

Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting

Bureaustudie in opdracht van Productschap Akkerbouw

Ir. P.H.M. Dekker (PPO-agv)

Ir. R. Postma (NMI)

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.
Business-unit Akkerbouw, Groente Ruimte en Vollegrondsgroente
Juli 2008

PPO nr. 3250061800

© 2008 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Het onderzoek is uitgevoerd door Praktijkonderzoek Plant en Omgeving (PPO) en het Nutriënten Management Instituut (NMI) in opdracht van het Productschap Akkerbouw



PRODUCTSCHAP AKKERBOUW

Projectnummer: 3250061800

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Business-unit Akkerbouw, Groente Ruimte en Vollegrondsgroente

Adres : Edelhertweg 1, Lelystad
: Postbus 430, 8200 AK Lelystad
Tel. : 0320 - 291111
Fax : 0320 - 230479
E-mail : peter.dekker@wur.nl
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	4
1 INLEIDING	6
2 BESCHRIJVING HUIDIGE SITUATIE	7
2.1 Wetgeving.....	7
2.2 Huidig bemestingsniveau	7
2.3 Fosfaattoestand op akkerbouwbedrijven in Nederland.....	8
3 BEMESTING EN AFVOER VAN FOSFAAT	9
3.1 Opbouw bemestingsadvies.....	9
3.2 Verschillen in de fosfaatbehoefte tussen gewassen	9
3.3 Functie van fosfor in de plant.....	10
3.4 Opbrengstverlies bij gereduceerde fosfaatbemesting	11
3.5 Afvoer van fosfaat met het geogste product	12
4 GEDRAG VAN FOSFAAT IN DE BODEM.....	13
4.1 Vormen waarin fosfaat aanwezig is.....	13
4.2 Bodemprocessen	14
4.3 Transport van P in de bodem.....	15
4.4 Effecten in de wortelzone die de P-opname beïnvloeden.....	16
4.5 Beschikbare hoeveelheid fosfaat in de bodem.....	16
4.6 Fosfaatverzadigde grond.....	17
4.7 Grondwaterstand	17
4.8 Fosfaattoestand van de grond bij evenwichtsbemesting	18
5 VERHOOGING EFFICIËNTIE FOSFAATBEMESTING.....	19
5.1 Werkingscoëfficiënt.....	19
5.2 Meststofkeuze.....	20
5.3 Samenstelling en vorm van de meststof	22
5.4 Plaatsing.....	23
5.5 Tijdstip van toediening.....	25
5.6 Optimalisering bodemfactoren	25
5.7 Aangepaste rassenkeuze en gebruik Mycorrhizae.....	25
6 TIPS VOOR EFFICIËNT UITVOEREN VAN DE FOSFAATBEMESTING	26
7 LITERATUUR.....	27

Samenvatting

Akkerbouwers maken zich ongerust over de aanscherping van de gebruiksnorm voor fosfaat. Zij vrezen dat dit ten koste gaat van de opbrengst van de gewassen en dat het moeilijk wordt om de fosfaattoestand van de grond op peil te houden. Ook vreest men dat de verlaging van de gebruiksnorm de mogelijkheden beperkt om het organische stofgehalte van de grond op peil te houden. Er kan bij een verlaagde gebruiksnorm immers minder mest worden toegediend. Verlaging van de gebruiksnorm is nodig om de uitspoeling van fosfaat naar het oppervlaktewater te beperken. Daarbij komt nog als tweede motief de beperkte fosfaatvoorraad op wereldschaal.

De hoogte van de fosfaatbemesting in de akkerbouw is afgelopen 10 jaar al sterk terug gelopen. De laatste jaren was de gemiddelde P-gift ongeveer 95 kg P₂O₅/ha. De afvoer van fosfaat met het geoogste product is ongeveer 60 kg/ha. Omdat de fosfaataanvoer naar percelen al jaren hoger is dan de afvoer is de fosfaattoestand van grond de laatste 20 jaar met ongeveer 8 Pw-punten gestegen. Dit blijkt o.a. uit analysegegevens van het Blgg in Oosterbeek. Ook blijkt uit deze gegevens dat de fosfaattoestand van de akkerbouwbedrijven gemiddeld vrij hoog tot hoog is.

De gebruiksnorm voor fosfaat in 2008 en 2009 is 85 kg P₂O₅/ha en het voornemen bestaat om deze norm de komende jaren stapsgewijs te verlagen tot 60 kg/ha in 2015. De vraag komt dan naar voren of deze verlaagde bemesting opgevangen kan worden door verhoging van de efficiëntie van de fosfaatbemesting.

De hoogte van de gewenste fosfaatbemesting hangt af van de grondsoort, de fosfaattoestand van de grond en van het gewas dat wordt geteeld. Het advies bestaat uit een gewasgericht advies en een bodemgericht advies voor de na te streven fosfaattoestand en eventuele reparatie daarvan.

De fosfaattoestand van de grond is belangrijker voor het opbrengstniveau dan de fosfaatbemesting, omdat gebleken is dat het niet mogelijk is met een hoge bemesting en een lage P-toestand dezelfde opbrengst te realiseren als bij een lagere bemesting en een hoge P-toestand. In de Adviesbasis Bemesting wordt een Pw-traject geadviseerd om de toestand te handhaven. Voor zeelei en zeezand is dit het traject Pw 25 tot Pw 45 en voor de overige grondsoorten het traject Pw 30 tot Pw 45. Voor het handhaven van een bepaalde toestand moet gemiddeld over het bedrijf de fosfaatafvoer worden gecompenseerd plus ongeveer 20 kg P₂O₅/ha voor de 'onvermijdbare verliezen'. Een gebruiksnorm van 80 kg P₂O₅/ha of hoger hoeft gemiddeld genomen geen probleem op te leveren. Zeker als men in ogenschouw neemt dat de gemiddelde fosfaattoestand van de grond reeds vrij hoog tot hoog is.

Van de in de bodem aanwezige hoeveelheid fosfaat (5.000 tot 10.000 kg/ha in de laag 0-30 cm –mv) is maar een zeer klein gedeelte in de bodemoplossing aanwezig en beschikbaar voor directe gewasopname (1 kg/ha). De niet in het bodemvocht opgeloste fosforverbindingen zijn te verdelen in labiele en stabiele verbindingen. De labiele fosfor is in evenwicht met die in oplossing en kan snel beschikbaar komen voor de plant. De hoeveelheid labiele fosfaat kan wel 1000 kg/ha bedragen. Afhankelijk van extractiemethode wordt een wisselende hoeveelheid fosfaat bepaald. Er bestaat een relatie tussen mate van extraheerbaarheid van de P en de beschikbaarheid van P voor de plant. De fosfaatbemestingsadviezen zijn gebaseerd op de extractie met water (1:60 volumedelen) uitgedrukt als Pw-getal. Daarnaast kennen we in de praktijk de extractie met 0,01M CaCl₂ (P-PAE) en de extractie met ammoniumlactaatazijnzuur (P-AL).

Extractiemethoden waarbij veel fosfaat in oplossing komt zoals bij de bepaling van het P-AL-getal geven een indicatie van de fosfaatcapaciteit (reserve voor lange termijn) en methoden waarbij weinig fosfaat in oplossing komt zoals bij de bepaling van P-PAE geven een indicatie voor de fosfaatintensiteit (directe beschikbaarheid). De bepaling Pw zit daar tussenin.

Wanneer de bemesting structureel lager is dan de afvoer plus de compensatie voor het 'onvermijdbaar verlies' zal de Pw-toestand geleidelijk dalen. Dit is een langzaam proces en het kan tientallen jaren duren voor de kritische grens van een Pw-waarde van 25 wordt bereikt. Beneden Pw25 mag een reparatiebemesting worden uitgevoerd. Bij een Pw30 is het opbrengstniveau van aardappelen bij een bemesting van 60 kg/ha ongeveer 2% lager dan bij een bemesting van 120 kg/ha.

Het effect van een verlaagde fosfaatbemesting is veel minder kritisch dan dat van stikstof. Anders dan bij stikstof verloopt de voeding van het gewas met fosfaat veel sterker via het bodemfosfaat. Van iedere 100 kg fosfaat die met bemesting wordt gegeven, wordt in het eerste jaar maar 10 tot 20 kg door het gewas opgenomen. Het overige fosfaat wordt in het bodemsysteem opgenomen en komt in de loop van vele jaren voor gewasopname beschikbaar. Deze lage schijnbare benutting direct na toediening biedt mogelijkheden om de efficiëntie van de bemesting te verhogen. Uit ouder onderzoek is gebleken dat dit enerzijds kan worden gerealiseerd door de bodemfactoren te optimaliseren die de P-benutting verhogen door te zorgen voor een goede bodemstructuur en een goede vochtvoorziening en anderzijds door de keuze van de meststof, de wijze waarop deze wordt toegediend (rijenbemesting) en het tijdstip (dicht bij zaaien/poten) van toediening. Door bedrijfsleven en onderzoekinstellingen is afgelopen jaren veel geëxperimenteerd om meststoffen en bemestingssystemen te ontwikkelen om de efficiëntie van de fosfaatbemesting te verhogen. Het is nog onduidelijk hoeveel perspectief zij bieden. Vooral bij gewassen met een korte groeiduur en een hoge P-behoefte (bijvoorbeeld sla), maar ook bij maïs en peulvruchten is perspectief te verwachten. In onderzoek in 2004 en 2005 in Zuidwest-Nederland met knolselderij en aardappel daarentegen kon geen effect van type meststof (Tripelsuperfosfaat of N/P-meststof) of van plaatsing van fosfaat (breedwerpig versus rijenbemesting) worden vastgesteld. Ondanks de betrekkelijk lage Pw-waarde (Pw 25 tot Pw30) werd met het niet met fosfaat bemeste object dezelfde opbrengst gehaald als met de bemeste objecten. Uit ouder onderzoek is gebleken dat er zeker perspectief is om door middel van andere mestsoorten, rijenbemesting en optimalisatie van het tijdstip van bemesten de efficiëntie van de fosfaatbemesting te verhogen, maar in recenter, onafhankelijk onderzoek kon dit vaak niet worden bevestigd. Een belangrijke oorzaak hiervan is dat de fosfaattoestand van de meeste landbouwgronden in Nederland op dit moment te hoog is om een dergelijk effect vast te kunnen stellen.

1 Inleiding

Akkerbouwers maken zich ongerust over de aanscherping van de gebruiksnorm voor fosfaat. Zij vrezen dat dit ten koste gaat van de opbrengst van de gewassen en dat het moeilijk wordt om de fosfaattoestand van de grond op peil te houden. Ook vreest men dat de verlaging van de gebruiksnorm de mogelijkheden beperkt om het organisch stofgehalte van de grond op peil te houden. Er kan bij een verlaagde gebruiksnorm minder mest worden toegediend.

In dit rapport wordt bestaande kennis over het belang van fosfaatbemesting op een rijtje gezet en wordt inzicht gegeven in ontwikkelingen om de efficiëntie van fosfaatbemesting te verhogen. Deze bureaustudie is een coproductie van PPO-agv en NMI (Nutriënten Management Instituut) en is uitgevoerd in opdracht van het Productschap Akkerbouw.

Om twee redenen worden er beperkingen opgelegd aan de hoogte van de fosfaatbemesting. Fosfaatuitspoeling leidt tot eutrofiëring van het oppervlaktewater en de fosfaatvoorraad op wereldschaal is beperkt.

Een hoge belasting van het oppervlaktewater met o.a. fosfaat leidt tot eutrofiëring. Eutrofiëring is vaak te herkennen aan overmatige groei van algen (in meren en plassen) en van waterplanten (bijv. kroosvorming in sloten en vaarten). Andere gevolgen zijn een eenzijdige visstand, soortenarmoede, zuurstofloosheid of drijfvlagen van algen. Vooral stagnante, niet stromende, wateren zijn kwetsbaar voor eutrofiëring. Door het afwezig zijn van stroming in deze wateren wordt kroosvorming en algenbloei in de hand gewerkt. Door hun afvoerfunctie is in veel tochten en kanalen de verblijftijd beperkt, waardoor geen sprake is van kroosvorming of algenbloei. De voor eutrofiëring meest kwetsbare wateren zijn wateren met de natuur- of zwemwaterfunctie. In wateren met een landbouwfunctie treedt het verschijnsel weliswaar ook op, maar is de schade beperkt.

Voor stagnante, niet stromende wateren (o.a. meren) geldt voor de zomerperiode een MTR-waarde van 0,15 mg P/liter. Bij een uitspoeling van 1 kg fosfaat per ha kan deze MTR-waarde al worden overschreden. De voorraden fosfaathoudende gesteenten die worden gebruikt voor de productie van fosfaatmeststoffen zullen de eerstvolgende twee eeuwen geleidelijk uitgeput raken. Als het huidige, licht dalende, gebruik van ruw fosfaat wordt voortgezet dan is er nog een voorraad gemakkelijk winbaar ruw fosfaat die voldoende is voor circa 200 jaar (Bockman et al. 1990).

Het gevolg is dat de prijs van fosfaatmeststoffen zal gaan stijgen en dat de energie-inzet om fosfaten te winnen moet worden vergroot. Bij de productie van kunstmestfosfaat en na toediening van fosfaatmeststof op het land komen elementen en metalen als cadmium vrij, die in hoge mate milieubelastend zijn. Uit- en afspoeling van fosfaat naar het oppervlaktewater leidt tot eutrofiëring en daarmee samenhangende effecten. Er zijn derhalve meerdere redenen om zuiniger met fosfaat in de landbouw om te gaan dan tot nu toe gebeurde.

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de huidige situatie wat betreft de mestwetgeving voor fosfaat, het niveau van bemesting in de praktijk en de gemiddelde fosfaattoestand op de akkerbouwbedrijven in Nederland.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de opbouw van het fosfaatbemestingsadvies met een bodemgericht en een gewasgericht bemestingsadvies, de symptomen van suboptimale fosfaatbemesting, de opbrengstreductie bij gereduceerde bemesting en de afvoer van fosfaat met het geoogste product.

In hoofdstuk 4 wordt het gedrag van fosfaat in de bodem besproken en wordt ingegaan op de fosfaattoestand van de grond bij evenwichtsbemesting. In hoofdstuk 5 worden maatregelen besproken die een positieve invloed hebben of kunnen hebben op de efficiëntie waarmee fosfaat door het gewas wordt opgenomen. Deze maatregelen zijn essentieel om bij een gereduceerde fosfaatbemesting het opbrengstniveau van de gewassen op peil te houden.

In hoofdstuk 6 worden enkele tips gegeven voor het efficiënt uitvoeren van de fosfaatbemesting en in hoofdstuk 7 worden literatuurbronnen vermeld.

2 Beschrijving huidige situatie

2.1 Wetgeving

In 2006 is in de Nederlandse wetgeving het stelsel van gebruiksnormen ingevoerd. Voor fosfaat betekent dit dat op bedrijfsniveau niet meer fosfaat mag worden bemest dan de gebruiksnorm voor dat betreffende jaar. De gebruiksnorm gaat de komende jaren vermoedelijk steeds met 5 kg fosfaat per ha omlaag. In 2006 was de gebruiksnorm 95 kg fosfaat per ha, in 2007 was de norm 90 kg/ha en in 2008 en in 2009 is de norm 85 kg/ha. Er is geen onderscheid naar grondsoort. De norm geldt voor de totale fosfaatbemesting; het totaal van fosfaat uit dierlijke mest, kunstmest, kalkmeststoffen en compost. Het fosfaat in schuimaarde telt in 2008 nog voor 50 % mee en in 2009 voor 100 %. Het fosfaat in compost telt tot een fosfaatgehalte van 7 kg P₂O₅/ton drogestof voor 50 % mee (maximale vrijstelling 3,5 kg P₂O₅/ton drogestof). De vrijstelling van 50 % is gebaseerd op de aanwezigheid van fosfaat in de grondbestanddelen van de compost. Dat fosfaat wordt niet als bemesting aangemerkt. Sinds 2006 wordt champost niet meer als compost, maar als dierlijke mest aangemerkt.

In 2006 en 2007 gold voor fosfaat uit dierlijke mest een maximale aanvoer van 85 kg/ha. Vanaf 2008 wordt de maximale aanvoer van fosfaat met dierlijke mest bepaald door de gebruiksnorm voor de totale fosfaatbemesting.

De definitieve hoogte van de gebruiksnorm voor fosfaat voor de periode 2009-2015 staat nog niet vast. Met de EU is overeengekomen dat de gebruiksnorm uiteindelijk wordt afgestemd op het bereiken van evenwichtsbemesting. Dit betekent bemesten op basis van afvoer van fosfaat met het geoogste product. Aanvoer door atmosferische depositie en afvoer door uitspoeling zijn klein (< 2 kg/ha) en hebben nagenoeg geen invloed op de fosfaatbalans. Voor het jaar 2015 wordt gesproken over een gebruiksnorm van 60 kg fosfaat per ha. Ook is er discussie om tot een differentiatie van de gebruiksnorm te komen op basis van de fosfaattoestand van de grond. Op gronden met een hoge fosfaattoestand zou dan een lagere en op gronden met een lage toestand een hogere gebruiksnorm gelden. Differentiatie is ook mogelijk naar de bemestingsbehoefte van gewassen dan wel naar de afvoer met het geoogste product.

2.1.1 Reparatiebemesting

Bij een Pw-waarde lager dan van 25 mg P₂O₅/liter mag een reparatiebemesting worden uitgevoerd. Gedurende een periode van 4 jaar geldt dan voor het betreffende perceel een gebruiksnorm van 160 kg fosfaat per ha. De extra bemesting, boven de gewone gebruiksnorm, mag alleen met kunstmestfosfaat worden uitgevoerd. Bij een gebruiksnorm van 85 kg P₂O₅/ha betekent dit dat gedurende 4 jaar op het betreffende perceel 75 kg fosfaat extra mag worden gegeven. Voor de bemonstering om voor reparatiebemesting in aanmerking te komen, geldt een afzonderlijk protocol. De verruiming van de gebruiksnorm geldt alleen voor percelen waarvoor door bemonstering en analyse de noodzaak is aangetoond. Het geldt niet voor het gehele bedrijf.

2.2 Huidig bemestingsniveau

De gemiddelde fosfaatbemesting was afgelopen jaren hoger dan de huidige gebruiksnorm van 85 kg P₂O₅/ha. Om aan de huidige en toekomstige gebruiksnormen voor fosfaat te voldoen moet de fosfaatbemesting op de meeste akkerbouwbedrijven omlaag. In 2008 moet de fosfaatbemesting al met

ongeveer 10 kg P₂O₅ per ha omlaag ten opzichte van het gebruik van afgelopen jaren. Daar akkerbouwers momenteel geld toe krijgen bij aanwending van dierlijke mest en de prijs van kunstmestfosfaat flink is gestegen, zal als eerste het gebruik van kunstmestfosfaat afnemen. In de twee volgende paragrafen wordt ingegaan op de hoogte van de fosfaatbemesting in de akkerbouw in afgelopen jaren.

2.2.1 CBS- en LEI-gegevens

Volgens CBS-gegevens werd in 2003 gemiddeld op het totale areaal cultuurgrond (veehouderij, akker- en tuinbouw) in Nederland 62 kg fosfaat uit dierlijke mest aangewend, 23 kg fosfaat uit kunstmest, 4 kg fosfaat met o.a. compost en kalkmeststoffen en was er sprake van een atmosferische depositie van 2 kg fosfaat per ha. De gemiddelde totale aanvoer naar de bodem kwam daarmee op een totaal van 91 kg fosfaat per ha cultuurgrond. In 1990 was dit nog 137 kg en in het jaar 2000 was dit 108 kg/ha. Van het kunstmestfosfaat wordt 15 % gegeven als tripelsuperfosfaat en 85 % als NPK-, NK- en PK-meststoffen. De afvoer met de geoogste gewassen wordt door het CBS voor het jaar 2003 becijferd op gemiddeld 54 kg fosfaat per ha cultuurgrond. De berekende gemiddelde netto belasting van de bodem komt in 2003 daarmee uit op 37 kg fosfaat per ha cultuurgrond (91 minus 54 kg/ha). Het CBS geeft geen onderscheid naar sectoren.

Volgens berekeningen van het LEI is op de akkerbouwbedrijven gemiddeld 55-60 kg P₂O₅ per ha met dierlijke mest gebruikt (Luesink et al., 2007).

2.2.2 Praktijkcijfers² en Telen met toekomst

In het project Praktijkcijfers² bleek dat in de periode 2000 t/m 2002 op akkerbouwbedrijven 92 kg fosfaat per ha werd bemest, waarvan 30 kg met kunstmestfosfaat. Op de zandgronden werd meer fosfaat met dierlijke mest en minder fosfaat met kunstmest gegeven.

In het project Telen met toekomst werd in de periode 2004 t/m 2007 op de 10 kernbedrijven akkerbouw gemiddeld 94 kg P₂O₅ per ha aan fosfaat aangewend, waarvan 62 kg met dierlijke mest, 25 kg met kunstmest en 7 kg met kalkmeststoffen en compost. Binnen het bedrijf wordt de meeste fosfaat gegeven aan aardappelen, mais en uien (gemiddeld krijgen deze gewassen ongeveer 130 kg fosfaat per ha) en de minste fosfaat aan de granen (gemiddeld ongeveer 30 kg/ha).

2.3 Fosfaattoestand op akkerbouwbedrijven in Nederland

Uit de bemonsteringen en analyses die door het Blgg in Oosterbeek zijn uitgevoerd, blijkt dat de gemiddelde fosfaattoestand van de akkerbouwbedrijven in Nederland vrij hoog tot hoog is. Uitgedrukt in Pw-waarde (mg P₂O₅/liter grond) hebben de bedrijven op de kleigrond en in het Noordelijk zandgebied een Pw-waarde van 45 tot 50 en de bedrijven in het Zuidoostelijk zandgebied een Pw-waarde van 70. De afgelopen 20 jaar is de fosfaattoestand van de grond in Nederland gemiddeld met 8 Pw-punten gestegen.

3 Bemesting en afvoer van fosfaat

3.1 Opbouw bemestingsadvies

De hoogte van de gewenste fosfaatbemesting hangt af van de grondsoort, de fosfaattoestand van de grond en van het gewas dat wordt geteeld. In de Adviesbasis Bemesting (Van Dijk, 2006) wordt de fosfaattoestand van de grond aangegeven met het Pw-getal (mg P₂O₅/liter grond). Het advies bestaat uit een gewasgericht advies en een bodemgericht advies voor de na te streven fosfaattoestand en eventuele reparatie daarvan.

In veeljarige proefvelden is bij fosfaatbehoefte gewassen (o.a. aardappel) gevonden dat bij een lage fosfaattoestand van de grond en een hoge fosfaatbemesting niet hetzelfde opbrengstniveau wordt gehaald als bij een hoge fosfaattoestand met een lage fosfaatbemesting. De fosfaattoestand van de grond belangrijker is voor het opbrengstniveau dan de fosfaatbemesting. In de Adviesbasis Bemesting worden daarom Pw-trajecten geadviseerd om de toestand te handhaven. Voor zeelei en zeezand is dit het traject Pw 25 tot Pw 45 en voor de overige grondsoorten het traject Pw 30 tot Pw 45.

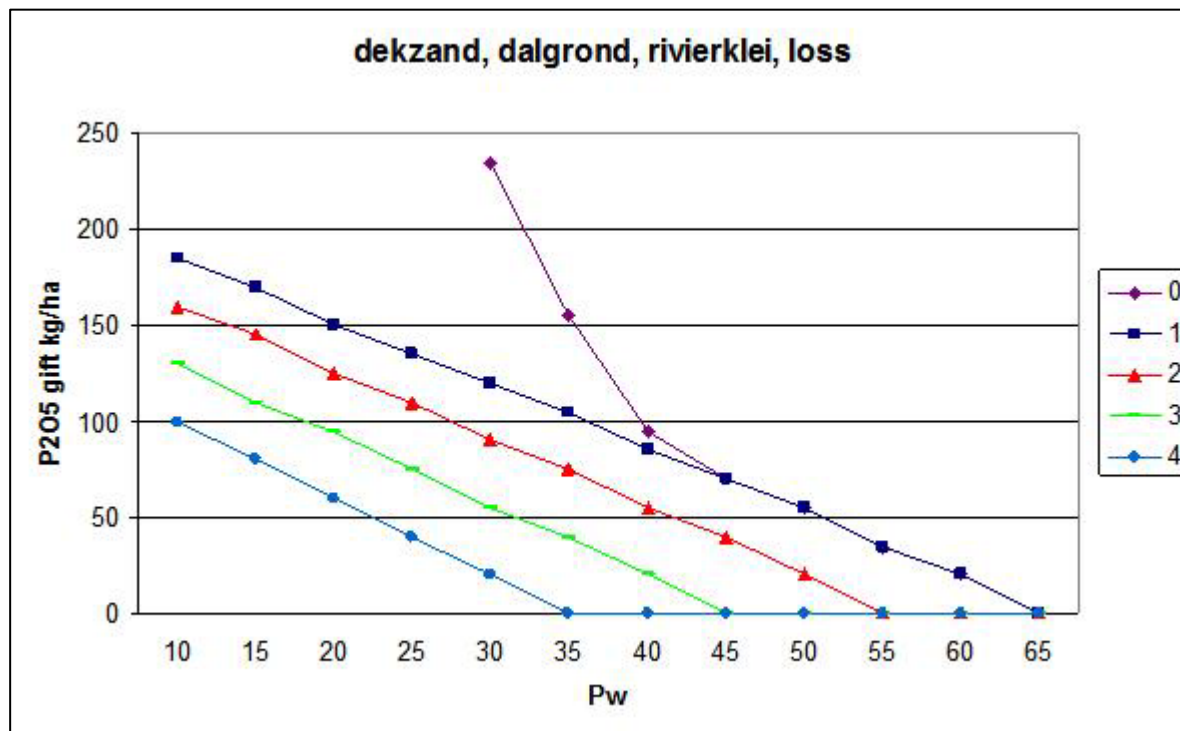
Voor het handhaven van een bepaalde toestand moet gemiddeld over het bedrijf de fosfaatafvoer worden gecompenseerd plus de 'onvermijdbare verliezen'. Op een gemiddeld akkerbouwbedrijf is de afvoer met het geoogste product ongeveer 60 kg fosfaat per ha en kan voor de 'onvermijdbare verliezen' worden uitgegaan van 20 kg P₂O₅/ha/jaar (Van Dijk, 2006). Op basis hiervan hoeft de huidige gebruiksnorm van 85 kg P₂O₅/ha geen probleem op te leveren.

3.2 Verschillen in de fosfaatbehoefte tussen gewassen

De gewasgerichte adviezen geven de fosfaatgiften die nodig zijn om gegeven de fosfaattoestand van de grond de economisch optimale opbrengst te bereiken. Hierbij is rekening gehouden met zowel de marktbaar opbrengst als de kosten voor de fosfaatmeststoffen op basis van kunstmest. De gewassen zijn ingedeeld in 5 groepen, afnemend in fosfaatbehoefte. In figuur 1 is voor o.a. zandgrond het P-bemestingsadvies weergegeven voor de gewasgroepen 0 tot en met 4 als functie van het Pw-getal. Voor kleigrond bestaat een soortgelijk advies (Van Dijk, 2006). De belangrijkste factoren die verantwoordelijk zijn voor de verschillen in P-behoefte tussen de gewasgroepen zijn de bewortelingsintensiteit en de groeisnelheid.

In een bouwplan dat voor 40 % is ingevuld met gewassen in gewasgroep 1 (o.a. aardappelen, maïs, peulvruchten en uien), 25 % met gewassen in gewasgroep 2 (o.a. suikerbieten), 10 % met gewassen in gewasgroep 3 (o.a. zomergerst) en 25 % met gewassen in gewasgroep 4 (o.a. winter- en zomertarwe, graszaad en koolzaad) is het fosfaatbemestingsadvies op bedrijfsniveau bij een fosfaattoestand van Pw-30 op kleigrond 69 kg/ha en dat op zandgrond 81 kg/ha. Bij een fosfaattoestand van Pw-45 is dit resp. 33 en 38 kg/ha.

Bij een toestand van Pw-30 is het bemestingsadvies hoger dan de gemiddelde fosfaatafvoer en bij een toestand van Pw-45 is het advies lager dan de gemiddelde afvoer. Bij strikt opvolgen van de Adviesbasis Bemesting werkt het adviesstelsel als een zichzelf corrigerend systeem om de toestand van de grond in het gewenste traject tussen Pw-30 en Pw-45 te houden.



Figuur 1. Fosfaatbestedingsadviezen in afhankelijkheid van het Pw-getal en de gewasgroep (0 t/m 4).

3.3 Functie van fosfor in de plant

Fosfor (P) heeft in de plant enkele zeer belangrijke functies. Het is een structurelement van nucleïnezuur, dat weer een onderdeel is van DNA-moleculen. Verder is P een onderdeel van enzymen, eiwitten en van zogenaamde fosfolipiden, die een rol spelen in celmembranen. P heeft ook een belangrijke rol in de energieoverdracht bij het metabolisme en de fotosynthese in cellen. Bij granen en grassen speelt P een belangrijke rol bij de uitstoeeling.

Fosfor is zeer mobiel in de plant en wordt na de opname snel getransporteerd vanuit de wortel naar andere delen van de plant. Bij het optreden van gebrek wordt P vanuit de oudere bladeren naar de jongste bladeren getransporteerd. P-gebrek uit zich dan ook het snelst in de oudere bladeren. Planten met P-gebrek hebben een geremde bladgroei en een vertraagde en verminderde bloei. Planten met P-gebrek zijn vaak donker van kleur. Bij mais is P-gebrek te herkennen aan de paarse verkleuring van delen van de bladeren en stengels (er worden anthocyanen gevormd). De wortelgroei wordt veel minder sterk geremd door sterk P-gebrek dan de groei van de bovengrondse delen. Planten met P-gebrek hebben daardoor vaak een relatief lage spruit/wortel-verhouding. De P-gehalten in het blad van een plant met P-gebrek zijn meestal lager dan 0,1-0,2 procent in de droge stof. De P-gehalten in de droge stof van bladeren van planten met voldoende P zijn meestal hoger dan 0,3 procent. Bij het afrijpen van granen wordt P vanuit de bladeren naar de korrel getransporteerd, waardoor het P-gehalte van het stro relatief laag (lager dan 0,2 procent) en dat van de korrel relatief hoog is (hoger dan 0,3 procent in de drogestof).

In het veeljarig fosfaatrapenproefveld van het PPO in Lelystad is geconstateerd dat bij een Pw-waarde lager dan Pw-20 de kropvorming van sla sterk wordt geremd en dat de begingroei van zaaiuien achterblijft bij die van hogere toestanden. Specifieke gebreksverschijnselen, anders dan achterblijven in groei, zijn bij die lage Pw-waarde op dit proefveld nooit waargenomen.

3.4 Opbrengstverlies bij gereduceerde fosfaatbemesting

Bij een Pw-toestand hoger dan Pw30 is er bij een goede toedeling van de bemesting naar de gewassen bij een gebruiksnorm van 60 kg P2O5/ha geen opbrengstderving te verwachten. De gebruiksnorm geldt op bedrijfsniveau en dat betekent dat binnen het bedrijf de fosfaat aan de meest fosfaatbehoefte gewassen kan worden gegeven. Teruggang in fosfaatbemesting tot het niveau van evenwichtsbemesting leidt alleen bij de meest fosfaatbehoefte gewassen tot opbrengstderving. Dit is in tabel 1 weergegeven. De opbrengst bij een bemesting van 120 kg fosfaat/ha bij een toestand van Pw-30 is hierbij op 100 % gesteld. De opbrengstreactie bij suboptimale fosfaatbemesting is veel geringer dan die bij suboptimale N-bemesting. Achterwege blijven van een N-bemesting leidt bij veel gewassen direct het eerste jaar tot een opbrengstreductie van 30 tot 50 %, terwijl het effect van een achterwege blijven van een fosfaatbemesting het eerste jaar veelal niet aantoonbaar is. Bij fosfaat voedt de bodem het gewas en is de directe bijdrage van de bemesting aan de opbrengst beperkt.

is echter zeer beperkt. Tabel 1. Indicatieve procentuele opbrengstreductie (fysieke productie) bij gereduceerde fosfaatbemesting (PPO-agv)

gewasgroep	P-toestand	Fosfaatbemesting in kg P2O5/ha				
		0	60	90	120	240
0 (o.a. bladgroenten)	Pw-30	6	4	2	0	-1
	Pw-45	2	0	0	0	0
1 (o.a. aardappel)	Pw-30	5	2	1	0	0
	Pw-45	2	0	0	0	0
2 (o.a. suikerbiet)	Pw-30	4	1	1	0	0
	Pw-45	1	0	0	0	0
3 (o.a. zomergerst)	Pw-30	0	0	0	0	0
	Pw-45	0	0	0	0	0
4 (o.a. wintertarwe)	Pw-30	0	0	0	0	0
	Pw-45	0	0	0	0	0

Stel dat de fosfaatgebruiksnorm in 2015 op 60 kg P2O5 per ha gesteld wordt en dat het bouwplan voor een akkerbouwbedrijf op zandgrond voor 40 % is samengesteld uit gewassen in gewasgroep 1, voor 25 % uit gewassen in groep 2, voor 10 % uit gewassen in groep 3 en voor 25 % uit gewassen in groep 4 en dat de toestand van alle percelen Pw-30 is. Bij bemesting volgens adviesbasis wordt aan deze gewassen resp. 120, 90, 55 en 20 kg fosfaat per ha gegeven en dit komt uit op een gemiddelde gift van 81 kg P2O5/ha. Bij een gebruiksnorm van 60 kg/ha is deze gift niet meer toegestaan. Het meest waarschijnlijk is dat eerst de fosfaatbemesting aan de gewassen in gewasgroep 3 en 4 achterwege wordt gelaten en naar rato dat overblijft de gewassen in gewasgroep 2. In dit voorbeeld betekent dit dat de gewassen in gewasgroep 1 volgens advies bemest worden en dat de gewassen in gewasgroep 2 niet met 90 kg maar met 48 kg P2O5 per ha bemest worden. Dit kost dit bedrijf op 25 % van de oppervlakte 1 % aan fysieke opbrengst. Zolang de Pw-waarde niet beneden Pw-30 zakt is er voor dit bedrijf op de zandgrond geen aantoonbare opbrengstreductie te verwachten. Voor een bedrijf op de kleigrond met hetzelfde bouwplan geldt dit in nog sterkere mate. In dit rekenvoorbeeld is de opbrengstreductie van een bedrijf op kleigrond nog lager. Bedrijven die door landruil en landhuur gespecialiseerd zijn in gewassen die alle in gewasgroep 0 en 1 zijn geplaatst, moeten bij een gebruiksnorm van 60 kg fosfaat per ha en een fosfaattoestand lager dan Pw-45 wel rekening houden met een opbrengstreductie.

Bij een Pw-waarde van 25 of juist daarboven is er geen gebruiksnorm om een reparatiebemesting uit te voeren. Dit betekent dat in die situaties met een iets grotere opbrengstderving rekening moet worden gehouden dan bij Pw-30 het geval is. Het aantal bedrijven met zo'n lage Pw-waarde Voor gespecialiseerde vollegrondsgroentebedrijven met veel bladgewassen levert een gebruiksnorm van 60 kg/ha/jaar wel grotere problemen op. Bij een Pw 30 is het P-advies voor gewassen in gewasgroep 0 (o.a. bladgroenten) gelijk aan 240 kg P2O5/ha en bedraagt de opbrengstreductie bij een bemesting van 60 kg P2O5/ha 5%.

3.5 Afvoer van fosfaat met het geoogste product

Op dit moment wordt voor de openteelten (akker- en tuinbouw) met een generieke afvoernorm gerekend van 60 kg fosfaat per ha. Tussen de gewassen bestaan echter grote verschillen in de hoeveelheid fosfaat die met het geoogste product wordt afgevoerd. Bij veel tuinbouwgewassen (fruit, bloembollen, boomkwekerijgewassen en een aantal vollegrondsgroenten) is de werkelijke afvoer ongeveer 30 kg P₂O₅ per ha. Bij een aantal akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenten (wintertarwe, peen en knolselderij) is de werkelijke afvoer hoger dan de generieke norm van 60 kg/ha. De hoogte van de afvoer hangt uiteraard af van het opbrengstniveau en van het fosfaatgehalte in het geoogste product. Groeiomstandigheden, maar ook de keuze van het ras, het wel of niet oogsten van een bijproduct, de grondsoort, de fosfaattoestand van de grond, de hoogte van de stikstof- en fosfaatbemesting en het oogststadium hebben invloed op de fosfaatafvoer.

Vanwege de grote variatie in fosfaatafvoer is het wenselijk dat de afvoer wordt gedefinieerd bij opgelegde condities (opbrengstniveau, fosfaattoestand van de grond, bemesting volgens adviesbasis, toepassing van Goede Landbouw Praktijk etc.). Uit een studie van Alterra, PPO en ASG (Ehlert, 2006) blijkt dat afgelopen decennia het fosforgehalte in het geoogste product bij een aantal gewassen iets is gedaald. De opbrengsttoename die afgelopen decennia is gerealiseerd, heeft tot een iets lager fosforgehalte in het geoogste product geleid.

4 Gedrag van fosfaat in de bodem

Om het gedrag van fosfaat in de bodem te begrijpen, wordt in dit hoofdstuk op een aantal belangrijke processen ingegaan. Kennis van deze processen is van belang om een inschatting te kunnen maken van het gevolg van een verlaagde gebruiksnorm op de fosfaattoestand van de grond en op de beschikbaarheid van fosfaat voor het gewas.

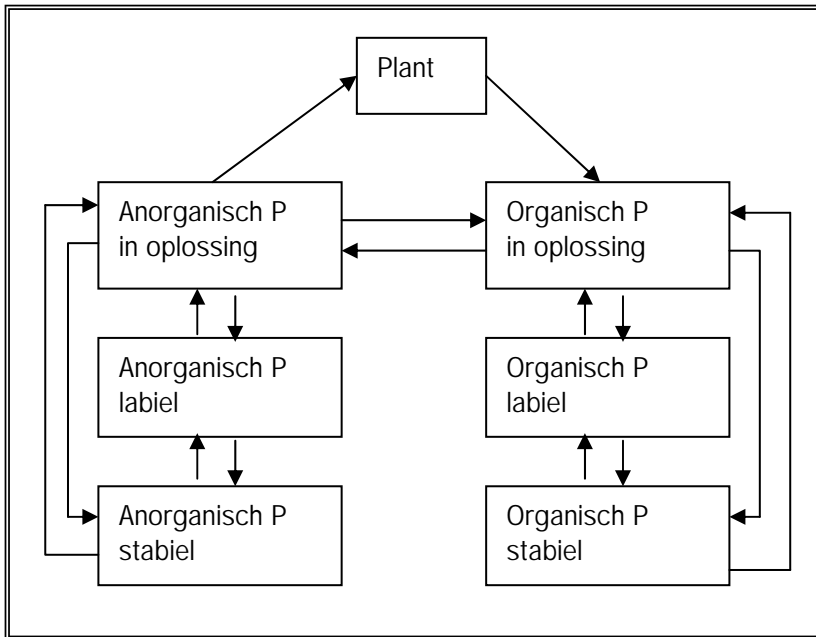
4.1 Vormen waarin fosfaat aanwezig is

In de bodem komt een groot aantal verschillende P-vormen voor, zowel in anorganische als organische vorm (figuur 2). Anorganisch P dat in de bodemoplossing aanwezig is, is voor een groot deel beschikbaar voor opname door de plant. De belangrijkste anorganische P-vormen die in de bodemoplossing voorkomen zijn de fosfaationen HPO_4^{2-} en H_2PO_4^- . Bij een pH van 7,2 is evenveel H_2PO_4^- als HPO_4^{2-} aanwezig, bij een pH lager dan 7,2 is meer H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} aanwezig en bij een pH hoger dan 7,2 is minder H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} aanwezig. Planten nemen sneller eenwaardig geladen ionen op dan tweewaardig geladen. In de agrarische praktijk heeft het merendeel van de gronden een pH lager dan 7,2. Voor de plant is het dan gunstig dat relatief veel H_2PO_4^- beschikbaar is.

Voor de Nederlandse situatie kan een schatting worden gemaakt van de gemiddelde hoeveelheid organisch P of P_2O_5 die in de bouwvoor aanwezig is. Gerekend wordt met een bouwvoorgewicht van 4 miljoen kg (laag 0-30 cm met een dichtheid van $1,33 \text{ kg dm}^{-3}$) en een organische stofgehalte van 4%. Uitgegaan wordt van een C-gehalte in de organische stof van 50%. De hoeveelheid C in de organische stof van de bouwvoor bedraagt dan 50% van 4% van 4 miljoen kg = $80.000 \text{ kg ha}^{-1}$. Bij een C/P-verhouding van 110 (benadering voor minerale gronden) bedraagt de hoeveelheid organisch P in de bouwvoor dan $80.000/110 = 727 \text{ kg P ha}^{-1}$ of $1.665 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. Bij een totale hoeveelheid fosfaat in Nederlandse gronden van 5.000 tot $10.000 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ betekent dit dat 33 tot 17% van de totale hoeveelheid fosfaat in de humus aanwezig is en dat het grootste deel dus in anorganische (minerale) vorm aanwezig is.

De niet opgeloste anorganische en organische P-verbindingen zijn te verdelen in labiele en stabiele verbindingen. Het labiele P is in evenwicht met de P in oplossing en kan snel beschikbaar komen voor de plant (figuur 2). De stabiele P-verbindingen zijn meestal slecht oplosbaar en daardoor ook slecht beschikbaar voor de plant. Tot de stabiele anorganische P-verbindingen behoren onder andere de P-houdende bodemmineralen (bijvoorbeeld apatiet). Tot de labiele anorganische P-verbindingen behoren geadsorbeerd P en ijzer-, aluminium- en calciumfosfaten. In zure gronden is P vaak gebonden aan ijzer (Fe) en aluminium (Al) en in kalkrijke gronden is P meestal gebonden aan calcium (Ca).

Organisch P is afkomstig van afgestorven planten, dieren en micro-organismen en van organische producten als mest en compost. De belangrijkste organische P-verbindingen in bodems zijn myo-inositol-fosfaten, nucleïnezuur, fosfolipiden en eiwitgebonden P-verbindingen. Organisch P komt pas na afbraak door micro-organismen beschikbaar voor de plant. De totale hoeveelheid organisch P in de bodem is sterk afhankelijk van grondsoort, humusgehalte en (historie van) landgebruik en kan variëren van 20 tot meer dan 90 procent van de totale hoeveelheid P.



FIGUUR 2. Schematisch overzicht van P-verbindingen in de bodem. Pijlen geven mogelijk transport en mogelijke omzettingen weer.

In tabel 2 wordt een schematisch overzicht gegeven van de P-fracties in bodem en plant. Deze tabel geeft aan dat de hoeveelheid P in de bodemoplossing zeer gering is ten opzichte van de totale P-voorraad van de bodem.

TABEL 2. Schematische weergave van de verdeling van P-verbindingen in bodem en plant (Wild, 1988); toegevoegd een kolom met P_2O_5 -hoeveelheden in $kg\ ha^{-1}$ bouwvoor bij een dichtheid van $1,33\ kg\ dm^{-3}$.

P-verbindingen	P in $mg\ kg^{-1}$ grond	P_2O_5 in $kg\ ha^{-1}$ (laag 0-30 cm)
stabiel anorganisch P	400	3.664
labiel anorganisch P	10-100	92-920
stabiel + labiel organisch P	200	1.832
P in bodemoplossing	0,1	0,9
opgelost P aan worteloppervlak	< 0,1	< 0,9
P in plant ($mg\ kg^{-1}$ droge stof)	4	-

4.2 Bodemprocessen

De processen waarbij fosfor (P) in de bodem wordt omgezet, zijn in drie groepen te verdelen:

- neerslaan-oplossen
- adsorptie-desorptie
- immobilisatie-mineralisatie.

4.2.1 Neerslaan en oplossen van P-verbindingen

Bij een lage bodem-pH vormt P slecht oplosbare verbindingen met vrij Fe en Al en bij een hoge bodem-pH vormt P slecht oplosbare verbindingen met Ca. Bij een neutrale bodem-pH vormt P redelijk oplosbare verbindingen met Ca en Mg. Er bestaat een zeer groot aantal P-verbindingen in de bodem, waarvan de oplosbaarheid en daarmee de beschikbaarheid voor de plant sterk verschilt.

4.2.2 Adsorptie en desorptie van P in de bodem

Fosfor kan elektrostatisch worden geadsorbeerd aan positief geladen delen in de bodem: aan randen van kleimineralen en aan het oppervlak van Fe- en Al-(hydr)oxiden. P wordt in mindere mate geadsorbeerd aan het oppervlak van calciet en aan organische Fe- en Al-complexen.

De belangrijkste factoren die de P-adsorptie in de bodem bepalen, zijn het oppervlak van de reactieve delen in de bodem (hoeveel en welke soorten kleimineralen en oxiden zijn er aanwezig) en de samenstelling van de bodemoplossing. De P-adsorptie aan kleimineralen en Fe- en Al-(hydr)oxiden is het hoogst bij lage pH-waarden. De adsorptie aan kleimineralen is afhankelijk van het soort klei en de kationenbezetting van de klei. Tweewaardig geladen kationen stimuleren de adsorptie van P (klei met veel Ca^{2+} kan meer P adsorberen dan klei met veel K^+). In sommige gronden (met name ijzerhoudende gronden) wordt fosfaat zeer sterk gebonden (fosfaatfixatie). Anionen als sulfaat en molybdaat en bepaalde organische anionen kunnen in competitie gaan met fosfaat of, in het geval van organische anionen, organische complexen vormen waardoor de adsorptie van P kan worden tegengegaan. De anionen nitraat en chloride hebben geen effect op de P-adsorptie.

4.2.3 Immobilisatie en mineralisatie van P

De microbiële afbraak van organische stof in de bodem kan leiden tot het vrijkomen van anorganisch P. De mate van afbreekbaarheid van de organische stof bepaalt in sterke mate de hoeveelheid P die door mineralisatie vrijkomt. Inositol-fosfaten zijn moeilijker afbreekbaar dan nucleïne-zuren en fosfolipiden. Daarnaast speelt de verhouding tussen koolstof (C) en P in de organische stof een belangrijke rol bij het vrijkomen van P, analoog aan de C/N-verhouding bij de N-mineralisatie. Bij een C/P-verhouding van het organisch materiaal kleiner dan 200/1 treedt meestal netto P-mineralisatie op en bij een verhouding hoger dan 300/1 treedt P-immobilisatie op (P-immobilisatie is het vastleggen van anorganisch P door micro-organismen). Het moet duidelijk worden benadrukt dat deze waarden heel globaal zijn en dat aanzienlijke afwijkingen in de praktijk kunnen optreden. In bodems met een sterk stijgend organische stofgehalte, zoals jonge graslanden, kan een aanzienlijk deel van het toegediende anorganische P worden vastgelegd als organisch P. Omgekeerd kan na het scheuren van grasland ook veel P beschikbaar komen voor de eerstvolgende gewassen.

4.3 Transport van P in de bodem

Er zijn twee manieren van P-transport in de bodem: diffusie en massastroming.

Diffusie is het transport van ionen via een concentratiegradiënt en massastroming is de aanvoer van nutriënten via de waterstroom die wordt aangedreven door de verdamping van de plant. Diffusie is het belangrijkste transportmechanisme van P in de bodem naar de wortels toe. Massastroming is een relatief onbelangrijk transportmechanisme van P, omdat de P-concentratie in de bodem heel laag is (de P-aanvoer via massastroming = aanvoer van bodemvocht x P-concentratie in bodemvocht).

Naast diffusie en massastroming bestaat een derde mechanisme waarop P bij de wortels kan komen: wortelinterceptie. Wortelinterceptie is het proces waarbij de wortels in de bodem groeien en als gevolg daarvan direct in aanraking komen met bodem-P. Vaak wordt wortelinterceptie als een diffusieproces beschouwd. Van de totale P-behoefte van een gewas (bovengrondse en ondergrondse delen) van 40 kg P per ha wordt ruwweg 37 kg P per ha aangevoerd door diffusie, 2 kg P per ha door massastroming en 1 kg P per ha door wortel-interceptie. De diffusiesnelheid in de bodem wordt sterk beïnvloed door het vochtgehalte, de structuur/textuur van de bodem en de adsorptie van fosfaat in de bodem.

4.4 Effecten in de wortelzone die de P-opname beïnvloeden

Omdat P weinig mobiel is in de bodem zijn de beworteling en (bio)chemische processen die in de wortelzone optreden van groot belang bij de opname van bodem-P door planten.

Processen in de wortelzone die de P-beschikbaarheid en P-opname kunnen beïnvloeden zijn:

- pH-effecten. Een pH-daling leidt tot het oplossen van Ca-fosfaten en tot een geringere mobiliteit van Fe- en Al-fosfaten als gevolg van adsorptie van P aan Fe- en Al-hydroxiden. In gronden met veel Ca-fosfaten zal een pH-daling leiden tot een verhoging van de P-beschikbaarheid en in gronden met veel Al- en Fe-hydroxiden leidt een pH-daling tot P-vastlegging waardoor de beschikbaarheid afneemt. Planten scheiden zuur of base uit om de electroneutraliteit te bewaren. Voor een deel is dit genetisch bepaald, maar daarnaast wordt de zuur/base-uitscheiding in sterke mate bepaald door de nutriëntenopname door de plant. De N-vorm die door de plant wordt opgenomen is hierbij van belang. Bij ammonium(NH_4^+)-opname scheidt de plant meestal zuur uit en bij nitraat(NO_3^-)-opname scheidt de plant meestal base uit.
- Uitscheiding van organische zuren (bijvoorbeeld citraat). Deze organische zuren kunnen P, dat aan Fe en Al is geadsorbeerd, verdringen (er worden organische Fe- en Al-complexen gevormd).
- Accumulatie van Ca aan het worteloppervlak, waardoor moeilijk oplosbare Ca-fosfaten worden gevormd en de P-beschikbaarheid afneemt.
- Stimulering van de activiteit van micro-organismen in de rhizosfeer, waardoor de afbraak van organisch P kan toenemen.
- Uitscheiding door wortels en micro-organismen van enzymen die fosfaatverbindingen kunnen afbreken, zoals fytase en fosfatase (bekend is dat dit bij wintertarwe gebeurt).
- Infectie van de wortels met mycorrhiza (schimmels die P opnemen en aan de plant doorgegeven), waardoor de P-opname kan toenemen.

4.5 Beschikbare hoeveelheid fosfaat in de bodem

Voor het karakteriseren van de hoeveelheid bodem-P, die beschikbaar is voor opname door het gewas, worden verschillende grondonderzoeksmethoden toegepast. Bij deze methoden worden verschillende extractiemiddelen gebruikt, die variëren in sterkte: van water tot ongebufferde zure oplossingen.

Er wordt verondersteld dat er een relatie bestaat tussen de mate van extraheerbaarheid van de P en de beschikbaarheid van de P voor de plant. Bij de meeste methoden is door middel van veld- en potproeven vastgesteld wat de relatie is tussen gewasgroei en de met het extractiemiddel geëxtraheerde P. Deze relatie vormt dan de basis voor het P-bemestingsadvies.

Bij extractiemiddelen kan een onderscheid worden gemaakt tussen de zwakke middelen, die een maat zijn voor de fosfaatintensiteit van de bodem, en de sterke middelen, die een maat zijn voor de fosfaatcapaciteit van de bodem. De fosfaatintensiteit is de hoeveelheid anorganisch P die in de bodemoplossing aanwezig is. De fosfaatcapaciteit is een maat voor de hoeveelheid labiel P: de hoeveelheid fosfaat die in de vaste fase aanwezig is en die een bijdrage levert aan het weer aanvullen van de P in de bodemoplossing, indien deze voorraad teruggelopen is. De fosfaatintensiteit geeft een indicatie van de hoeveelheid P die direct beschikbaar is voor het gewas gedurende een korte periode en de fosfaatcapaciteit geeft een indicatie van de hoeveelheid P die over een langere periode gezien beschikbaar kan komen voor het gewas (meerdere jaren). Extractie met 0,01 M CaCl_2 geeft een indicatie van de fosfaatintensiteit en extractie met ammoniumlactaat-azijnzuur (P-AL-getal) en natriumbicarbonaat (P-Olsen) geven een indicatie van de fosfaatcapaciteit. De extractie met water (Pw-getal) zit hier tussen in en is om die reden niet te karakteriseren als intensiteits- of capaciteitsbepaling.

In de Adviesbasis Bemesting (Van Dijk, 2006) wordt het Pw-getal gebruikt om de P-toestand van de bodem te karakteriseren. Het Pw-getal wordt bepaald door middel van extractie van 1 volumedeel luchtdroge grond met 60 volumedelen water bij 20 °C en wordt uitgedrukt in mg P_2O_5 per liter droge grond. 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 P-bemestingsadviezen (o.a. Van der Paauw et al., 1971).

Sinds een aantal jaren wordt door de sectie Bodemkwaliteit van Wageningen Universiteit en Blgg gewerkt aan aanpassing van het P-bemestingsadvies, door een extractiemethode te ontwikkelen die een betere voorspelling geeft van de P-beschikbaarheid in de grond voor het gewas, door gebruik te maken van kennis over het gedrag van P in de bodem. Zo bleek uit laboratorium- en potexperimenten dat de P-beschikbaarheid, waarvan de nalevering van gebonden P een belangrijk onderdeel is, goed wordt beschreven met de combinatie van P-AL en P-CaCl₂ in combinatie met bodemchemische kennis (Van Rotterdam et al., 2008). Blgg is inmiddels overgegaan tot het gebruik van deze methode en geeft bemestingsadviezen aan de praktijk op basis van een combinatie van P-AL en een afgeleide van P-CaCl₂ (door Blgg P-PAE genoemd).

De analyse-uitslag van een bepaling van de fosfaattoestand van de grond kent altijd een onzekerheidsmarge. Naarmate een perceel minder uniform is, is het moeilijker om een representatief monster te steken en er is altijd sprake van een analysefout op het lab. De uitslag is dit dus geen absolute waarde. De onzekerheid bedraagt ongeveer 10 %. Een analyse-uitslag van Pw-40 wil zeggen dat de uitslag tussen Pw-36 en Pw-44 zit. Daarnaast heeft ook het tijdstip van het jaar dat bemonsterd wordt en het gewas dat als laatste geteeld is vermoedelijk een invloed. Bekend is ook dat na bekalken een lagere Pw-waarde wordt gemeten. Bij het bepalen van de bemestingsgift moet daarom niet alleen op de uitslag van de laatste bemonstering worden afgegaan, maar moet het verloop van de fosfaattoestand over meerdere meetpunten beschouwd worden.

4.6 Fosfaatverzadigde grond

Reeds lang voordat de bodem geheel (100 %) met fosfaat verzadigd is, worden verhoogde fosfaatconcentraties in het grondwater aangetroffen. Bij de definitie van fosfaatverzadigde kalkarme zandgrond wordt van fosfaatverzadiging gesproken als een fosfaatconcentratie van 0,1 mg ortho-P per liter in het bovenste grondwater (gemiddeld hoogste grondwaterstand; GHG) wordt overschreden (Advies TCB, 1990). Indien de bodem in het geheel geen fosfaat meer vastlegt, kunnen na bemesting minerale fosfaatconcentraties worden aangetroffen die kunnen oplopen tot 10-150 mg P per liter (Van der Zee et al., 1990). Bij overschrijden van de waarde van 0,1 mg/liter zal op kalkarme zandgronden 25 % van de bindingscapaciteit van fosfaat verbruikt zijn. Naar schatting kan ongeveer de helft van het landbouwareaal in Nederland als 'fosfaatverzadigde grond' gekenmerkt worden.

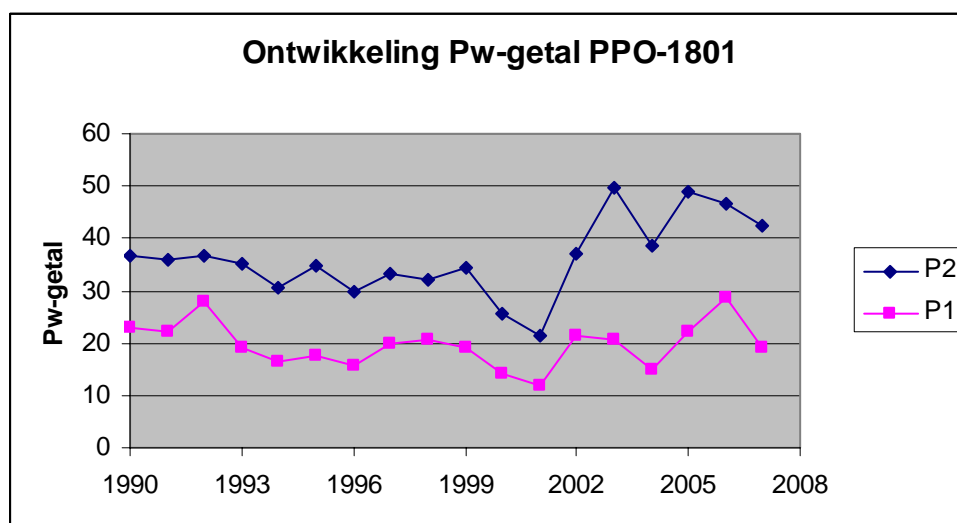
Om de uitspoeling van fosfor uit de bovengrond naar de ondergrond en naar het grond- en oppervlaktewater tot een milieukundig aanvaardbaar niveau te brengen, zal de fosfaattoestand zo laag mogelijk moeten zijn. Voor een milieukundig aanvaardbaar niveau van P-uitspoeling is een fosfaattoestand van Pw-getal groter dan 30 mg P₂O₅ per liter grond te hoog. Momenteel heeft meer dan 80 % van de akkerbouwpercelen een Pw-getal > 30. De fosfaattoestand van de Nederlandse landbouwgrond zal dus naar een lager niveau moeten worden gebracht.

4.7 Grondwaterstand

Vernatting leidt ertoe dat meer fosfaat in oplossing komt en gevoeliger wordt voor uitspoeling. Bij lage nitraatconcentraties wordt bij vernatting ijzer gereduceerd van Fe³⁺ naar Fe²⁺, waardoor de redoxpotentiaal daalt. IJzerverbindingen hebben in gereduceerde toestand echter een beduidend lagere bindingscapaciteit, waardoor fosfaat bij vernatting gemobiliseerd wordt in het bodemvocht. Als de ijzergebonden fosfaatfractie groot genoeg is, zal vernatting altijd leiden tot eutrofiëring, los van de waterkwaliteit. Alleen in die bodems waarin maar een kleine hoeveelheid fosfaat aan ijzer gebonden is, zal weinig eutrofiëring optreden. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn in kalkrijke bodems, waarin een groot deel van de voedingsstof in de calciumgebonden fractie zit, ongevoelig voor redoxveranderingen.

4.8 Fosfaattoestand van de grond bij evenwichtsbemesting

Uit de resultaten van veeljarige veldproeven blijkt dat wanneer een strikte evenwichtsbemesting wordt toegepast het Pw-getal langzaam gaat dalen. Deze daling varieert gemiddeld over een langere periode van 0 tot 2 Pw-punt per jaar. Door jaarlijkse schommelingen in het Pw-getal kan soms een grotere daling worden vastgesteld, maar ook is het mogelijk dat bij een negatief fosfaatoverschot zelfs een hogere Pw-waarde wordt gemeten. Voor een goede interpretatie is het belangrijk om het gemiddelde verloop van het Pw-getal over een langere periode te bekijken. Dit wordt ook zichtbaar gemaakt in figuur 3 van het proefveld PPO-1801 in Lelystad.



Figuur 3. Ontwikkeling Pw-getal veeljarig fosfaatrapenproefveld PPO-1801 in Lelystad. Object P2 met een gemiddeld positief bemestingsoverschot van 29 kg P2O₅/ha/jaar en object P1 met een gemiddeld negatief bemestingsoverschot van 33 kg P2O₅/ha/jaar.

In object P1 is gedurende 18 jaar gemiddeld 7 kg fosfaatbemesting gegeven en is de gemiddelde afvoer met het geoogste product 40 kg/ha. Er is sprake van een jaarlijks negatief overschot van gemiddeld 33 kg P2O₅/ha. In object P2 is gedurende 18 jaar gemiddeld 76 kg bemesting gegeven en is de gemiddelde afvoer met het geoogste product 47 kg/ha. Er is sprake van een jaarlijks positief overschot van 29 kg P2O₅/ha. In beide objecten is een grillig verloop van de fosfaattoestand in de tijd te zien. In de figuur is de trendlijn bij P1 een gemiddelde verlaging van 0,1 Pw-punt per jaar en bij P2 een gemiddelde verhoging van 0,6 Pw-punt per jaar. Het is zeer opvallend dat het Pw-getal van object P1 na een sterke verlaging in de periode tot 2001 daarna zo sterk is toegenomen en in 2006 zelfs boven de begintoestand van het jaar 1990 lag. Op dit proefveld is de post 'onvermijdbare verliezen' veel lager dan 20 kg P2O₅/ha.

Uit een modelberekening blijkt dat gemiddeld over meerdere grondsoorten bij het hanteren van een fosfaatoverschot van 20 kg P2O₅ per ha per jaar de Pw-toestand over een periode van 50 jaar tendeert naar Pw₂₀ tot Pw₂₅. Bij strikte evenwichtsbemesting is deze eindwaarde uiteraard nog lager. Dit resultaat van een modelberekening kan nog niet worden gestaafd met resultaten uit veldonderzoek. Na een reparatiebemesting stijgt de waarde van het Pw-getal weer.

Geconcludeerd kan worden dat de aanvoernorm van fosfaat tot het jaar 2009 voldoende hoog is om de fosfaattoestand van de grond te handhaven. Als gevolg van toekomstige normstelling zal (met behoud tot de mogelijkheid om beneden Pw₂₅ een reparatiebemesting uit te voeren) de fosfaattoestand van de grond op lange termijn (tientallen jaren en soms nog langer) zich stabiliseren tussen Pw₂₅ en Pw₃₀.

5 Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting

5.1 Werkingscoëfficiënt

Als gevolg van de steeds scherper wordende P-gebruiksnormen, met als voorziene eindnormen in 2015 maximale hoeveelheden van 60 kg P₂O₅ per ha bouwland en 90 kg P₂O₅ per ha grasland, is efficiënter gebruik van zowel de bodemvoorraad aan P als van P-meststoffen noodzakelijk. In dit hoofdstuk gaan we in op de mogelijkheden om de P-efficiëntie van meststoffen te verhogen. Op basis van de hiervoor beschreven kennis over het gedrag van P in de bodem en de beschikbaarheid ervan voor gewassen zijn een aantal maatregelen denkbaar waarmee de P-efficiëntie kan worden geoptimaliseerd. Voor we beginnen met een bespreking van mogelijke maatregelen om de efficiëntie te optimaliseren, gaan we eerst in op enkele begrippen die in dit verband worden gebruikt: het rendement of benutting en de werking of werkingscoëfficiënt. Het P-rendement of de schijnbare P-benutting (apparent P recovery) is gedefinieerd als het percentage van de als meststof toegediende P dat wordt opgenomen door de plant. Meestal wordt het P-rendement bepaald uit het verschil tussen de P-opname door het bemeste gewas en die door het onbemeste gewas (zie formule).

$$\text{P-rendement} = \frac{(\text{P-opname van P-bemest gewas}) - (\text{P-opname van onbemest gewas})}{\text{P-gift}}$$

Het P-rendement wordt berekend bij een bepaalde P-gift. Aangezien het verband tussen de P-gift en de P-opname niet-lineair is, varieert het P-rendement met de P-gift. Het P-rendement is bij lage giften hoger dan bij hoge giften. Bovendien neemt het P-rendement van meststoffen in het algemeen toe naarmate de P-toestand van de bodem lager is.

Na toediening aan de bodem wordt een deel van het toegediende P vastgelegd. Deze chemische bodemreacties leiden ertoe dat zelfs van goed oplosbare, minerale P-meststoffen, bijvoorbeeld tripelsuperfosfaat (TSP), slechts een gedeelte beschikbaar is voor het gewas in het jaar van toediening. Uit proeven blijkt dat het P-rendement van (tripel)superfosfaat in het jaar van toediening bij akkerbouwgewassen maximaal 20 procent is en dat die in de praktijk vaak slechts ongeveer 10% bedraagt. Dit betekent dus dat bij veel akkerbouwgewassen slechts 10% van de P die met een goed oplosbare P-meststof wordt gegeven in het betreffende jaar wordt opgenomen door het gewas.

Wanneer in experimenteel onderzoek de P-werking van een bepaalde meststof moet worden bepaald, dan wordt daarbij altijd de vergelijking gemaakt met een gangbare, goed oplosbare referentiemeststof. Bij fosfaat zijn dat vrijwel altijd de enkelvoudige P-meststoffen superfosfaat of TSP. In het onderzoek worden de referentiemeststof en de testmeststof dan in verschillende hoeveelheden toegediend. Vervolgens wordt het effect op de opbrengst (of de P-opname of de P-toestand van de grond) bepaald. De werking van de testmeststof wordt vervolgens uitgedrukt als een percentage van de werking van de referentiemeststof: de P-werkingscoëfficiënt.

Bij een P-werkingscoëfficiënt van 100 procent heeft de testmeststof dezelfde werking als de referentiemeststof. Dit getal zegt echter nog niets over de hoeveelheid van de toegediende P die wordt opgenomen. Ook bij een P-werkingscoëfficiënt van 100 procent is het P-rendement bij akkerbouwgewassen vaak niet hoger dan zo'n 10%.

5.2 Meststofkeuze

Ten behoeve van de bemesting met fosfaat dient een keuze te worden gemaakt tussen minerale meststoffen en dierlijke mest of uit producten die vrijkomen na de be- en verwerking van dierlijke mest. Ook binnen de categorie van minerale meststoffen dient nog een keuze te worden gemaakt uit beschikbare producten.

Het uitgangsmateriaal voor de productie van de meeste minerale P-meststoffen is het mineraal apatiet ($\text{Ca}_{10}\text{Na}_a\text{Mg}_b(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x\text{F}_{0.4x}(\text{F},\text{OH})_2$) dat als ruwfosfaat wordt gewonnen in de natuur. Het ruwfosfaat kan als meststof worden toegepast, maar het fosfaat in ruwfosfaat is slecht oplosbaar in water en is daardoor slecht beschikbaar voor de plant.

Door malen, gloeien en ontsluiting van fosfaat met zuren wordt de oplosbaarheid van ruwfosfaten verhoogd. Dit principe wordt toegepast bij de productie van minerale P-meststoffen. De belangrijkste minerale P-meststoffen die in Nederland worden gebruikt zijn: tripelsuperfosfaat (TSP), superfosfaat en samengestelde meststoffen (NP, PK en NPK). Andere, traditionele P-meststoffen, die niet of in geringe mate in Nederland worden gebruikt, zijn: zacht natuurfosfaat, aluminium-calciumfosfaat, gloeifosfaat (Rhenaniafosfaat), Thomasmee, polyfosfaten en dubbelkalkfosfaat. Openbare onderzoeken waarin de P-werking van uiteenlopende P-meststoffen in akkerbouwgewassen in Nederland zijn vergeleken zijn tamelijk schaars (b.v. Prummel, 1973; Van Geel, 2000).

Een aantal nieuwere concepten en meststoffen zijn:

- Flex-fertilizer, waarin de P in een samengestelde, vloeibare meststof aanwezig is;
- Van Iperen (Westmaas) met PowerLine meststoffen en met zettingsfosfaat;
- PowerStart. Deze vloeibare PK-meststof wordt tijdens het zaaien in de voor gespoten en bedekt ook de zaden. Een startgift kan daarom de kieming en opkomst versnellen. Het principe van PowerStart doet denken aan de iSeed zaadcoating van Kemira GrowHow;
- Het Amerikaanse bedrijf Specialty Fertilizer Products heeft bijvoorbeeld een beschermende coating voor fosfaatmeststoffen ontwikkeld;
- Triferto humuszuren;
- Fos-Fix is een nieuwe meststof speciaal ontwikkeld om snel de beschikbare fosfaattoestand in de grond te verhogen;
- Maxistart en Physiostart;
- Kemira GrowHow iSeed.

Er zijn nog niet of nauwelijks resultaten van onafhankelijk onderzoek bekend, waarin de P-efficiëntie van de nieuwe concepten en meststoffen zijn vergeleken met die van de gangbare meststoffen.

5.2.1 Superfosfaat en tripelsuperfosfaat

Superfosfaat is een fosfaatmeststof, die bestaat uit 30-35 procent monocalciumfosfaat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) en 65-70 procent gips (CaSO_4). Het P_2O_5 -gehalte van superfosfaat is 18-20 procent en het fosfaat is bijna volledig in water oplosbaar. Tripelsuperfosfaat (TSP) is een fosfaatmeststof, die bestaat uit 85 procent monocalciumfosfaat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) en kleine hoeveelheden gips (CaSO_4) en andere fosfaatmineralen. Het P_2O_5 -gehalte van TSP is 45 procent en het fosfaat is bijna volledig in water oplosbaar.

Tripelsuperfosfaat en superfosfaat hebben een neutrale werking op de zuurgraad (pH) van de bodem. Na toediening van tripelsuperfosfaat en superfosfaat wordt het monocalciumfosfaat in de bodem snel omgezet tot de (veel) minder oplosbare Ca-fosfaten. Hierdoor neemt in het algemeen de directe beschikbaarheid van de P voor de plant af naarmate de tijd na bemesting toeneemt. Een verse fosfaatgift vlak voor het planten of zaaien van gewassen heeft daarom ook vaak een positief effect op de begingroei van het gewas (Mulder & Prummel, 1975).

5.2.2 NP-, NPK- en PK-meststoffen

Er wordt een groot aantal soorten NP-, NPK- en PK-meststoffen in Nederland gebruikt. Een deel van de NP-meststoffen bestaat uit monoammoniumfosfaat (MAP) of diammoniumfosfaat (DAP). MAP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) is een goed oplosbare minerale fosfaatmeststof en wordt gevormd uit ammoniak en fosforzuur. MAP bevat 54 procent P_2O_5 en 12 procent N; alle P is in water oplosbaar. DAP ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) is een goed oplosbare minerale fosfaatmeststof en wordt gevormd uit ammoniak en MAP. DAP bevat 46 procent P_2O_5 en 18 procent N; alle P is in water oplosbaar.

MAP en DAP hebben een verzurende werking. Deze verzurende werking wordt veroorzaakt door de ammonium (NH_4^+) die in de meststoffen aanwezig is. Meststoffen die NH_4^+ bevatten, hebben een verzurende werking, doordat zowel de opname van NH_4^+ door de wortels als de nitrificatie van NH_4^+ tot nitraat (NO_3^-) processen zijn die verzurend werken.

Veel van de NP-, NPK- en PK-meststoffen zijn samengestelde meststoffen. De productie en handel van deze meststoffen vallen onder de meststoffenwetgeving. Afhankelijk van de soort en de gehalten worden deze meststoffen gedefinieerd als NP-, PK-, NPK- of samengestelde meststoffen. Deze meststoffen kunnen bestaan uit superfosfaat, TSP, natuurfosfaat, Thomasmeel, MAP of DAP, waaraan N is toegevoegd als ammoniumnitraat (NH_4NO_3) en/of ammoniumsulfaat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) en K als kaliumchloride (KCl) en/of kaliumsulfaat (K_2SO_4). In sommige meststoffen kunnen daarnaast Ca-zouten en/of Mg-zouten en/of sporelementen (bijvoorbeeld B) zijn toegevoegd. De verhouding waarin de verschillende verbindingen zijn gemengd, bepaalt uiteindelijk de N:P:K-verhouding van de meststof en de eventuele verzurende werking (sommige NP(K) meststoffen werken verzurend, andere hebben een neutrale werking). Het mag niet worden uitgesloten dat de P-werking van de meststof wordt beïnvloed door de vorm waarin P aanwezig is in de meststof. Ook de overige verbindingen in de samengestelde meststof kunnen de P-efficiëntie beïnvloeden, bijvoorbeeld door pH- en zouteffecten.

5.2.3 Polyfosfaten

Enkele jaren geleden is er veel aandacht voor polyfosfaten geweest. Polyfosfaten zijn vloeibare meststoffen die bestaan uit mengsels van orthofosfaatketens (de meest gebruikte polyfosfaten bestaan uit 2-4 ketens van orthofosfaten). Vaak is ammonium het begeleidend kation in polyfosfaten: ammoniumpolyfosfaten. De meest toegepaste polyfosfaatmeststof is ammoniumfosfaat 10-34, bestaande uit 10 procent N en 34 procent P_2O_5 ; zowel de N als de P is goed in water oplosbaar. De vloeibare polyfosfaten kunnen goed via rijenbemesting of via plaatsing aan het gewas worden toegediend. Ammoniumpolyfosfaten hebben een verzurende werking. De polyfosfaten kunnen chelaten vormen met bepaalde spoor-elementen waardoor deze in oplossing blijven en mogelijk beter beschikbaar zijn voor het gewas. Uit veldproeven is echter niet gebleken dat de P-werking van polyfosfaten structureel beter is dan van traditionele, korrelvormige meststoffen (Van Geel, 2000).

5.2.4 Dierlijke meststoffen

De samenstelling van dierlijke mest varieert sterk en is afhankelijk van factoren zoals diersoort, het type mest, het rantsoen, het mestverzamel- en bewaarsysteem, de bewaartijd, etc. Dit betekent dat er grote verschillen kunnen bestaan in P-werking tussen verschillende mesten (niet alleen tussen mesten van verschillende diersoorten, maar ook tussen de mestpartijen van één diersoort).

Er kunnen ruwweg drie P-fracties in dierlijke mesten worden onderscheiden:

60-90 procent anorganisch P	10-40 procent redelijk gemakkelijk mineraliseerbaar organisch P	2-5 procent moeilijk mineraliseerbaar P
Het betreft struviet, trimagnesiumfosfaat, octacalciumfosfaat en dicalciumfosfaat, waarvan naar verwachting de beschikbaarheid niet wezenlijk afwijkt van die van tripelsuperfosfaat. De hoeveelheid anorganisch P neemt toe bij een toenemende bewaartijd van de mest; er treedt tijdens bewaren mineralisatie op van organisch P.	Hiervan komt een beperkt deel vrij gedurende de eerste weken na toediening in het voorjaar, maar een groot deel gedurende de rest het groeiseizoen. Een deel van het gemakkelijk mineraliseerbare P kan in de mestopslag reeds mineraliseren en wordt dan als anorganisch P toegediend. Dit is afhankelijk van de duur van de mestopslag.	Het betreft fosfaat dat niet beschikbaar komt voor het gewas gedurende het eerste jaar na toediening.

In het bemestingsadvies voor de akkerbouw (Van Dijk & van Geel, 2008) wordt uitgegaan van een P-werking in het jaar van toediening van 60 procent voor rundveemest, 100 procent voor varkensmest en 70 procent voor kippenmest. Bij langdurig mestgebruik wordt voor alle mesten een P-werking van 100 procent aangehouden.

Bij de keuze voor een mestsoort kan rekening worden gehouden met de N/P-verhouding in de mest. Per kg werkzame hoeveelheid stikstof wordt met varkensdrijfmest meer fosfaat gegeven dan met runderdrijfmest. De dikke, rulle fractie van gescheiden drijfmest heeft een hoog gehalte aan fosfaat en organische stof en het effluent van gescheiden drijfmest heeft een laag fosfaatgehalte.

5.2.5 Samenvattend meststofkeuze

De benutting van de met meststoffen toegediende fosfaat door akkerbouwgewassen, bedraagt in het eerste jaar slechts circa 10-20%. Daarbij is de benutting van snelwerkende meststoffen (tripelsuperfosfaat en samengestelde meststoffen, zoals NP's) in het eerste jaar in het algemeen hoger dan die van langzaamwerkende, minerale meststoffen (natuurfosfaat) en organische meststoffen (b.v. dierlijke mest). Door de nawerking van de laatstgenoemde meststoffen in daarop volgende jaren, wordt dit effect bij een jaarlijks herhaalde toediening (grotendeels) teniet gedaan. De effectiviteit van korrelvormige en vloeibare P-meststoffen verschilt in het algemeen niet sterk. Wel kan de samenstelling van de meststoffen effect hebben. Met name in samengestelde NP-meststoffen is de P-benutting relatief hoog, waarschijnlijk door het positieve effect van de N-opname op de P-opname of door de verzuring die de aanwezige ammonium (NH₄) veroorzaakt, waardoor de P-beschikbaarheid kan worden verhoogd.

5.3 Samenstelling en vorm van de meststof

5.3.1 Chemische samenstelling

Meststoffen bevatten vaak een groot aantal anorganische P-verbindingen die sterk kunnen variëren in beschikbaarheid voor de plant. De oplosbaarheid van P in water is hierbij een belangrijke factor. De P-werking, en met name de directe P-werking vlak na toediening, neemt toe naarmate de oplosbaarheid toeneemt.

Kunstmest-P bevat meestal goed oplosbaar, anorganisch P. Een uitzondering hierop wordt gevormd door

natuurfosfaat, dat in het eerste jaar een lagere, maar in daaropvolgende jaren een hogere werking zal hebben dan goed oplosbare fosfaatmeststoffen. Bij een jaarlijkse toediening van natuurfosfaat zal de P-werking ervan dan ook de 100% kunnen benaderen. Dierlijke mest bevat naast goed oplosbaar, anorganisch P ook organisch P, waarvan een deel gemakkelijk en een deel moeilijk mineraliseerbaar is. Zoals hiervoor al is aangegeven leidt de aanwezigheid van organisch P bij rundveemest en kippenmest in het jaar van toediening tot een (iets) geringere P-werking dan van kunstmest, maar is dat effect verdwenen bij een jaarlijkse toediening van dierlijke mest. In dat geval wordt de P-werking gelijk aan 100% door een hogere nawerking van de P uit mest die in voorgaande jaren is toegediend.

5.3.2 Vorm van de meststof

P-meststoffen kunnen als korrel of als vloeistof worden toegediend. Vaak is het effect van de vorm waarin de P-meststof wordt toegediend (vast versus vloeibaar) verwaarloosbaar in vergelijking tot de methode van toediening (breedwerpig versus plaatsing; zie verder). In een overzichtsartikel concludeert Clevering (2001) dat vloeibare meststoffen in normale jaren niet tot een hogere opbrengst leiden dan vaste meststoffen, maar dat dit in extreme jaren (bijv. bij droogte) wel het geval kan zijn. Ook is de werking gemiddeld iets hoger.

Bij korrelvormige meststoffen kan de korrelgrootte een belangrijke rol spelen bij de P-werking. De korrelgrootte beïnvloedt de verdeling (hoe groter de korrel, hoe heterogener de verdeling), de oplosbaarheid (hoe groter de korrel, hoe langzamer het oplossen) én de vastlegging (hoe groter de korrel hoe minder snel de P wordt vastgelegd in de bodem na toediening) van P in de bodem.

Aanwezigheid andere bestanddelen naast P

P-meststoffen bevatten naast P nog een groot aantal nutriënten, zoals Ca en N. Daarnaast worden vaak kort voor of vlak na toediening van P-meststoffen ook andere meststoffen toegediend. Dit betekent dat er allerlei interacties kunnen optreden tussen P en andere nutriënten, zowel bij biologische en chemische bodemprocessen als bij de opname van nutriënten door de plant. Vaak leidt een combinatie van N en P tot een grotere P-opname dan toediening van alleen P. Mogelijke redenen hiervoor zijn:

- een stimulering van de groei van de wortels en de bovengrondse massa door N en
- een grotere mobiliteit van P in de bodem door een verzuring ten gevolge van de aanwezigheid van ammonium.

In onderzoek dat door PPO-agv met poot aardappel in Zuidwest-Nederland is uitgevoerd in 2004 en 2005 op een perceel met een Pw van 26 zijn twee nieuwe N/P-meststoffen zowel met breedwerpig bemesting als in de vorm van rijenbemesting beproefd bij 0, 70 en 140 kg P₂O₅/ha. Ondanks het betrekkelijk lage Pw-getal waren er geen betrouwbare verschillen in opbrengst tussen de objecten. Zelfs het object zonder fosfaatbemesting gaf dezelfde opbrengst als de bemeste objecten.

5.4 Plaatsing

Aangezien fosfaat weinig mobiel is in de bodem (het transport van P heeft hoofdzakelijk plaats via diffusie en nauwelijks via massastroming), speelt de transportafstand tot de wortel een belangrijke rol. Daarom is de bewortelingsintensiteit belangrijk voor de beschikbaarheid van fosfaat voor het gewas. Vooral in situaties waarin de beworteling (nog) niet intensief is, bijvoorbeeld tijdens de beginfase van de groei van gewassen, en bij gewassen met een grote afstand tussen rijen, kan het plaatsen van P-meststoffen in de buurt van de wortel een positief effect hebben op de beschikbaarheid van P voor het gewas (o.a. De Wit, 1953; De Willigen & Van Noordwijk &, 1987). Het effect zal vooral groot zijn tijdens de beginfase van de groei (Plénet et al., 2000). In het algemeen neemt het effect toe bij lage P-toestanden van de bodem, maar bij prei werd zelfs bij zeer hoge P-toestanden (Pw 80 – 120) nog een positief effect vastgesteld (Van Geel, 2000). Naar verwachting is door het plaatsen van P-meststoffen een flinke besparing mogelijk in vergelijking met

het volvelds toedienen van P-meststoffen. Onderzoek heeft uitgewezen dat bij gewassen als snijmaïs, stamslabonen en tuinbonen door rijenbemesting flink bespaard kan worden op de P-gift in vergelijking met volveldse toediening (Arnold & ten Hag, 1982; Prummel, 1957; Prummel, 1981; Prummel & von Barnau Sijthoff, 1975). Gemiddeld was de besparing bij maïs en bonen in het onderzoek in Nederland respectievelijk 66 en 87 procent. Bij aardappelen en suikerbieten was deze besparing lager, maar vooral op gronden met een lage P-toestand was ook daar nog steeds een besparing mogelijk van respectievelijk 33 en 23 procent (Van Erp & Titulaer, 1991). In recentere proeven, die in het algemeen zijn uitgevoerd bij hogere P-toestanden van de grond, was het positieve effect bij aardappelen, knolselderij en suikerbieten vaak niet aanwezig (Prummel, 1981; Dekker en Van Wijk, 2005). Aangezien aardappelen een P-behoefstig gewas is en er bij aardappelen sprake is van een grote rijenafstand, werd wel een positief effect van rijenbemesting verwacht. Door diverse onderzoekers is gespeculeerd waarom dit in het onderzoek veelal niet wordt gevonden en/of waarom de effecten veelal kleiner zijn dan bij gewassen zoals maïs en bonen (o.a. Van Erp & Titulaer, 1991, Van Dijk et al., 2008). Waarschijnlijk is het effect van rijenbemesting bij aardappelen beperkt, omdat bij de gangbare bemestingswijze ook al sprake is van een plaatsing van meststoffen, aangezien de meststoffen na een breedwerpige toediening bij de opbouw van de rug worden geconcentreerd in de aardappelrug. Daarnaast zijn er relatief veel reservestoffen aanwezig in de poter, waardoor een startgift een minder groot effect heeft dan bij een gewas waarbij minder reservestoffen in het zaad aanwezig zijn, zoals maïs.

De laatste jaren zijn een aantal overzichten gemaakt, waarin de mogelijkheden van de plaatsing van meststoffen voor het verbeteren van de P-benutting zijn samengevat (Ehlert et al., 2002; Van Dijk et al., 2008). In het kader van deze studies is ook de internationale, wetenschappelijke literatuur geraadpleegd. In deze studies werd vastgesteld dat de volgende factoren het effect van plaatsing positief kunnen beïnvloeden:

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

De laatstgenoemde factor heeft vooral betrekking op groentegewassen, zoals sla en andijvie.

Enkele andere studies die zijn besproken door Van Dijk et al. (2008) zijn:

- Stone (2000) heeft vastgesteld dat een kleine gift met vloeibare ammoniumfosfaat in de rij bij sla en uien de vroege groei en opbrengst bij de gewassen sla en ui duidelijk verbeterde. Het gunstige effect werd vooral toegeschreven aan het fosfaat in de meststof, maar ook de stikstofbenutting werd duidelijk verhoogd door deze vorm van rijenbemesting.
- Een klimaatexperiment uit najaar 2007 van PRI met de gewassen suikerbieten, spinazie, peen en ui. Hierin bleek dat plaatsing van fosfaat de groei van jonge planten van suikerbieten, spinazie en peen vooral bij een relatief lage Pw en lage temperatuur sterk positief reageerden op plaatsing. Bij ui was dit effect minder duidelijk.

Van Dijk et al. (2008) geven verder in hun studie aan dat de positieve effecten van plaatsing vooral op zullen treden bij lage P-toestanden van de bodem, maar dat de P-toestand in de meeste landbouwgronden in Nederland op dit moment hoog is (Schoumans, 2007). Volgens hun betekent dit dat de mogelijkheden om de efficiëntie van fosfaat te verhogen op dit moment beperkt zijn, maar dat deze mogelijkheden toenemen als de fosfaattoestand in de toekomst gaat dalen. Verder onderscheiden ze 3 groepen gewassen die verschillen in de mogelijkheden om de efficiëntie van P-bemesting te verhogen via rijenbemesting:

- Gewassen met een lange groeiduur en lage fosfaatbehoefte. Naar verwachting zijn de mogelijkheden hier beperkt, met uitzondering van gewassen met een trage jeugdgroei en beperkte beworteling, zoals prei;
- Gewassen met lange groeiduur en hoge fosfaatbehoefte. Plaatsing is vooral interessant bij een lage P-toestand van de bodem, vooral in combinatie met een lage vochttoestand en een beperkte beworteling (b.v. maïs en ui);

- Gewassen met een korte groeiduur en hoge P-behoefte. Voorbeelden hiervan zijn vooral te vinden bij groentegewassen (vooral bladgewassen). Hier zijn de perspectieven van P-rijenbemesting het grootst.

5.5 Tijdstip van toediening

Zoals al eerder is aangegeven is een verse P-gift met goed oplosbare P-meststoffen in het voorjaar in het algemeen te prefereren boven een P-gift in het najaar (Mulder en Prummel, 1975). Ook recenter (Ehlert et al., 2003) is in een meerjarig fosfaatbemestingsproefveld te Marknesse gebleken dat een fosfaatbemesting in het voorjaar tijdelijk leidde tot een hoger Pw-getal dan een gift in de herfst. Naarmate de tijdsduur tussen een fosfaatbemesting en het opnamemoment door de plant groter wordt, wordt een groter gedeelte van het fosfaat vastgelegd aan o.a. bodemdeeltjes, kalk, ijzer en aluminium. Bij de teelt van consumptieaardappelen wordt vanuit de praktijk gewezen op het grote belang van verse fosfaat. De fosfaatbemesting wordt dan na het poten en voor het ruggenfrezen gegeven. Deze toedieningswijze kent wel risico's bij aanhoudende droogte na het ruggenfrezen.

5.6 Optimalisering bodemfactoren

In het algemeen zal een optimalisering van overige bodemomstandigheden, naast de P-toestand, een positief effect hebben op de P-benutting. Dit geldt o.a. voor structuur, vochtgehalte, pH en de voorziening met andere nutriënten.

Gebleken is dat bij een goede bodemstructuur een lagere fosfaattoestand volstaat dan bij een slechte bodemstructuur om dezelfde opbrengst te realiseren (Prummel, 1975). Hiervoor is al beschreven dat meststoffen met een verzurende werking (b.v. door de aanwezigheid van ammonium) en/of samengestelde meststoffen (NP's) een positief effect op de P-benutting kunnen hebben. Ook het vochtgehalte is een belangrijke factor voor de P-benutting. Om deze reden kan de gecombineerde toediening van P en water via fertigatie voordelen opleveren voor de P-benutting, zeker als dit wordt gecombineerd met plaatsing (bijvoorbeeld via druppelfertigatie in de rij; Solaimalai et al., 2005). Onder Nederlandse omstandigheden zal dit voor de meeste akkerbouwgewassen echter een te dure optie zijn.

5.7 Aangepaste rassenkeuze en gebruik Mycorrhizae

Er zijn ook diverse studies verricht waarin verschillen in de fosfaatbenutting tussen rassen van een gewas zijn bestudeerd en waarin is nagegaan hoe rassen kunnen worden geselecteerd en/of ontwikkeld met een hoge P-efficiëntie. Er zijn voorbeelden gevonden van tarwe (Batten, 1992) en bonen (Lynch & Beebe, 1995). Ook wordt gewezen op de mogelijkheden om gebruik te maken van Mycorrhizae voor het verhogen van de P-benutting (Miyasaka & Habte, 2001). Voor de praktijk lijkt dit ook echter vooral relevant te zijn als sprake is van lage P-toestanden in de bodem (Keltjens, 1999).

6 Tips voor efficiënt uitvoeren van de fosfaatbemesting

Bij toepassing van goede landbouwpraktijk wordt de fosfaatbemesting wel overwogen toegepast. Hiervoor zijn een aantal tips te geven:

1. Bepaal minstens éénmaal in de vier jaar van alle percelen de fosfaattoestand van de grond. Bemonster zoveel mogelijk steeds na een zelfde gewas bij voorkeur voorafgaande aan een fosfaatbehoefte gewas (bv. aardappelen). Bemonster niet kort na een organische bemesting of na het onderwerken van een groenbemester. Vergelijk het analyseresultaat altijd met eerdere analyses. Een zekere spreiding in analyseresultaten is normaal. In geval dat de fosfaattoestand laag is (Pw-getal <25 mg P₂O₅ per liter), kan men in aanmerking komen voor een verhoogde gebruiksnorm. Hiervoor is een apart bemonsteringsprotocol van toepassing.
2. Maak een bemestingsplan op basis van de Adviesbasis Bemesting passend binnen de gebruiksnormen voor stikstof en fosfaat voor het betreffende jaar. Een fosfaatgift hoger dan de adviesgift heeft doorgaans geen betekenis. Maak een keuze uit de geschikte soorten organische mest op basis van verhouding N/P en de hoeveelheid effectieve organische stof in de mest. Stem de mestdosering af op het gehalte van N en P in de dierlijke mest. Geef voor zo ver mogelijk binnen een bouwplan het fosfaat aan de meest fosfaatbehoefte gewassen.
3. Zorg voor een goede bodemstructuur, voorkom vochttekort.
4. Pas bij lage fosfaattoestand van de grond rijenbemesting toe bij maïs en bij peulvruchten. De werking van in de rij toegediende fosfaat is bij deze gewassen circa twee keer zo hoog als bij breedwerpige toediening.
5. Ga na welke soort kunstmestfosfaat en welke toedieningswijze voor uw situatie de voorkeur verdient (nieuwe meststoffen en nieuwe bemestingssystemen).
6. Voer een bemesting met kunstmestfosfaat bij voorkeur uit in het voorjaar voor de zaaibedbereiding.

7 Literatuur

1. Arnold GH & ten Hag BA (1982) Rijenbemesting met fosfaat bij snijmais. *Bedrijfsontwikkeling* 13, 4, 403-408.
2. Batten GD (1992) A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant and soil* 146, 1-2, 163-168.
3. Clevering O (2001) Vloeibare meststoffen hebben incidenteel meerwaarde. Publicatie op de HPA-site Kennisakker.nl.
4. De Wit CT (1953) A physical theory on placement of fertilizers. *Verslag Landbouwkundig Onderzoek*, 59.4.
5. Dekker P.H.M. (2005). Aanscherping gebruik fosfaat geen probleem. HPA-site: Kennisakker.nl, geplaatst 22 juni 2005
6. Dekker P.H.M. en P.A.I. Ehlert. (2003) "Fosfaatoverschotten van bouwland op perceelsniveau II", *Informatieblad* 398.44, november 2003, Mest- en Mineralenprogramma's LNV. (project 510177)
7. Dekker P.H.M. en P.A.I. Ehlert. (2007) "Landbouwkundige gevolgen van evenwichtsbemesting voor de opbrengst op bouwland". *Informatieblad Mineralen en Milieukwaliteit BO-05-infoblad-07*. Mei 2007.
8. Dekker Peter en Kees van Wijk (2005), Fosfaatmanagement op praktijkbedrijven. *Informatieblad* 398.65, mei 2005.
9. Dekker Peter en Kees van Wijk, Fosfaatmanagement op praktijkbedrijven. *Informatieblad* 398.99, december 2005.
10. Dekker Peter en Kees van Wijk, Groenten&Fruit, week 5 (2005). Minder fosfaat schaadt productie niet. Pag. 48 + 49.
11. Dekker Peter en Phillip Ehlert (2003)., "Extra fosfaat weinig effect. Bodem slechte spaarpot voor fosfaat", *Boerderij/Akkerbouw* 88-no 15; pagina 4-6, 29 juli 2003 (project 510177)
12. Dekker Peter en Phillip Ehlert. (2005). Landbouwkundige en milieukundige gevolgen van evenwichtsbemesting met fosfaat op bouwland. *Informatieblad* 398.87, december 2005.
13. Dekker Peter en Phillip Ehlert. (2005). Relaties tussen fosfaatconcentraties in bodemvocht, fosfaatfracties in de bodem en fosfaatoverschot op bouwland. *Informatieblad* 398.66, mei 2005.
14. Dekker Peter en Phillip Ehlert. (2008). Verlaging fosfaatsnorm nu nog geen probleem. *Boerderij* 93 – no.27, akkerbouw, p10+11, 1 april 2008
15. Dekker Peter en Phillip Ehlert. (2008). Verlaging gebruiksnorm fosfaat nog geen probleem. *Groenten&Fruit* week 16, 18 april 2008, pagina 30-31.
16. Dekker Peter, Anne Marie van Dam, Annette Pronk en Frank de Ruijter. Rapportage bemesting 2007 Telen met toekomst. Prestaties deelnemers in 2007 in relatie tot de gebruiksnormen 2008. Beoordeling Best Practices. PPO-Projectrapport 32.340.047.07; Telen met toekomst Rapport 8, maart 2008.
17. Dekker Peter. (2005). Nieuwe fosfaatregels vragen zorgvuldigheid. *Boerderij/akkerbouw* 90 –no.18 (6 september 2005), p.16-18.
18. Dijk W. van & W. van Geel (eds.) (2008) Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentegewassen. PPO-publicatienr. 307, 109 pp + bijlagen.
19. Dijk W. van, Dekker PHM, Ten Berge HFM, Smit AL & Van der Schoot JR (2008) Aanscherping van fosfaatgebruiksnormen op bouwland bij akker- en tuinbouwgewassen; verkenning van noodzaak en mogelijkheden tot differentiatie. PPO publicatienr. 307, PPO, Lelystad, 88 pp.
20. Dijk W. van, P.H.M. Dekker, H.F.M. ten Berge, A.L. Smit en J.R. van der Schoot. (2007). Aanscherping van fosfaatgebruiksnormen op bouwland bij akker- en tuinbouwgewassen. PPO-publicatie 367, december 2007.
21. Dijk W. van, P.H.M. Dekker, R. Postma en S.W. Moolenaar. (2007). Bodembeheer op akkerbouwbedrijven in relatie tot het mineralenbeleid. PPO-projectrapport 3250061700, december 2007.
22. Ehlert P.A.I., C.A.Ph. van Wijk en P.H.M. Dekker. (2003). Fosfaatbalansen op perceelsniveau. Scan van de resultaten van de vier veeljarige veldproeven op bouwland. PPO-publicatie 305, januari 2003 (project 510177)

23. Ehlert P.A.I. en P.H.M. Dekker. (2008). Veeljarige effecten van evenwichtsbemesting. Informatieblad Mineralen en milieukwaliteit BO-05-infoblad 17, april 2008.
24. Ehlert P.A.I., J.C. van Middelkoop, C. van der Salm en P.H.M. Dekker. (2008). Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op lange termijn. Stand van zaken 2007. Alterra-rapport 1665, 2008
25. Ehlert PAI, Van Wijk CAPH & De Willigen P (2002) Fosfaatbehoefte van vollegrondsgroentegewassen. 3. Precisiebemesting. PPO-projectrapport nr. 1125232, 27 pp.
26. Ehlert PAI, Van Wijk CAPH & Dekker PHM (2003) Fosfaatbalansen op perceelsniveau. Scan van de resultaten van vier veeljarige veldproeven bouwland. PPO publicatie 305, . .pp.
27. Ehlert Phillip, Anne Marie van Dam, Annette Pronk, Jantine van Middelkoop, Rien van der Maas & Peter Dekker (2007). Notitie: "Actualisatie van fosforgehalten en fosfaatafvoer van landbouwgewassen", Onderzoeks- en praktijkgegevens, stand van zaken 2007, december 2007
28. Ehlert Phillip, Peter Dekker en Jantine van Middelkoop. (2005). Actualisatie van fosforgehalten en fosfaatafvoercijfers van landbouwgewassen. Informatieblad 398.103, december 2005.
29. Ehlert, P.A.I., Middelkoop, J.C. van, en Dekker, P.H.M, (2006). Actualisatie fosfaatgehalten en fosfaatafvoer van landbouwgewassen. Een verkenning op basis van onderzoeksgegevens. Alterra-rapport 1348, Alterra Wageningen.
30. Erp van PJ & Titulaer HHH (1991) Rijenbemesting in de akkerbouw met vollegrondsgroenteteelt. NMI, Meststoffen 1991, 10-15.
31. Geel van WCA (2000) Geen meerwaarde polyfosfaat. PAV Bulletin Vollegrondsgroenteteelt 2000, 33-36.
32. Keltjens WG (1999) Verhoogde fosfaatvoeding van planten op P-arme gronden als gevolg van Mycorrhiza. NMI, Meststoffen, 49-56.
33. Lynch JP & Beebe SE (1995) Adaptation of beans (*Phaseolus vulgaris* L) to low phosphorus availability. Hortscience 30, 6, 1165-1171.
34. Miyasaka SC & Habte M (2001) Plant mechanisms and mycorrhizal symbioses to increase phosphorus uptake efficiency. Communications in Soil Science and Plant Analysis 32, 7/8, 1101-1147.
35. Mulder C & Prummel J (1975) Fosfaatbemesting voor aardappelen en suikerbieten op klei- en zavelgrond in het najaar of in het voorjaar? Bedrijfsontwikkeling 6, 9, 737-739.
36. Paauw Van der F, Sissingh HAA & Ris J (1971) Een verbeterde methode van fosfaatextractie van grond met water: het Pw-getal. Verslagen van Landbouwkundige Onderzoeken 749, 74 pp.
37. Plénet D. Etchebest S, Mollier A & Pellerin S (2000) Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency: I. Leaf Growth. Plant and Soil 223, 1-2, 117-130.
38. Prummel J & Van Barnau Sijthoff PA (1975) Rijenbemesting met fosfaat bij stamslabonen en tuinbonen. Bedrijfsontwikkeling 6, 2, 173-175.
39. Prummel J (1957) Fertilizer placement experiments. Plant and Soil 8, 213-253.
40. Prummel J (1973) Resultaten fosfaatvormenproeven oogstjaar 1972. IB-rapport 7-1973, 28 pp.
41. Prummel J (1975) Effect of soil structure on phosphate nutrition of crop plants. Netherlands Journal of Agricultural Science 23, 62-68 pp.
42. Prummel J (1981) Bemestingsbeleid voor fosfaat en kali op bouwland. 1. Fosfaat. Stikstof 98, 8, 447-451.
43. Schoumans O (2007) Trends in de fosfaattoestand van landbouwgronden in Nederland in de periode 1998-2003. Wageningen, Alterra-rapport 1537, 38 pp.
44. Solaimalai A, Baskar M, Sadasakthi A & Subburamu K (2005) Fertigation in high value crops – a review. Agricultural reviews 26, 1, 1-13.
45. Stone DA (2000) The effects of starter fertilizers on the growth and nitrogen use efficiency of onion and lettuce. Soil Use and management 16, 1, 42-48.
46. Wild A (ed.) (1988) Russell's Soil Conditions & Plant Growth. Longman Group UK Limited, Harlow, Essex, England. Eleventh edition, 991 pp.
47. Willigen P. de & Van Noordwijk M (1987) Roots, plant production and nutrient use efficiency. Proefschrift Landbouwuniversiteit Wageningen, 282 pp.