend grasland te verhogen. 144. Lelystad, Animal Sciences Group van Wageningen UR.
- de Boer, H. C., Bussink, D. W., & Schils, R. L. M. 2003. Herziening bemonsteringsdiepte onder grasland. Lelystad, Animal Sciences Group / Praktijkonderzoek.
- De Bolle, S 2013. *Phosphate saturation and phosphate leaching of acidic sandy soils in Flanders: analysis and mitigation options*. Ghent University, Ghent.
- de Haan, J. J. & van Geel, W. 2013. Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen 2013. Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.
- de Ruijter, F. J., Smit, A. L., & Meurs, E. J. J. 2009. Plaatsing als strategie voor een efficiëntere fosfaatbemesting. 2. Veldproeven. 3. Wageningen, Plant Research International B.V.
- Degryse, F., Smolders, E., Zhang, H. & Davison, W. 2009. Predicting availability of mineral elements to plants with the DGT technique: a review of experimental data and interpretation by modelling. *Environmental Chemistry*, **6**, 198-218.
- Dekker, P. H. M. & Ehlert, P. A. I. 2010. Opbrengsten niet onder druk. Gewassen komen later op gang. Boerderij 95[22], 22-25. Doetinchem, R.
- Dekker, P. H. M. & Postma, R. 2008. Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting. Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.
- Del Campillo, M. C., Sánchez-Alcalá, I., & Torrent, J. 2013. Extraction with 0.01 M CaCl₂ generally results in underestimation of soil solution P concentration. 7th International Phosphorus Workshop . Uppsala, SLU Dept of Soil and Environment.
- Delgado, A., Madrid, A., Kassem, S., Andreu, L. & del Campillo, M. D. 2002. Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids. *Plant and Soil*, **245**, 277-286.
- Delgado, A. & Torrent, J. 1997. Phosphate-rich soils in the European union: Estimating total plant-available phosphorus. *European Journal of Agronomy*, **6**, 205-214.
- Djordjic, F., Bergstrom, L. & Grant, C. 2005. Phosphorus management in balanced agricultural systems. *Soil Use and Management*, **21**, 94-101.
- Djordjic, F. & Mattsson, L. 2013. Changes in plant-available and easily soluble phosphorus within 1year after P amendment. *Soil Use and Management*, **29**, 45-54.
- Dodd, J. R. & Mallarino, A. P. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Soil Science Society of America Journal*, **69**, 1118-1128.
- Dodd, R. J., McDowell, R. W. & Condon, L. M. 2012. Predicting the changes in environmentally and agronomically significant phosphorus forms following the cessation of phosphorus fertilizer applications to grassland. *Soil Use and Management*, **28**, 135-147.
- Doolette, A., Smernik, R., & Dougherty, W. 2010. A quantitative assessment of phosphorus forms in Australian soils. Gilkes, R. J. and Prakongkep, N. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World , 17-20. Brisbane, Australia, Australian Society of Soil Science.
- Douds, D. D., Nagahashi, G., Reider, C. & Hepperly, P. R. 2007. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi increases the yield of potatoes in a high P soil. *Biological Agriculture & Horticulture*, **25**, 67-78.
- Drenth, H. 2011. Opname fosfaat in rij drie tot vier keer efficiënter. Akkermagazine . 's-Heerenberg, Agrio uitgeverij b.v.
- Egamberdiyeva, D. 2007. The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils. *Applied Soil Ecology*, **36**, 184-189.
- Eghball, B., Shanahan, J. F., Varvel, G. E. & Gilley, J. E. 2003. Reduction of high soil test phosphorus by corn and soybean varieties. *Agronomy Journal*, **95**, 1233-1239.

- Egnér, H., Riehm, H. & Domingo, W. R. 1960. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung. *Kungliga Lantbrukshögskolans*, **26**, 199-215.
- Ehlert, P., van der Salm, C., Burgers, S., van Middelkoop, J., van Dijk, W., van der Maas, R., Pronk, A., van Reuler, H., Koopmans, G., & Chardon, W. 2014a. Fosfaatklassen voor fosfaatgebruiksnormen van de Meststoffenwet; Landbouwkundige en milieuhygiënische aspecten in samenhang. Alterra report 2499. Wageningen, Alterra Wageningen UR.
- Ehlert, P. A. I. 2005. Toepassing van de basisvruchtbenadering op fosfaat van compost; Advies. 5. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.
- Ehlert, P. A. I., Burgers, S. L. G. E., Bussink, D. W., Temminghoff, E. J. M., van Erp, P. J., & van Riemsdijk, W. H. 2007. Deskstudie naar de mogelijkheden voor het aanwijzen van fosfaatarme gronden op basis van P-PAE. Stand van zaken 2006. 1458. Wageningen, Alterra.
- Ehlert, P. A. I., Chardon, W. J., & Burgers, S. L. G. E. 2014b. Fosfaattoestand en fosfaatgebruiksnorm; Betekenis van het fosfaat-bufferend vermogen van de bodem: ontwerp van een protocol. Alterra report 2500. Wageningen, Alterra Wageningen UR.
- Ehlert, P. A. I. & Dekker, P. H. M. 2010. Informatieblad Mineralen en Milieukwaliteit: Evenwichtsbemesting en opbrengst. Wageningen, Wageningen UR.
- Ehlert, P. A. I., Dekker, P. H. M., van der Schoot, J. R., Visschers, R., van Middelkoop, J. C., van der Maas, A. A., Pronk, A. A., & van Dam, A. M. 2009. Fosforgehalten en fosfaatafvoercijfers van landbouwgewassen. Eindrapportage. 1773. Wageningen, Alterra.
- Ehlert, P. A. I., Pasterkamp, H. P., & Bolhuis, P. R. 2004. Effecten van organische bodemverbeterende middelen op de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem op korte en lange termijn. 991. Wageningen, Alterra.
- Ehlert, P. A. I., Schoumans, O. F., Brus, D. J., Groot, W. J. M., Visschers, R., & Pleijter, M. 2005. Protocol voor het aanwijzen van gronden die in aanmerking komen voor een verhoogde gebruiksnorm. Technische uitwerking. 1201. Wageningen, Alterra.
- Ehlert, P. A. I. & van den Akker, H. A. J. M. 2005. Mest- en mineralenkennis voor de praktijk. Fosfaatvoorziening in akkerbouw- en groentegewassen. Wageningen, Wageningen UR.
- Ehlert, P. A. I., van Middelkoop, J. C., & Dekker, P. H. M. 2006. Fosfaatafvoer en fosfaatgehalten van landbouwgewassen. 1348. Wageningen, Alterra.
- Ehlert, P. A. I., van Middelkoop, J. C., van der Salm, C., & Dekker, P. H. M. 2008. Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op lange termijn. Stand van zaken 2008. 1665. Wageningen, Alterra.
- Ehlert, P. A. I., van Wijk, C. A. Ph., & Dekker, P. H. M. 2003. Fosfaatbalansen op perceelsniveau. Scan van de resultaten van vier veeljarige veldproeven op bouwland. Lelystad, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Sector AGV.
- Ellmer, F., Peschke, H., Kohn, W., Chmielewski, F. M. & Baumecker, M. 2000. Tillage and fertilizing effects on sandy soils. Review and selected results of long-term experiments at Humboldt-University Berlin. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **163**, 267-272.
- Engels, C. & Marschner, H. 1992. Root to shoot translocation of macronutrients in relation to shoot demand in maize (Zea-Mays L) grown at different root zone temperatures. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **155**, 121-128.
- Entz, M., Frick, B., Wiens, M., & Beavers, R. 2006. Increasing phosphorus availability through green manure, composted manure and rock phosphate. OACC.
- Eriksson, A. K. 2009. Phosphorus in agricultural soils around the Baltic Sea - Comparisons of different laboratory methods as indices for phosphorus leaching to waters. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences, Division of Water Quality Management.
- Etana, A. 2013. Impacts of soil management - where is the phosphorus? 7th International Phosphorus Workshop . Uppsala, SLU Dept of Soil and Environment.

- Fernandes, A. M., Soratto, R. P. & Gonsales, J. R. 2014. Root morphology and phosphorus uptake by potato cultivars grown under deficient and sufficient phosphorus supply. *Scientia Horticulturae*, **180**, 190-198.
- Frossard, E., Condon, L. M., Oberson, A., Sinaj, S. & Fardeau, J. C. 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality*, **29**, 15-23.
- Gagnon, B., Demers, I., Ziadi, N., Chantigny, M. H., Parent, L. E., Forge, T. A., Larney, F. J. & Buckley, K. E. 2012. Forms of phosphorus in composts and in compost-amended soils following incubation. *Canadian Journal of Soil Science*, **92**, 711-721.
- Gallet, A., Flisch, R., Ryser, J. P., Frossard, E. & Sinaj, S. 2003a. Effect of phosphate fertilization on crop yield and soil phosphorus status. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **166**, 568-578.
- Gallet, A., Flisch, R., Ryser, J. P., Nosberger, J., Frossard, E. & Sinaj, S. 2003b. Uptake of residual phosphate and freshly applied diammonium phosphate by *Lolium perenne* and *Trifolium repens*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **166**, 557-567.
- Girma, K., Martin, K. L., Freeman, K. W., Mosali, J., Teal, R. K., Raun, W. R., Moges, S. M. & Arnall, D. B. 2007. Determination of optimum rate and growth stage for foliar-applied phosphorus in corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **38**, 1137-1154.
- Giroux, M. & Royer, R. 2007. Effets à long terme des applications de phosphore sur les rendements, l'évolution des teneurs, de la saturation et de la solubilité du P dans deux sols très riches. *Agrosolutions*, **18**, 17-24.
- Gobin, B. 2012. Proefverslag startfosfor PCG.
- Goetelen, L., Groep AN, Vanhoof, C., & Tirez, K. 2011. Validatie meetmethodiek voor bepaling van plantbeschikbare P in ammoniumlactaat. Mol, VITO.
- Goodman, P. J. & Collison, M. 1982. Varietal differences in Uptake of P-32 Labeled Phosphate in Clover Plus Ryegrass Swards and Monocultures. *Annals of Applied Biology*, **100**, 559-565.
- Granssee, A. & Merbach, W. 2000. Phosphorus dynamics in a long-term P fertilization trial on Luvic Phaeozem at Halle. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **163**, 353-357.
- Greenwood, D. J., Cleaver, T. J., Turner, M. K., Hunt, J., Niendorf, K. B. & Loquens, S. M. H. 1980. Comparison of the effects of phosphate fertilizer on the yield, phosphate content and quality of 22 different vegetable and agricultural crops. *Journal of Agricultural Science*, **95**, 457-469.
- Hammond, J. P. & White, P. J. 2008. Diagnosing phosphorus deficiency in crop plants. In: The ecophysiology of plant-phosphorus interactions (eds P.J.White & J.P.Hammond), pp. 225-246. Springer, London.
- Haygarth, P. M. & Jarvis, S. C. 1999. Transfer of phosphorus from agricultural soils. *Advances in Agronomy*, Vol 66, **66**, 195-249.
- Haynes, R. J. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils - a critical review. *Plant and Soil*, **68**, 289-308.
- Heathwaite, A. L. 1997. Sources and pathways of phosphorus loss from agriculture. In: Phosphorus loss from soil to water (eds H.Tunney *et al.*), pp. 204-223. CAB International, Cambridge.
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B. & Chauhan, B. S. 1982. Changes in inorganic and organic soil-phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, **46**, 970-976.
- Hens, M. & Merckx, R. 2002. The role of colloidal particles in the speciation and analysis of "dissolved" phosphorus. *Water Research*, **36**, 1483-1492.
- Herlihy, M., McCarthy, J., Breen, J. & Moles, R. 2004. Effects over time of fertiliser P and soil series on P balance, soil-test P and herbage production. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, **43**, 147-160.
- Hermans, I. & Bries, J. 2008. Maïs telen met de nieuwe fosfornormen. Leuven, Bodemkundige Dienst van België vzw.
- Hoeks, P., van Middelkoop, J. C., Philipsen, A. P., Talens, B., Bussink, D. W., Bos, A. J., Velthof, G. L., van Dijk, W., Schröder, J. J., Abbink, G., & van Eekeren, N. 2012. Bemestingsadvies. Lelystad, Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen.

- Holford, I. C. R. 1997. Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, **35**, 227-239.
- Holford, I. C. R. & Crocker, G. J. 1994. Long-term effects of lime on pasture yields and response to phosphate fertilizers on eight acidic soils. *Australian Journal of Agricultural Research*, **45**, 1051-1062.
- Holford, I. C. R., Schweitzer, B. E. & Crocker, G. J. 1994. Long-term effects of lime on soil-phosphorus solubility and sorption in eight acidic soils. *Australian Journal of Soil Research*, **32**, 795-803.
- Horst, W. J., Kamh, M., Jibrin, J. M. & Chude, V. O. 2001. Agronomic measures for increasing P availability to crops. *Plant and Soil*, **237**, 211-223.
- Houba, V. J. G., Temminghoff, E. J. M., Gaikhorst, G. A. & van Vark, W. 2000. Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **31**, 1299-1396.
- Indiati, R. & Sharpley, A. N. 1997. Changes in some soil phosphorus availability parameters as induced by phosphorus addition and soil sorption properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **28**, 1565-1578.
- Jensen, L. S., Pedersen, A., Magid, J., & Nielsen, N. E. 2005. Catch crops have little effect on P and K availability of depleted soils. DARCOF e-news 2, 1-7.
- Johnston, A. E. 2000. Soil and plant phosphate. Paris, International Fertilizer Industry Association.
- Johnston, A. E. & Dawson, C. J. 2005. Phosphorus in agriculture and in relation to water quality. Peterborough, United Kingdom, Agricultural Industries Confederation.
- Johnston, A. E., Poulton, P. R., Fixen, P. E. & Curtin, D. 2014. Phosphorus: Its efficient use in agriculture. *Advances in Agronomy, Vol 123*, **123**, 177-228.
- Jordan-Meille, L., Rubaek, 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**, 419-435.
- Jungk, A., Claassen, N., Schulz, V. & Wendt, J. 1993. Availability of phosphate reserves in arable soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **156**, 397-406.
- Karpinets, T. V., Greenwood, D. J. & Ammons, J. T. 2004. Predictive mechanistic model of soil phosphorus dynamics with readily available inputs. *Soil Science Society of America Journal*, **68**, 644-653.
- Kirkby, E. A. & Johnston, A. E. 2008. Soil and fertilizer phosphorus in relation to crop nutrition. In: The ecophysiology of plant-phosphorus interactions (eds P.J.White & J.P.Hammond), pp. 177-224. Springer, London.
- Koopmans, G. F., Chardon, W. J., de Willigen, P. & van Riemsdijk, W. H. 2004a. Phosphorus desorption dynamics in soil and the link to a dynamic concept of bioavailability. *Journal of Environmental Quality*, **33**, 1393-1402.
- Koopmans, G. F., Chardon, W. J., Ehlert, P. A. I., Dolfig, J., Suurs, R. A. A., Oenema, O. & van Riemsdijk, W. H. 2004b. Phosphorus availability for plant uptake in a phosphorus-enriched noncalcareous sandy soil. *Journal of Environmental Quality*, **33**, 965-975.
- Koopmans, G. F., Van der Zeeuw, M. E., Römkens, P. F. A. M., Chardon, W. J. & Oenema, D. O. 2001. Identification and characterization of phosphorus-rich sandy soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **49**, 369-384.
- Krebbes, H. 2010. Mest in rij, ook op klei. Techniek is er, capaciteit moet omhoog. Veehouderij Techniek 13[2]. Wageningen, AgriMedia BV.
- Krey, T., Vassilev, N., Baum, C. & Eichler-Löbermann, B. 2013. Effects of long-term phosphorus application and plant-growth promoting rhizobacteria on maize phosphorus nutrition under field conditions. *European Journal of Soil Biology*.
- Krogstad, T., Ogaard, A. F., & Kristoffersen, A. O. 2008. New P recommendations for grass and cereals in Norwegian agriculture. Rubaek, G. H. Stockholm, Nordiska jordbruksforskarens förening 4.
- Lee, A., Prasad, M., Cassidy, J., & Gaffney, M. T. 2012. Plant available nitrogen and phosphorus from composted waste materials. ORBIT2012: Global assessment for organic resources and waste management: Assessment of technologies for optimal organics management processes and enlightened environmental policies.

- Legrand, G., Roisin, C., Bries, J., & Destain, J.-P. 2012. PK bemesting in de biet: Bedenkingen op de lange termijn! De Bietplanter [493], 7-8. Brussel, vzw CBB.
- Leinweber, P., Meissner, R., Eckhardt, K. U. & Seeger, J. 1999. Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *European Journal of Soil Science*, **50**, 413-424.
- Lenders, S., D'hooghe, J., & Coulier, T. 2011. Gebruik van energie, gewasbescherming, water en kunstmest in de Vlaamse landbouw. Resultaten op basis van LMN 2005-2009. Brussel, Departement Landbouw en Visserij, afdeling Monitoring en Studie.
- Lenders, S., Oeyen, A., & D'hooghe, J. 2012. Bodembalans van de Vlaamse landbouw, cijfers voor 2007-2009. Brussel, Departement Landbouw en Visserij, afdeling Monitoring en Studie.
- Liebisch, F. 2011. *Plant and soil indicators to assess the phosphorus nutrition status of agricultural grasslands*. ETH Zurich, Zurich.
- Lindenthal, T., Spiegel, H., Mazorek, M., Hess, J., Freyer, B. & Kochl, A. 2003. Results of three long-term P-field experiments in Austria - 2nd report: Effects of different types and quantities of P-fertiliser on P-uptake and P-balances. *Bodenkultur*, **54**, 11-21.
- MacNaeidhe, F. S. 2001. Effect of application of basic slag and superphosphate on herbage yield and on soil and herbage concentrations of phosphorus in organic grassland. *Biological Agriculture & Horticulture*, **19**, 231-245.
- Maes, S., Elsen, A., Tits, M., Boon, W., Deckers, S., Bries, J., Vogels, N. & Vandendriessche, H. 2012. *Wegwijs in de bodemvruchtbaarheid van de Belgische akkerbouw- en weilandpercelen (2008-2011)*. Bodemkundige Dienst van België.
- Maes, S., Odeurs, W., & Bries, J. 2013. Het gebruik van humuszuren bij de bemesting van aardappelen. Leuven, BDB.
- Malda, J. T. & Rutgers, R. 2012. Fosfaat (rijen)bemesting in zaaiuien. Dronten, Altic B.V.
- Maleki, M. R., Mouazen, A. M., De Ketelaere, B., Ramon, H. & De Baerdemaeker, J. 2008. On-the-go variable-rate phosphorus fertilisation based on a visible and near-infrared soil sensor. *Biosystems Engineering*, **99**, 35-46.
- McDowell, R. & Condron, L. 2001. Influence of soil constituents on soil phosphorus sorption and desorption. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **32**, 2531-2547.
- Mengel, K. & Kirkby, E. A. 1982. *Principles of plant nutrition*. International Potash Institute, Worblaufen-Bern.
- Menzies, N. W., Kusumo, B. & Moody, P. W. 2005. Assessment of P availability in heavily fertilized soils using the diffusive gradient in thin films (DGT) technique. *Plant and Soil*, **269**, 1-9.
- Merbach, W., Deubel, A., Gransee, A., Ruppel, S. & Klamroth, A. 2010. Phosphorus solubilization in the rhizosphere and its possible importance to determine phosphate plant availability in soil. A review with main emphasis on German results. *Archives of Agronomy and Soil Science*, **56**, 119-138.
- Messiga, A. J., Ziadi, N., Plenet, D., Parent, L. E. & Morel, C. 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use and Management*, **26**, 354-364.
- Morgan, M. A. 1997. The behaviour of soil and fertilizer phosphorus. In: Phosphorus loss from soil to water (eds H. Tunney *et al.*), pp. 137-149. CAB International, Cambridge.
- Mosali, J., Desta, K., Teal, R. K., Freeman, K. W., Martin, K. L., Lawles, J. W. & Raun, W. R. 2006. Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield, phosphorus uptake, and use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, **29**, 2147-2163.
- Murphy, P. N. C., Sims, T. J., McDowell, R., Wall, D., Lalor, S. T. J., Daly, K., & Shortle, G. 2013. Managing legacy soil phosphorus in grassland soils for agricultural productivity and environmental quality: a review. 7th International Phosphorus Workshop . Uppsala, SLU Dept of Soil and Environment.
- Németh, T. 2006. Application of the Bray-Mitscherlich equation approach for economically and environmentally sound fertilization of field crops in Hungary. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **37**, 2227-2247.

- Neyroud, J. A. & Lischer, P. 2003. Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **166**, 422-431.
- Noack, S. R., McBeath, T. M. & McLaughlin, M. J. 2010. Potential for foliar phosphorus fertilisation of dryland cereal crops: a review. *Crop & Pasture Science*, **61**, 659-669.
- Noack, S. R., McBeath, T. M., McLaughlin, M. J., Smernik, R. J. & Armstrong, R. D. 2014. Management of crop residues affects the transfer of phosphorus to plant and soil pools: Results from a dual-labelling experiment. *Soil Biology & Biochemistry*, **71**, 31-39.
- Nuruzzaman, M., Lambers, H., Bolland, M. D. A. & Veneklaas, E. J. 2005. Phosphorus uptake by grain legumes and subsequently grown wheat at different levels of residual phosphorus fertiliser. *Australian Journal of Agricultural Research*, **56**, 1041-1047.
- Oberson, A., Bonvin, C., Nanzer, S. A., Tamburini, F., Etter, B., Udert, K. M., & Frossard, E. 2013. Plant uptake of phosphorus recycled from human urine and sewage sludge ashes. 7th International Phosphorus Workshop . Uppsala, SLU Dept of Soil and Environment.
- Ogaard, A. F. 1994. Relationships between the ratio of plant-available phosphorus (P-AI) to total phosphorus and soil properties. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, **44**, 136-141.
- Oost, J. F. 2015. Que penser des engrais dits "starter" ou encore des engrais foliaires? Le Sillon Belge 13/03/2015, 12-14.
- Ottobong, E., Borling, K., Katterer, T. & Mattsson, L. 2009. Compatibility of the ammonium lactate (AL) and sodium bicarbonate (Olsen) methods for determining available phosphorus in Swedish soils. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, **59**, 373-378.
- Overloop, S., Bossuyt, M., Claeys, D., Wustenberghs, H., D'hooghe, J., Elsen, A., & Eppinger, R. 2011. MIRA achtergronddocument Vermesting.
- Owen, D., Williams, A. P., Griffith, G. W. & Withers, P. J. A. 2014. Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. *Applied Soil Ecology*, **86**, 41-54.
- Pellerin, S. & Nesme, T. 2013. Why do we have to increase P use efficiency and recycling in cropping systems? D'Haene, K., Vandecasteele, B., De Vis, R., Crappé, S., Callens, D., Mechant, E., Hofman, G., and De Neve, S. Nutrihort - Nutrient management, innovative techniques and nutrient legislation in intensive horticulture for an improved water quality. September 16-18, 2013, Ghent. Proceedings . Ghent.
- Pierzynski, G. M., Zhang, H., Wolf, A., Kleinman, P., Mallarino, A., & Sullivan, D. 2005. Phosphorus determination in waters and extracts of soils and by-products: inductively coupled plasma spectroscopy versus colorimetric procedures. SERA-17.
- Platteau, J., Van Gijseghem, D., & Van Bogaert, T. 2014. Landbouwrapport 2014. Brussel, Departement Landbouw en Visserij.
- Postma, R., van Schöll, L., & Pollema, R. 2014. Fosfaat en ureum toedienen met dompelen; quick scan literatuur en veldproef pootaardappelen. Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI bv.
- Power, V., Tunney, H. & Jeffrey, D. W. 2005. The phosphorus requirements for silage production on high fertility soils. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, **44**, 281-296.
- Pronk, A., Smit, B., & de Ruijter, F. 2013. Row application of fertilizers, manure and manure fractions to increase nutrient use efficiency. D'Haene, K., Vandecasteele, B., De Vis, R., Crappé, S., Callens, D., Mechant, E., Hofman, G., and De Neve, S. Nutrihort. NUTRIHORT: Nutrient management, innovative techniques and nutrient legislation in intensive horticulture for an improved water quality. September 16-18, 2013, Ghent . Ghent.
- Pypers, P., Huybrighs, M., Diels, J., Abaidoo, R., Smolders, E. & Merckx, R. 2007. Does the enhanced P acquisition by maize following legumes in a rotation result from improved soil P availability? *Soil Biology & Biochemistry*, **39**, 2555-2566.
- Quintero, C. E., Boschetti, N. G. & Benavidez, R. A. 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **34**, 1435-1450.

- Reijneveld, J. A. 2001. Effecten van verminderde fosfaatgiften op fosfaatfixerende kleigronden. 27. Wageningen, Plant Research International.
- Reijneveld, J. A. 2012. Developments in soil phosphorus status in a recently reclaimed polder in the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **94**, 33-45.
- Reijneveld, J. A., Verloop, J., & Hilhorst, G. J. 2003. Sanering van zandgrond met een hoge fosfaattoestand. Resultaten van een veldexperiment op proefbedrijf De Marke. 43. Wageningen, Wageningen UR.
- Renneson, M., Dufey, J., Legrain, X., Genot, V., Bock, L. & Colinet, G. 2013a. Relationships between the P status of surface and deep horizons of agricultural soils under various cropping systems and for different soil types: a case study in Belgium. *Soil Use and Management*, **29**, 103-113.
- Renneson, M., Joseph, D., Roisin, C., & Colinet, G. 2013b. Can long-term experimental plots demonstrate the sustainability of different phosphorus inputs? 7th International Phosphorus Workshop . Uppsala, SLU Dept of Soil and Environment.
- Richards, I. R., Clayton, C. J. & Reeve, A. J. K. 1998. Effects of long-term fertilizer phosphorus application on soil and crop phosphorus and cadmium contents. *Journal of Agricultural Science*, **131**, 187-195.
- Richardson, A. E., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, S. E., Harvey, P. R., Ryan, M. H., Veneklaas, E. J., Lambers, H., Oberson, A., Culvenor, R. A. & Simpson, R. J. 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, **349**, 121-156.
- Richardson, A. E. & Simpson, R. J. 2011. Soil microorganisms Mediating Phosphorus Availability. *Plant Physiology*, **156**, 989-996.
- Rietra, R. P. J. J., Koopmans, G. F., Lubbers, I., Ehlert, P. A. I., & Kuikman, P. J. 2009. Gevolgen van een verminderde aanvoer van nutriënten voor de lange termijn bodemvruchtbaarheid. 1736. Wageningen, Alterra.
- Roger, A., Libohova, Z., Rossier, N., Joost, S., Maltas, A., Frossard, E. & Sinaj, S. 2014. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland. *Geoderma*, **217**, 26-36.
- Roggen, J. 1949. *Bemestingsleer voor het landbouwonderwijs*. Uitgeverij N.V. Standaard-Boekhandel, Antwerpen - Gent - Brussel - Leuven.
- Römer, W. 2006. Plant availability of P from recycling products and phosphate fertilizers in a growth-chamber trial with rye seedlings. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **169**, 826-832.
- Rose, T. J., Damon, P. & Rengel, Z. 2010. Phosphorus-efficient faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes enhance subsequent wheat crop growth in an acid and an alkaline soil. *Crop & Pasture Science*, **61**, 1009-1016.
- Russchen, H. J., Wandar, J., & Malda, J. T. 2011. Benutting van fosfaat in landbouwgronden. 433643. Dronten, DLV Plant BV.
- Sánchez-Alcalá, I., Del Campillo, M. C. & Torrent, J. 2014. Extraction with 0.01 M CaCl₂ underestimates the concentration of phosphorus in the soil solution. *Soil Use and Management*.
- Sárdi, K., Osztóics, E., Csathó, P. & Balázs, A. 2009. Correlation between soil P test results and P contents of young spring barley studied in long-term experiments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **40**, 526-537.
- Schils, R. L. M., van Dijk, W., van Middelkoop, J., Oenema, J., Verloop, K., Huijsmans, J., Ehlert, P., van der Salm, C., van Reuler, H., Vreeburg, P., Dekking, A., van Geel, W., & van der Schoot, J. R. 2012. Effect van mestbeleid op bodemvruchtbaarheid en gewasopbrengst. Evaluatie Meststoffenwet 2012: deelrapport ex post. 2266. Wageningen, Alterra.
- Scholten, O. E., Burger, K., & Kuyper, T. W. 2011. Veredelen op fosfaatopname. Wageningen, Wageningen UR.
- Schoumans, O. F. 1997. Relation between phosphate accumulation, soil P levels and P leaching in agricultural land. Report 146. Wageningen, DLO Winand Staring Centre.
- Schoumans, O. F. & Chardon, W. J. 2003. Risk assessment methodologies for predicting phosphorus losses. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **166**, 403-408.

- Schoumans, O. F., Chardon, W. J., Bechmann, M., Gascuel-Oudou, C., Hofman, G., Kronvang, B., Litaor, M. I., Lo Porto, A., Newell-Price, P., & Rubaek, G. H. 2011. Mitigation options for reducing nutrient emissions from agriculture. A study amongst European member states of Cost action 869. Schoumans, O. F. and Chardon, W. J. Report 2141. Wageningen, Alterra.
- Schoumans, O. F., Ehlert, P. A. I., & Chardon, W. J. 2004a. Evaluatie van methoden voor het karakteriseren van gronden die in aanmerking komen voor reparatiebemesting. 730.3. Wageningen, Alterra.
- Schoumans, O. F., Ehlert, P. A. I., & Chardon, W. J. 2005. Mogelijkheden tot de beantwoording van beleidsvragen inzake aanpassing van fosfaatverliesnormen; Quick scan. 1181. Wageningen, Alterra.
- Schoumans, O. F., Renaud, R., Oosterom, P., & Groenendijk, P. 2004b. Lot van het fosfaatoverschot. 730.5. Wageningen, Alterra.
- Schoumans, O. F., Rulkens, W. H., Oenema, O., & Ehlert, P. A. I. 2010. Phosphorus recovery from animal manure; Technical opportunities and agro-economical perspectives. 2158. Wageningen, Alterra.
- Schröder, J. J., Ten Holte, L. & Brouwer, G. 1997. Response of silage maize to placement of cattle slurry. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **45**, 249-261.
- Schröder, J. J., Uenk, D., & de Visser, W. 2010. De beschikbaarheid van fosfaat uit de dikke fractie van gescheiden drijfmest. 661. Wageningen, Plant Research International B.V., Wageningen.
- Shahandeh, H., Hossner, L. R. & Turner, F. T. 2003. Phosphorus relationships to manganese and iron in rice soils. *Soil Science*, **168**, 489-500.
- Sharpley, A. N. & Rekolainen, S. 1997. Phosphorus in agriculture and its environmental implications. In: Phosphorus loss from soil to water (eds H.Tunney *et al.*), pp. 1-53. CAB International, Cambridge.
- Sheppard, S. C. & Racz, G. J. 1984a. Effects of soil temperature on phosphorus extractability .1. Extractions and plant uptake of soil and fertilizer phosphorus. *Canadian Journal of Soil Science*, **64**, 241-254.
- Sheppard, S. C. & Racz, G. J. 1984b. Effects of soil temperature on phosphorus extractability .2. Soil phosphorus in six carbonated and six non-carbonated soils. *Canadian Journal of Soil Science*, **64**, 255-263.
- Sheppard, S. C. & Racz, G. J. 1985. Shoot and root response of wheat to band and broadcast phosphorus at varying soil temperatures. *Canadian Journal of Soil Science*, **65**, 79-88.
- Shortle, G., Lalor, S. T. J., Schulte, R. P. O., & Gibson, M. T. 2013. Teagasc submission made in response to the Consultation Paper on The Second Review of Ireland's Nitrates Action Programme, with associated proposals for amendments. Carlow, Teagasc.
- Shuai, X., Yost, R. S. & Wendroth, O. 2014. State-space estimation of the intrinsic soil phosphorus pools from soil phosphorus tests. *Geoderma*, **214**, 239-245.
- Sibbesen, E. 1983. Phosphate soil tests and their suitability to assess the phosphate status of soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **34**, 1368-1374.
- Sibbesen, E. & Sharpley, A. N. 1997. Setting and justifying upper critical limits for phosphorus in soils. In: Phosphorus loss from soil to water (eds H.Tunney *et al.*), pp. 151-176. CAB International, Cambridge.
- Silveira, M. L. & O'Connor, G. A. 2013. Temperature effects on phosphorus release from a biosolids-amended soil. *Applied and Environmental Soil Science*, **2013**.
- Simpson, R. J., Oberson, A., Culvenor, R. A., Ryan, M. H., Veneklaas, E. J., Lambers, H., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, S. E., Harvey, P. R. & Richardson, A. E. 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant and Soil*, **349**, 89-120.
- Sims, J. T., Murphy, P. N. C., & Wall, D. 2013. Managing legacy soil phosphorus to sustain agriculture and protect water quality. 7th International Phosphorus Workshop . Uppsala, SLU Dept of Soil and Environment.
- Sisák, I., Sárdi, K. & Palkovics, M. 2002. Water-soluble P as affected by freshly applied and residual P and P fractions of soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **33**, 2813-2823.

- Six, L., Pypers, P., Degryse, F., Smolders, E. & Merckx, R. 2012. The performance of DGT versus conventional soil phosphorus tests in tropical soils - An isotope dilution study. *Plant and Soil*, **359**, 267-279.
- Skogley, E. O. & Dobermann, A. 1996. Synthetic ion-exchange resins: Soil and environmental studies. *Journal of Environmental Quality*, **25**, 13-24.
- Sleurink, D. 2010. Fosfaat ligt soms te vast. Boerderij 96[7], 22-24. Doetinchem, Reed Business.
- Smit, A. L., de Willigen, P., & Pronk, A. A. 2009. Plaatsing als strategie voor een efficiëntere fosfaatbemesting. 1. Literatuur en modelonderzoek. 216. Wageningen, Plant Research International B.V.
- Smit, B. 2012. Rijenbemesting met fosfaat: meer met minder. Methode werkt in droog voorjaar. *Nieuwe Oogst*, 20.
- Smith, D. R., Moore, P. A., Maxwell, C. V., Haggard, B. E. & Daniel, T. C. 2004. Reducing phosphorus runoff from swine manure with dietary phytase and aluminum chloride. *Journal of Environmental Quality*, **33**, 1048-1054.
- Smith, K. A., Chalmers, A. G., Chambers, B. J. & Christie, P. 1998. Organic manure phosphorus accumulation, mobility and management. *Soil Use and Management*, **14**, 154-159.
- Smith, K. A. & van Dijk, T. A. 1987. Utilisation of phosphorus and potassium from animal manures on grassland and forage crops. In: *Animal Manure on Grassland and Forage Crops* (eds H.E.van der Meer *et al.*), pp. 87-101. Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- Soinne, H 2009. *Extraction methods in soil phosphorus characterisation - Limitations and applications*. University of Helsinki, Helsinki.
- Sorensen, J. N. 2013. Phosphorus placement for bulb onions - rates and distances. D'Haene, K., Vandecasteele, B., De Vis, R., Crappé, S., Callens, D., Mechant, E., Hofman, G., and De Neve, S. Nutrihort. NUTRIHORT: Nutrient management, innovative techniques and nutrient legislation in intensive horticulture for an improved water quality. September 16-18, 2013, Ghent, 117-123. Ghent.
- Sorensen, J. N., Larsen, J. & Jakobsen, I. 2005. Mycorrhiza formation and nutrient concentration in leeks (*Allium porrum*) in relation to previous crop and cover crop management on high P soils. *Plant and Soil*, **273**, 101-114.
- Sorensen, J. N., Larsen, J. & Jakobsen, I. 2008. Pre-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi increases early nutrient concentration and growth of field-grown leeks under high productivity conditions. *Plant and Soil*, **307**, 135-147.
- Sousa, J. R. & Coutinho, J. 2009. Effect of the extraction period on the routine assessment of soil P status by ion-exchange resin membranes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **40**, 1995-2008.
- Speirs, S. D., Scott, B. J., Moody, P. W. & Mason, S. D. 2013. Soil phosphorus tests II: A comparison of soil test-crop response relationships for different soil tests and wheat. *Crop & Pasture Science*, **64**, 469-479.
- Spiegel, H., Lindenthal, T., Mazorek, M., Ploner, A., Freyer, B. & Kochl, A. 2001. Results of three long-term P-field experiments in Austria. First report: Effects of different types and quantities of P-fertiliser on yields and P-CAL/DL-contents in soils. *Bodenkultur*, **52**, 3-17.
- Svanbäck, A., Ulén, B. & Etana, A. 2014. Mitigation of phosphorus leaching losses via subsurface drains from a cracking marine clay soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **184**, 124-134.
- Syers, J. K., Johnston, A. E., & Curtin, D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. 18. Rome, FAO. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin.
- Timmermans, B., Sukkel, W., & Bokhorst, J. 2012. Telen bij lage fosfaatniveaus in de biologische landbouw; achtergronden en literatuurstudie. Driebergen, Louis Bolk Instituut.
- Tunney, H., Breeuwsma, A., Withers, P. J. A. & Ehlert, P. A. I. 1997. Phosphorus fertilizer strategies: present and future. In: *Phosphorus loss from soil to water* (eds H.Tunney *et al.*), pp. 177-203. CAB International, Cambridge.
- Tunney, H., Carton, O. T., & O'Donnell, T. 1999. Minimum phosphorus needs for silage production. Dublin, Teagasc. Rural Environmental Series no. 18, End of project report, ARMIS 4267.
- Turner, B. L., Mahieu, N. & Condron, L. M. 2003. The phosphorus composition of temperate pasture soils determined by NaOH-EDTA extraction and solution P-31 NMR spectroscopy. *Organic Geochemistry*, **34**, 1199-1210.

- Ulén, B. 2006. A simplified risk assessment for losses of dissolved reactive phosphorus through drainage pipes from agricultural soils. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, **56**, 307-314.
- Valkama, E., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2011. Yield response models to phosphorus application: a research synthesis of Finnish field trials to optimize fertilizer P use of cereals. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **91**, 1-15.
- Valkama, E., Uusitalo, R., Ylivainio, K., Virkajarvi, P. & Turtola, E. 2009. Phosphorus fertilization: A meta-analysis of 80 years of research in Finland. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **130**, 75-85.
- van Dam, A. M. & Ehlert, P. A. I. 2008. Beschikbaarheid van fosfaat in organische meststoffen. Een studie voor bollenteelt in het westelijk zandgebied. 32 360291 00. Lisse, Praktijkonderzoek Plant en Omgeving B.V.
- Van de Ven, G., Schellekens, A., Ooms, L., Bries, J., Odeurs, W., De Vliegheer, A., & Latré, J. 2014. Optimalisatie bemesting van maïs. Versie 2013. Geel, Landbouwcentrum voor Voedergewassen vzw.
- Van der Pauw, F. 1937. Het tijdstip van de aanwending van Thomasslakkenmeel. *Landbouwkundig tijdschrift*, **51**, 621-628.
- Van der Pauw, F. 1971. An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus. *Plant and Soil*, **34**, 467-481.
- van der Stok, T. 2010. Fosfaat kan uit rijenbemesting. Grondig . Nijkerk, Stichting CUMELA Communicatie.
- van der Zee, S. E. A. T. M., van Riemsdijk, W. H., & de Haan, F. A. M. 1990. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel I: Toelichting. Wageningen, Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding, Landbouwuniversiteit Wageningen.
- van Dijk, T. A., Wander, J., & Veldhorst, G. J. 2010. Rijenbemesting in korrelmaïs, proefveld 2009. 1324.09. Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI bv.
- van Dijk, T. A., Wander, J., & Veldhorst, G. J. 2011. Rijenbemesting in korrelmaïs, proefveld 2010 en conclusies 2009 + 2010. 1324.10. Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI bv.
- van Dijk, W., Dekker, P. H. M., Postma, R., & Moolenaar, S. W. 2007a. Bodembeheer op akkerbouwbedrijven in relatie tot het mineralenbeleid. 32 500617 00. Lelystad, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.
- van Dijk, W., Dekker, P. H. M., ten Berge, H. F. M., Smit, A. L., & van der Schoot, J. R. 2007b. Aanscherping van fosfaatgebruiksnormen op bouwland bij akker- en tuinbouwgewassen: Verkenning van noodzaak en mogelijkheden tot differentiatie. Lelystad, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.
- van Dijk, W. & van Geel, W. 2012. Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen. Lelystad, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.
- van Keulen, H., Aarts, H. F. M., Habekotté, B., van der Meer, H. G. & Spiertz, J. H. J. 2000. Soil-plant-animal relations in nutrient cycling: the case of dairy farming system 'De Marke'. *European Journal of Agronomy*, **13**, 245-261.
- van Krimpen, M., van Middelkoop, J., Sebek, L., Jongbloed, A., & de Hoop, W. 2010. Effect van fosforverlaging in melkveerantsoenen en varkensvoerders op fosfaatexcretie via de mest. 324. Lelystad, Wageningen UR Livestock Research.
- van Krimpen, M. M., Goselink, R. M. A., Heeres, J., & Jongbloed, A. W. 2012. Fosforbehoefte van melkvee, vleesvee, varkens en pluimvee: een literatuurstudie. 574. Lelystad, Wageningen UR Livestock Research.
- van Middelkoop, J., van der Salm, C., & Ehlert, P. 2014. Vijftien jaar fosfaatevenwichtsbemesting op grasland: impact op bodem en gewas. V-focus april 2014 , 26-28. Wageningen, AgriMedia Wageningen.
- van Middelkoop, J. & van Schooten, H. 2010. Fosfaatbemesting in maïs: hoe scherp kan het? V-focus [2], 15-17. Wageningen, AgriMedia.
- van Middelkoop, J. C. & van der Salm, C. 2008. Informatieblad Mineralen en Milieukwaliteit. Elf jaar fosfaatevenwichtsbemesting op grasland: lange termijn effecten op opbrengst en fosforgehalte van gras. Wageningen, Wageningen UR.
- van Middelkoop, J. C., van der Salm, C., den Boer, D. J., ter Horst, M., Chardon, W. J., Bakker, R. F., Schils, R. L. M., Ehlert, P. A. I., & Schoumans, O. F. 2004. Effecten van fosfaat- en stikstofoverschotten op grasland. 48. ASG - divisie Praktijkonderzoek.

- van Middelkoop, J. C., van der Salm, C., & Ehlert, P. A. I. 2012. Balanced phosphorus fertilization on grassland in a mixed grazing and mowing system; a 13 year field experiment. 24th General Meeting of the European Grassland federation, 03-07 June 2012, Lublin, Poland. Proceedings of the 24th General Meeting of the European Grassland federation, 03-07 June 2012, Lublin, Poland - Grassland Science in Europe 17 . Poznan, Grassland Science in Europe.
- van Middelkoop, J. C., van der Salm, C., Ehlert, P. A. I., André, G., Oudendag, D., & Pleijter, M. 2007. Effecten van fosfaat- en stikstofoverschotten op grasland II. 68. ASG - divisie Praktijkonderzoek.
- van Raij, B. 1998. Bioavailable tests: Alternatives to standard soil extractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **29**, 1553-1570.
- van Rotterdam-Los, A M D 2010. *The potential of soils to supply phosphorus and potassium: processes and predictions*. Wageningen University, Wageningen.
- van Rotterdam-Los, A. M. D., Reijneveld, J. A., van Oostrum, M., & Abbink, G. 2013. A more trustworthy P recommendation by implementing the intensity, buffering capacity, quantity concept into agricultural practice. D'Haene, K., Vandecasteele, B., De Vis, R., Crappé, S., Callens, D, Mechant, E., Hofman, G., and De Neve, S. Nutrihort. NUTRIHORT: Nutrient management, innovative techniques and nutrient legislation in intensive horticulture for an improved water quality. September 16-18, 2013, Ghent . Ghent.
- van Schooten, H. 2010. Rijenbemesting met drijfmest in maïs met GPS-besturing. 260. Wageningen, Wageningen UR Livestock Research.
- van Wijk, C., de Haan, J. J., Ehlert, P. A. I., & van den Berg, W. 2013. Lange termijn effecten van fosfaatbalansen op bouwland; fosfaattrappen proefveld Lelystad. Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.
- van Wijk, C., Neuvel, J., & van den Berg, W. 2002. Effects of soil phosphate level and phosphate application rate on the yields of four field vegetables. Proc. Workshop Eco.Fertilization Veg. Acta Hort. 571, 225-231.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2010. ILVO-mededeling 78: Vlarisub ringtest Mei 2010. Merelbeke, ILVO.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2011a. ILVO-mededeling 100: Vlarisub ringtest mei 2011. Merelbeke, ILVO.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2011b. ILVO-mededeling 87: Vlarisub ringtest november 2010. Merelbeke, ILVO.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2012a. ILVO-mededeling 108: Vlarisub ringtest november 2011. Merelbeke, ILVO.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2012b. ILVO-mededeling 115: Vlarisub ringtest mei 2012. Merelbeke, ILVO.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., & Van Waes, J. 2013. ILVO-mededeling 133: Vlarisub ringtest november 2012. Merelbeke, ILVO.
- Vandendriessche, H., Geypens, M. & Bries, J. 1994. Effecten van de beperking van de P-bemesting op de gewasproductie en de bodemvoorraad. In: Studie- en vervolmakingsdag 'Gebruik van reststoffen in de land- en tuinbouw' pp. 57-70. K.V.I.V..
- Verhaeghe, M. 2014a. Plantbakbehandeling met startfosfor: lage dosis en toch mooie meeropbrengst. Proeftuinnieuws 24[7 Maart], 22-23.
- Verhaeghe, M. 2014b. Startfosfor in de groenteteelt. Een overzicht van 15 jaar onderzoek op het PCG en een blik op de toekomst. Proeftuinnieuws 24[7 Maart], 20-21.
- 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.
- Verloop, J., Oenema, J., Burgers, S. L. G., Aarts, H. F. M. & van Keulen, H. 2010. P-equilibrium fertilization in an intensive dairy farming system: effects on soil-P status, crop yield and P leaching. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **87**, 369-382.
- Vlaamse Landmaatschappij .2010. Voortgangsrapport Mestbank 2010.

- Vlaamse Landmaatschappij .2012a. Voortgangsrapport betreffende het mestbeleid in Vlaanderen.
- Vlaamse Landmaatschappij .2012b. Voortgangsrapport mestbank 2012 over de mestproblematiek in Vlaanderen. Brussel, Vlaamse Landmaatschappij.
- Vlaamse Landmaatschappij .2014. Voortgangsrapport mestbank 2013 over de mestproblematiek in Vlaanderen. Brussel, Vlaamse Landmaatschappij.
- Vlaamse Landmaatschappij .2015. Voortgangsrapport mestbank 2014 over de mestproblematiek in Vlaanderen. Brussel, Vlaamse Landmaatschappij.
- Volckaert, A. & Winnepeninckx, R. 2010. Bladandijvie bemestingsproef: toepassing van startfosfor. PCG Nieuwsbrief 13[11], 6-7. Kruishoutem, Proefcentrum voor Groenteteelt.
- Vos, H. M. J., Ros, M. B. H., Koopmans, G. F. & van Groenigen, J. W. 2014. Do earthworms affect phosphorus availability to grass? A pot experiment. *Soil Biology & Biochemistry*, **79**, 34-42.
- Whalen, J. K., Chang, C. & Olson, B. M. 2001. Nitrogen and phosphorus mineralization potentials of soils receiving repeated annual cattle manure applications. *Biology and Fertility of Soils*, **34**, 334-341.
- Willemse, J. 2013. Mogelijke toevoegingen van rijenbemesting fosfaat bij aardappelen. Zoetermeer, Productschap Akkerbouw.
- Withers, P. J. A., Peel, S., Chalmers, A. G., Lane, S. J. & Kane, R. 2000. The response of manured forage maize to starter phosphorus fertilizer on chalkland soils in southern England. *Grass and Forage Science*, **55**, 105-113.
- Withers, P. J. A., Peel, S., Mansbridge, R. M., Chalmers, A. C. & Lane, S. J. 1999. Transfers of phosphorus within three dairy farming systems receiving varying inputs in feeds and fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **55**, 63-75.
- Yusiharni, B. E., Ziadi, H. & Gilkes, R. J. 2007. A laboratory and glasshouse evaluation of chicken litter ash, wood ash, and iron smelting slag as liming agents and P fertilisers. *Australian Journal of Soil Research*, **45**, 374-389.
- Zhang, T., Hao, X., Tan, C., Welacky, T., & Hong, J. 2013. Cumulative contributions of various forms of swine manure to soil test phosphorus in a clay loam soil under long-term corn-soybean rotation. 7th International Phosphorus Workshop . Uppsala, SLU Dept of Soil and Environment.
- Ziadi, N., Simard, R. R., Tran, T. S. & Allard, G. 2001. Soil-available phosphorus as evaluated by desorption techniques and chemical extractions. *Canadian Journal of Soil Science*, **81**, 167-174.

Contact

Fien Amery, Wetenschappelijk onderzoeker
Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek ILVO
Plant
Burg. Van Gansberghelaan 109
9820 Merelbeke
T +32 9 272 27 09
fien.amery@ilvo.vlaanderen.be

Bart Vandecasteele, Wetenschappelijk onderzoeker
Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek ILVO
Plant
Burg. Van Gansberghelaan 109
9820 Merelbeke
T +32 9 272 26 99
bart.vandecasteele@ilvo.vlaanderen.be

Deze publicatie kan ook geraadpleegd worden op:
[www.ilvo.vlaanderen.be/pers en media/ILVO mededelingen](http://www.ilvo.vlaanderen.be/pers%20en%20media/ILVO%20mededelingen)

Vermenigvuldiging of overname van gegevens toegestaan mits duidelijke bronvermelding.



Aansprakelijkheidsbeperking

Deze publicatie werd door ILVO met de meeste zorg en nauwkeurigheid opgesteld. Er wordt evenwel geen enkele garantie gegeven omtrent de juistheid of de volledigheid van de informatie in deze publicatie. De gebruiker van deze publicatie ziet af van elke klacht tegen ILVO of zijn ambtenaren, van welke aard ook, met betrekking tot het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.

In geen geval zal ILVO of zijn ambtenaren aansprakelijk gesteld kunnen worden voor eventuele nadelige gevolgen die voortvloeien uit het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.



195

deel 1



196

deel 2



197

deel 3

ILVO

Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek
Burg. Van Gansberghelaan 92
9820 Merelbeke - België

T +32 9 272 25 00
ilvo@ilvo.vlaanderen.be
www.ilvo.vlaanderen.be