

- **Fosforkringloop en ecologische aspecten van de fosfaathuishouding**

- INLEIDING
- FOSFORKRINGLOOP EN BALANSEN
- FOSFORVORMEN IN DE BODEM
- FOSFAATBESCHIKBAARHEID
- BIOLOGISCHE STIMULERING VAN DE FOSFAATBESCHIKBAARHEID EN -OPNAME
- VERBETERING VAN DE FOSFAATBENUTTING OP BEDRIJFSNIVEAU
- CONCLUSIES EN PERSPECTIEVEN
- REFERENTIES

Fosforkringloop en ecologische aspecten van de fosfaathuishouding

P.A. van der Werff (1), Th.B.M. Dekkers (1) en O. Oenema (2)

¹ LUW-vakgroep Ecologische Landbouw, Haarweg 333, 6709 RZ Wageningen

² DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO), Postbus 129, 9750 AC Haren/Wageningen

Samenvatting

Op aarde kunnen we een fosforkringloop onderscheiden op een geologische tijdschaal van miljoenen jaren die wordt gedomineerd door abiotische processen. Op korte termijn van een paar jaar tot enkele honderden jaren bestaat een fosforkringloop op biogeochemische tijdschaal die wordt gedomineerd door biologische en geochemische processen. Het huidige gebruik van fosfor in de landbouw heeft gevolgen voor de lange-termijnkringloop door een versnelde verwerking van fosfaathoudende apatieten en versnelde afvoer naar mariene fosfaatvoorraden. De landbouwkundige verliezen zijn hoger naarmate de fosfaattoestand van de bodem op een hoger niveau wordt gehouden.

Om de fosforverliezen door uitspoeling en fixatie in de landbouw te verminderen zal de fosfaattoestand van de bodem naar een relatief laag niveau moeten worden gebracht.

Om dan nog een rendabele landbouwproductie te realiseren zal de effectiviteit van de P-bemesting en de P-opname door het gewas moeten worden verhoogd. Bij het streven naar voldoende fosfaatopname door gewassen bij een lagere fosfaattoestand van de bodem kunnen biologische processen een grote rol spelen. In het onderzoek wordt met name gekeken naar fosfatase-productie door wortels en micro-organismen, fosfaatmineralisatie door regenwormen en fosfaatmobilisatie door *Arbusculaire Mycorrhiza*-schimmels. In het ontwikkelingsverloop van het gewas wordt de fosfaatopname door middel van biologische processen in toenemende mate belangrijk. De bijdrage aan de opname van fosfaat door biologische processen kan in Nederland 25 % bedragen, waardoor de efficiëntie van het fosfaatgebruik kan stijgen. Hiermee gepaard gaat een beperkte daling van de opbrengst van 5-15 %. De mondiale fosfaatvoorraad zal hierdoor minder worden aangesproken door de landbouw in technologisch verder ontwikkelde landen zodat het fosfaatgebruik op bodems met een ernstig fosfaattekort kan toenemen. Op korte termijn leidt dit tot een vermindering van de milieubelasting door Puitspoeling. Op middellange termijn levert een vermindering van fosfaatgebruik in de industrielanden een bijdrage aan een duurzame voedselproductie op mondiale schaal en het kan op langere termijn gezien de versnelde afvoer van fosfaat naar de zeebodem afremmen.

INLEIDING

Fosfor is sinds de ontwikkeling van de intensieve veehouderij en de intensivering van de melkveehouderij een nutriënt dat in ruime mate voorhanden is in de Nederlandse landbouw. Doordat de huidige veehouderij slechts ten dele grondgebonden is wordt er van buiten Nederland veel fosfaat aangevoerd in de vorm van veevoer. Daarnaast is er ook een aanzienlijke aanvoer van fosfaatkunstmest. Het fosfaatoverschot op intensieve veehouderijbedrijven is dan ook zeer groot (Oenema en Van Dijk, 1994). In de grondgebonden veehouderij en in de plantaardige productie die zich beperkingen oplegt wat betreft de aanvoer van meststoffen is het fosfaatoverschot echter veel lager (Van der Werff, 1993). Ook in andere Westeuropese landen is er een fors P-overschot, al is de hoogte van het overschot niet zo hoog als in Nederland. Buiten Europa, vooral in Afrika, is plaatselijk sprake van een tekort op de P-balans.



[Figuur 1](#)

De voorraden fosfaathoudende gesteenten die worden gebruikt voor de produktie van fosfaatmeststoffen zullen de eerstvolgende twee eeuwen geleidelijk uitgeput raken (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 produktie 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. In dit artikel wordt globaal aangegeven hoe bijgedragen kan worden aan de 'ecologisering van de fosforkringloop'. Onder 'ecologisering van de fosforkringloop' wordt verstaan het beter benutten van de in het systeem reeds aanwezige fosfor bij gelijktijdige vermindering van de aanvoer van fosfor. Allereerst wordt ingegaan op de verschillende fosforkringlopen en stromen in de wereld en in landbouwgrond. Daarna wordt ingegaan op de beschikbaarheid van fosfaat in grond en hoe die verbeterd kan worden, onder andere door biologische stimulantia.

FOSFORKRINGLOOP EN BALANSEN

De fosforkringloop op geologische tijdschaal wordt gedomineerd door abiotische processen, zoals verwerking, erosie en precipitatie. Door verwerking en erosie wordt jaarlijks circa 21 Tg P (1 Tg = 10^{12} g = 1 miljoen ton), via rivieren naar de oceanen getransporteerd (Fig. 1). Bijna al het fosfor wordt gebonden in en aan bodemdeeltjes (particulair fosfor) naar de oceaan vervoerd. Via de atmosfeer wordt ook nog eens 1 Tg P per jaar naar de oceanen getransporteerd (Fig. 1).

Uiteindelijk komt al het aangevoerde fosfor als neerslagen van calciumfosfaten en organisch gebonden fosfor op de bodem van de oceaan terecht. De oceanbodem is dan ook het grootste fosforreservoir aan de aardkorst. Door 'uplift' komt de oceanbodem na verloop van miljoenen jaren weer aan het aardoppervlak terecht, waar het bloot wordt gesteld aan verwerking en erosie. Daar begint de geologische kringloop van het fosfor weer opnieuw. De gemiddelde verblijftijd van fosfor in de geologische kringloop is in de orde van grootte van enkele miljarden jaren. Ondanks de continue aanvoer van fosfor naar de oceaan is fosfor waarschijnlijk altijd (mede) beperkend geweest voor de produktie van mariene biota.

Door toename van erosie en van het gebruik van fosforhoudende meststoffen is in deze eeuw de grootte van het fosfaattransport naar de oceanen vermoedelijk fors toegenomen. De hoeveelheid gemakkelijk 'mijnbaar' ruwfosfaat neemt langzamerhand af en de hoeveelheid P in sedimenten neemt langzamerhand toe. Eén deel van de van de geologische kringloop wordt versneld, het effect van uplift, dat voorafgaat aan de vorming van 'mijnbaar' ruwfosfaat, echter niet.



[Figuur 2](#)

Biogeochemische kringlopen van fosfor worden door biologische en fysisch-chemische processen gedomineerd. Ze worden gekenmerkt door relatief korte omloopsnelheden. De gemiddelde verblijftijd van fosfor in de organische stof van éénjarige gewassen is hooguit enkele jaren, in die van meerjarige gewassen enkele tientallen jaren en in de organische stof van de bodem in de orde van grootte van enkele honderden jaren. De verblijftijd van opgelost anorganisch fosfor in de bodem is slechts enkele uren. De biogeochemische kringloop van fosfor is gekoppeld aan die van koolstof en stikstof. Stikstof en fosforgehalten in planten reguleren mede de fotosynthesesnelheid. Op ecosysteemniveau bepaalt de snelheid van ophoping van organische stof in de bodem van natuurlijke systemen de hoeveelheid beschikbaar fosfor (Schlesinger, 1991). Het fosfor dat meedoet aan de biogeochemische kringloop is grotendeels in organische vorm, oftewel het organisch gebonden fosfor is het meest actieve fosfor.

Figuur 2 toont de biogeochemische fosforkringloop van beweid grasland. In vergelijking met stikstofstromen zijn fosforstromen minder snel te beïnvloeden.

De bodem is het belangrijkste fosforreservoir. Een groot deel van het in de bodem aanwezige fosfor is in organisch gebonden vorm. Het overige deel is anorganisch fosfor.

De hoeveelheid opgelost fosfor in de bodemoplossing bedraagt hoogstens enkele kg P per ha. Grasland kan per jaar enkele tientallen kg P per ha uit de bodem opnemen. Via melk en vlees wordt echter slechts een fractie (enkele kg per ha per jaar) van de door het vee uit gras opgenomen fosfor afgevoerd. Het grootste deel keert via de mest naar het grasland terug.

In de akker en tuinbouw is de fosforafvoer groter, jaarlijks wordt daar met het gewas enkele tientallen kg fosfor per ha afgevoerd tot een maximum van ongeveer 100 kg per ha bij drie teelten in de vollegrondstuinbouw (Meeuwissen et al., 1988).

De fosforkringlopen zijn deze eeuw in sterke mate beïnvloed door transport van fosfor van het ene land naar het andere. Het gaat daarbij om twee vormen van transport.

1. Winning van ruw fosfaaterts en transport naar landen waar dit fosfaaterts met inzet van fossiele energie wordt ontsloten tot kunstmest en het transport van fosforhoudende meststoffen naar landen waar ze in de landbouw worden toegediend. Dit transport omvat een zeer grote Pstroom. Op jaarbasis gaat het momenteel om 21 à 22 Tg P per jaar dat als ruw fosfaat wordt gewonnen. Ruim de helft daarvan wordt ontsloten via zuren tot goed oplosbare en direct werkzame P-houdende kunstmest. In totaal wordt circa 80 % van het gewonnen ruw fosfaat als meststof in de landbouw gebruikt en de rest voor technische en industriële doelen. De winning van ruw fosfaat en het gebruik van P-houdende anorganische meststoffen vertoonden in de laatste jaren een dalende tendens. Tussen 1973 en 1978 steeg de produktie van ruw fosfaat nog van 13,6 naar 22,6 Tg (Lehr, 1980). In 1988 was de produktie 21,4 Tg. 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).

2. Het transport van fosfor in landbouwprodukten die worden geëxporteerd van het land waar ze zijn geproduceerd naar landen waar deze produkten worden gebruikt als voedsel voor mens en dier is ook een forse Pstroom. Cooke (1988) berekende dat de ontwikkelde landen in 1984 netto circa 0,05 Tg P per jaar aanvoerden uit ontwikkelingslanden. De verschillen tussen landen en continenten zijn zeer groot (Tabel 1). Als het gaat om produkten die door dieren worden genutzt, dan komt

het grootste deel van het aangevoerde fosfor via de mest van deze dieren op het land terecht. Bij verwerking tot menselijk voedsel komt een belangrijk deel in het riool, in oppervlaktewater en in huishoudelijk afval terecht.

Tabel 1. Aanvoer en afvoer van fosfor (in Gg; 1 Gg = 1.000.000.000 g) via koffie, cacao, thee, tabak, jute, rubber, sojabonen, aardnoten, bananen, oliehoudende cakes, copra, aardappelen, maïs, rijst en tarwe per regio in het jaar 1984 (Cooke, 1988)

Regio	Aanvoer	Afvoer	Nettoafvoer
Afrika	81	7	- 74
Noord- en Centraal Amerika	3	376	+ 373
Zuid-Amerika	0	138	+ 138
Azië	161	31	130
Europa	276	36	240

Oceanië	1	31	+ 30
USSR	117	0	117
Totaal	639	619	20

In Nederland is de aanvoer van fosfor via import van fosforhoudende meststoffen en landbouwprodukten al vele jaren veel groter dan de afvoer via landbouwprodukten. In de vorige eeuw werden reeds fosforhoudende meststoffen in Europa aangevoerd om de landbouwproductie te verhogen. De grootste hoeveelheden werden in Nederland omstreeks 1950 aangevoerd. Tussen 1950 en 1990 nam de aanvoer van fosfor via meststoffen af van 52 tot 32 Gg per jaar. Daarentegen nam de aanvoer van fosfor via import van landbouwprodukten toe van circa 12 Gg in 1950 tot circa 92 Gg in 1990. De fosforbalans van de Nederlandse landbouw voor het jaar 1990 toont een overschot van circa 82 Gg (Tabel 2) tegen 22 Gg in 1950.

Gemiddeld over alle landbouwgrond in Nederland was het overschot in 1990 circa 40 kg P per ha. Tussen bedrijven en regio's komen grote verschillen voor (Oenema en Van Dijk, 1994). Ook in ons omringende landen is de fosforaanvoer groter dan de afvoer. Voor Groot-Brittannië bedroeg het cumulatieve fosforoverschot tussen 1837 en 1957 circa 750 kg per ha (Cooke, 1967). Voor Duitsland berekenden Weissbach en Ernst (1994) dat het cumulatieve fosforoverschot tussen 1950 en 1994 gemiddeld 1100 kg P per ha landbouwgrond was. In Nederland is de nettoaanvoer nog groter geweest. Reijerink et al. (1993) berekenden dat het P-overschot in de zandgronden van oost-, centraal en zuid-Nederland op grasland gemiddeld 1200 kg was en op maïsland gemiddeld 3060 kg P per ha gedurende de periode 1950 - 1990. De fosforaanrijking van Europese landbouwgronden vindt vooral plaats in de vorm van ijzer en aluminiumfosfaatverbindingen (zie onder).

Tabel 2. Aanvoer en afvoer van fosfor (in Gg per jaar) in de Nederlandse landbouw in 1990 (CBS, 1992)

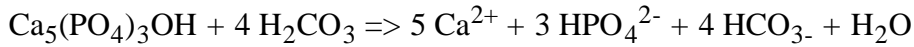
Aanvoer	Gg per jaar	Afvoer	Gg per jaar
Meststoffen	33	plantaardige produkten	17
Mengvoer	92	dierlijke produkten	34
Ruwvoer	2	mengvoer huisdieren	2
Atmosferische depositie	2	mengvoer	4
Gewasresten	4		
Diversen	3		
Totaal	139		57

Op veel natte zandgronden heeft dat geleid tot fosfaatverzadiging van de gronden en vervolgens tot een milieukundig onaanvaardbaar hoge uitspoeling van fosfor naar grond en oppervlaktewater (Sharpley en Withers, 1994). In West-

Europa is op veel percelen de fosfaattoestand zó hoog dat daar jarenlang zonder fosforbemesting een hoge gewasproductie kan worden gerealiseerd (Tunney et al. 1995).

FOSFORVORMEN IN DE BODEM

Veranderingen in verschijningsvormen van fosfor in de bodem tijdens bodemvorming zijn schematisch weergegeven in Figuur 3. Aangenomen is dat in het moedermateriaal fosfor alleen in de vorm van apatiet aanwezig is. Apatiet is het belangrijkste fosforhoudende primaire mineraal. Het verweert relatief gemakkelijk volgens:



waarbij opgelost en plantbeschikbaar HPO_4^{2-} en H_2PO_4^- vrijkomen. Deze fosfaationen zijn bijzonder reactief; de hoeveelheid opgelost fosfor in de bodem bedraagt hooguit enkele kg per ha. Het bij verwerking vrijgekomen fosfor wordt geadsorbeerd aan ijzer en aluminium-oxy-hydroxyden en aan randen van kleimineralen. Dit fosfor is in principe beschikbaar voor opname door plantewortels. Een ander deel precipiteert in ijzer en aluminiumverbindingen. Dit fosfor is niet of nauwelijks beschikbaar; er wordt dan gesproken over 'gefixeerd' en 'occluded' fosfor. In kalkrijke gronden lost apatiet slecht op. Het wél opgeloste fosfor in kalkrijke gronden wordt vooral geadsorbeerd aan calciumcarbonaat.



[Figuur 3](#)

De dynamische interacties tussen fosfor in de bodemoplossing en andere fosforfracties in de bodem zijn schematisch weergegeven in Figuur 3. Op korte termijn bepalen adsorptie desorptie, precipitatie/oplossing en, ten dele, fosforopname door plantewortels de fosforconcentratie in de bodemoplossing. De andere processen, immobilisatie/mineralisatie en vastefase diffusieprecipitatie verlopen langzamer. Op termijn bepalen deze processen mede de concentratie opgelost fosfor in de bodemoplossing en daardoor de hoeveelheid beschikbaar fosfaat voor opname door plantewortels.

Hoe hoger de fosforconcentratie in de bodemoplossing, hoe groter de hoeveelheden fosfor die worden geadsorbeerd, geprecipiteerd en gefixeerd en hoe groter de hoeveelheid die uit de bouwvoor naar de ondergrond kan uitspoelen. De totale hoeveelheid fosfor die kan worden geadsorbeerd, geprecipiteerd en gefixeerd hangt af van de bodemsamenstelling (klei, ijzer, aluminium en kalkgehalten) en grondwaterstand. In zandgronden is het oxalaatextraheerbaar ijzer plus aluminiumgehalte een goede maat voor het totaal fosfaatbindend vermogen van de grond. Als de verhouding (in molen) ijzer en aluminium versus fosfor 0,5 bedraagt, dan is de bodem verzadigd met fosfor. Zandgronden hebben een fosforbindend vermogen dat varieert van circa 1000 kg P per ha voor de natte, ijzerarme zandgronden tot meer dan 5000 kg P voor diep ontwaterde, leemhoudende zandgronden. De snelheid van fosforvastlegging via vastefase diffusie precipitatie neemt in de loop der tijd af. In fosfaatarme maar ijzerrijke zandgronden kunnen aanvankelijk honderden kg P per ha per jaar worden vastgelegd; na enkele jaren van forse P-bemesting niet meer dan enkele kg P.



[Figuur 4](#)

Zonder aanvoer van fosfor neemt de totale hoeveelheid fosfor in de bodem langzaam af door afvoer van biomassa en door uitspoeling. Uitspoeling van fosfor is weliswaar gering, omdat de hoeveelheid opgelost fosfor gering is, maar op den duur leidt het wel tot verarming van de bodem. De verarming van de bodem verloopt het snelst in humide gebieden. In de verweerde bodems van de natte tropen is fosfor dan ook vaak het element dat de primaire productie het meest beperkt.

Ecologisch gezien is fosfor dan ook een belangrijk nutriënt. In drogere gebieden zijn de fosforverliezen meestal gering. In de prairies van Noord-Amerika, bijvoorbeeld, is de hoeveelheid fosfor in de bodem relatief groot (Tiessen et al., 1983). Dat is tevens de reden dat daar decennia lang relatief hoge tarweopbrengsten gerealiseerd kunnen worden

zonder bemesting. De hoeveelheid fosfor in de bodem neemt dan wel gestaag af. Het blijkt dat vooral de hoeveelheid organisch gebonden fosfor afneemt. Het anorganisch (calcium, ijzer en aluminiumgebonden) fosfor is zichtbaar niet beschikbaar voor een tarwe-gewas.

Het dilemma is dat naarmate de concentratie van fosfor in de bodemoplossing hoger is en de plantewortels gemakkelijker fosfor kunnen opnemen, de 'verliezen' door uitspoeling, adsorptie, precipitatie en fixatie toenemen (Fig. 4). Ook als de fosfaattoestand, uitgedrukt in Pwgetal of P-Algetal, van de bodem gelijk blijft, treden er 'landbouwkundig onvermijdbare verliezen' op. Bij een Pwgetal in het traject 30 tot 60 mg P₂O₅ per liter grond variëren de landbouwkundig onvermijdbare verliezen van circa 25 tot 70 kg P₂O₅ per ha per jaar (10 tot 30 kg P) (Oenema en Van Dijk, 1994). Uit recente studies blijkt dat bij een Pwgetal van 30 mg P₂O₅ per liter grond de uitspoeling van fosfor uit de bouwvoor van zandgrond circa 5 tot 10 kg P₂O₅ (2 tot 5 kg P) per ha per jaar bedraagt (Chardon, ongepubliceerd; Van der Salm en Breeuwsma, 1995; Van der Zee, 1995). Door vastefase diffusieprecipitatie (fixatie) wordt momenteel variërend van 0 kg in fosfaatrijke en ijzerarme zandgronden tot circa 50 kg P₂O₅ per ha per jaar in ijzerrijke zandgronden aan het reservoir van beschikbaar fosfor onttrokken (Van der Zee, 1995). Uit de studies blijkt dat hoe hoger het Pwgetal is, hoe hoger de onvermijdbare verliezen door uitspoeling en fixatie zijn.

Om de uitspoeling van fosfor uit de bovengrond naar de ondergrond en grond en oppervlakte-water tot een milieukundig aanvaardbaar niveau te brengen, zal de fosfaattoestand zo laag mogelijk moeten zijn. Voor een milieukundig aanvaardbaar niveau van Puitspoeling is een fosfaattoestand van Pwgetal groter dan 30 mg P₂O₅ per liter grond te hoog. Momenteel heeft meer dan 80 % van de akkerbouwpercelen een Pwgetal > 30. Hoewel niet direct vergelijkbaar, is de situatie voor grasland ongeveer gelijk; meer dan 50 % heeft een fosfaattoestand van ruim voldoende en hoger. De fosfaattoestand van de Nederlandse landbouwgrond zal dus naar een lager niveau moeten worden gebracht. Naar welk niveau precies is op dit moment niet duidelijk, wel dat het fors lager is dan een Pwgetal van 30 mg P₂O₅ per liter grond.

Er is relatief veel bekend over de processen die plaatsvinden bij accumulatie van fosfor in grond. Helaas is er relatief weinig bekend over de omgekeerde route. Als de afvoer groter is dan de aanvoer daalt de fosforconcentratie in de bodemoplossing en neemt de fosfaattoestand van de bodem af. Door desorptie en oplossing vindt buffering plaats, maar het is nog onduidelijk hoe snel het geadsorbeerde, geprecipiteerde en gefixeerde fosfor weer terugkeert als opgelost fosfor in de bodemoplossing. Dat er een relatie is met de fosforconcentratie in de bodemoplossing en dus met de fosfaattoestand is wel duidelijk. Alleen bij een lage fosfaattoestand kan dit fosfor terugkeren in de bodemoplossing. De resultaten van in productie genomen prairiegronden geven aan dat het anorganisch fosfor niet snel vrijkomt, maar het is niet bekend of dat ook geldt voor de nu fosforrijke zandgronden in Nederland. Omdat veel gronden in Nederland een relatief hoge P-toestand hebben en een groot deel van de bindingscapaciteit van de bodem voor fosfor reeds bezet is, zijn de onvermijdbare verliezen door fixatie nu kleiner dan in het verleden. Dit betekent dat er nu waarschijnlijk een groter deel van het toegediende fosfor voor het gewas beschikbaar is dan in het verleden. De condities voor ecologisering van de fosforkringloop, dat wil zeggen het beter benutten van de reeds aanwezige fosfor, zijn momenteel dus relatief gunstig.

FOSFAATBESCHIKBAARHEID

Het fosfor in de bodem is in vijf pools onder te verdelen (zie ook Fig. 4) in volgorde van toenemende beschikbaarheid:

- 'occluded' en aan ijzer en aluminium gefixeerd fosfaat
- mobiliseerbaar, geprecipiteerd anorganisch fosfaat (calciumfosfaat)
- fosfaat als onderdeel van organische stof
- geadsorbeerd fosfaat
- wateroplosbaar anorganisch fosfaat

De opname van fosfor door de plantewortel wordt bepaald door:

- (i) de fosforconcentratie bij de wortel,
- (ii) de diffusie van opgelost fosfor naar de plantewortels en
- (iii) het vrijkomen van fosfor uit de vaste fase van de bodem.

Verschiedende factoren kunnen deze processen beïnvloeden. Belangrijk daarbij zijn: de fosfaattoestand, structuur, pH en vochtgehalte van de grond, het wortelstelsel van de plant, mycorrhizae, beschikbaarheid van andere essentiële nutriënten en temperatuur. Naarmate de fosfaattoestand lager is, worden de andere factoren belangrijker, m.a.w. als de plantewortel bij een lage fosfaattoestand voldoende fosfor wil opnemen, dan zullen bijvoorbeeld structuur en pH van de grond en de voorziening met andere nutriënten goed moeten zijn. Bovendien moet de fosforhoudende meststof zo dicht mogelijk en op het juiste moment bij de plantewortel worden gebracht, opdat de fosforconcentratie bij het worteloppervlak zo hoog mogelijk is en diffusie van meststof naar plantewortel geen limiterende stap is.



[Figuur 5](#)

Om de beschikbaarheid van fosfor in de grond te bepalen, wordt een groot aantal verschillende extractiemethoden toegepast (Tunney et al. 1995). Bij vrijwel alle methoden vertoont de relatie tussen de hoeveelheid geëxtraheerd fosfor en de fosforbemesting nogal wat spreiding. Gemeenschappelijk is dat boven een zekere kritische waarde van het geëxtraheerd fosfor de reactie op fosforbemesting zeer gering is en beneden die waarde de reactie zeer sterk varieert (Fig. 5). Dat laatste wordt onder andere veroorzaakt door andere factoren dan de fosfaattoestand die de opname van fosfor door de plant bepalen, zoals hiervoor aangegeven. Voor aardappelen ligt de kritische waarde bij een Pwgetal van circa 25 mg P₂O₅ per liter (Fig. 5). Boven een Pwgetal van circa 25 mg P₂O₅ per liter is een reactie op fosforbemesting meestal afwezig. Dit komt overeen met het ervaringsfeit dat in veel van de veldproeven, die in de laatste decennia in West-Europa zijn uitgevoerd, geen reactie op fosfaatbemesting wordt waargenomen (Weissbach and Ernst, 1994; Tunney et al. 1995; S. Vermeulen, persoonlijke mededeling). Veel West-Europese landbouwgronden bevatten voldoende fosfaat om zonder P-bemesting een rendabele akkerbouw en graslandproductie te realiseren gedurende meer dan één jaar.

In de tuinbouw ligt de situatie anders. Veel groentegewassen hebben een ondiep wortelstelsel en een korte groeiperiode. Voor deze gewassen is het zeer moeilijk om een optimale gewasproductie te realiseren bij een laag Pwgetal, gecombineerd met een geringe P-bemesting. De geadviseerde Pgiftten volgens de huidige P-bemestingsadviezen voor de vollegrondsgroenteteelt zijn ook veel hoger dan die volgens de P-bemestingsadviezen voor de akkerbouw bij vergelijkbaar Pwgetal. Dit betekent dat bij deze gewassen een grote inspanning geleverd moet worden om een rendabele gewasproductie te combineren met een milieukundig gezien acceptabele Ptoestand van de bodem. Bemesting met P in de plantrij en een goede bodemstructuur en zuurgraad zijn daarbij essentieel.

Van de toegediende fosforhoudende meststof wordt in het jaar van toediening meestal niet meer dan 10 % tot 25 % door de plant opgenomen. Dat geldt voor alle meststoffen, zowel voor organische meststoffen en meststoffen met 100 % inwater oplosbaar fosfor. Meestal is de beschikbaarheid van P uit organische meststoffen in het jaar van toediening lager dan die van goedoplosbare kunstmest, maar in de jaren daarna is dat juist andersom. De cumulatieve werking blijkt ongeveer gelijk te zijn, op den duur, al is dat niet eenvoudig experimenteel vast te stellen. Om met een minimale P-aanvoer toch een rendabele productie te realiseren zal meer aandacht besteed moeten worden aan verhoging van de effectiviteit van P-houdende meststoffen in het jaar van toediening, zowel in praktijk als onderzoek.

Vrijwel alle gangbare analysemethoden ter bepaling van de fosfaatbeschikbaarheid in grond zijn gebaseerd op extractie van anorganisch fosfor. Bij ecologisering van de fosforkringloop wordt de fractie organisch gebonden fosfor relatief belangrijker. Het is dan ook de vraag of in de ecologische landbouw de nu gangbare analysemethoden wel altijd voldoende geschikt zijn. Er zal meer rekening gehouden moeten worden met de hoeveelheid gemakkelijk-mineraliseerbaar organisch gebonden fosfor. Om bij vermindering van de fosforaanvoer toch een hoge gewasopbrengst te realiseren, zal het in de bodem aanwezige fosfor beter benut moeten worden. Te hoge concentraties opgelost fosfor

moeten worden voorkómen, omdat juist dan relatief veel fosfor in slechtbeschikbare vormen (b.v. stabiel anorganisch P; Fig. 2) wordt omgezet. Het fosfor dat via gewasresten en mest op de bodem terugkeert moet na mineralisatie snel kunnen worden geassimileerd door het groeiende gewas. Synchronisatie van mineralisatie van organisch gebonden fosfor in gewasresten en mest, en opname van fosfor door het gewas wordt belangrijker. De uitdaging voor de landbouw is om de overdracht van fosfor van het ene bodemreservoir in het andere bodemreservoir nauwkeurig te kwantificeren en te begrijpen. Met die kennis kan het bodemecosysteem beter gestuurd worden, opdat het reeds in de bodem aanwezige fosfor efficiënt kan worden benut.

BIOLOGISCHE STIMULERING VAN DE FOSFAATBESCHIKBAARHEID EN -OPNAME

Op de bedrijven met lage fosfaatbeschikbaarheid zullen processen van fosfaatmobilisatie en fosfaatopname plaats moeten vinden die via de gangbare analysemethoden (Pw, P-Al, enz.) niet voorspelbaar gemaakt kunnen worden. Dit betreft met name een aantal biologische bedrijven in Flevoland. Op deze bedrijven bleek de bodem met een zeer beperkte bemesting een P-Al-getal te hebben verkregen beneden 25 mg P₂O₅/100 g grond. Het Pw getal op deze bodems ligt tussen 4 en 8 mg P₂O₅/l grond. Deze waarden voorspellen een ernstig fosfaatgebrek voor de gewassen, dat echter in de praktijk in het geheel niet optreedt (Th.B.M. Dekkers, pers.med.).

Daarom wordt onderzocht op welke wijze de fosfaatopname daar geschiedt en of daar betrouwbare voorspellingen zijn te doen voor de fosfaatbeschikbaarheid. Hiertoe moet een verder inzicht worden ontwikkeld in de biologische processen van fosfaatmobilisatie en fosfaatopname.

Wortelactiviteit en micro-organismen

De opname van fosfaat door de plant vindt plaats in een zone van enkele millimeters rondom de wortels. De opname is sterk afhankelijk van de pH, en is het grootst bij pH = 5. Een locale pH-verlaging kan worden bereikt door koolzuurgas dat vrijkomt bij de wortelademhaling, door zure exudaten van de plant en door humuszuren. Planten met een uitgebreid fijn wortelstelsel, zoals de meeste Cruciferen (bijvoorbeeld koolzaad, gele mosterd, bladrammenas, koolgewassen) en Phacelia kunnen op deze wijze ook bij lage fosfaatbeschikbaarheid nog goed aan fosfaat komen. Deze planten scheiden soms ook organische zuren af, zoals appelzuur (Bloemhof, 1988) die fosfaat in de wortelomgeving kunnen vrijmaken uit organische verbindingen of uit calciumfosfaat. Andere gewassen, met name vlinderbloemigen, hebben een zeer hoge stofwisselingsactiviteit in de wortels door de activiteit van symbiotische bacteriën, zoals vlinderbloemigen. Dit resulteert ook in een locale verhoging van de fosfaatmobiliteit rondom de wortels.

De plant kan ook reageren op een beperkt fosfaataanbod door vergroting van de wortellengte per plant. In tarwe is op het proefbedrijf OBS in Nagele een tweemaal zo grote wortellengte per halm gevonden bij een Pw-getal van 20 mg P₂O₅/l grond dan bij tarwe die groeide bij een Pw-getal van 45 (Vereijken, 1984).

In samenhang met een verhoogde wortelgroei en wortelactiviteit treedt een verhoging op van de microbiële activiteit door bacteriën die kunnen leven van wortellexudaten en van beschikbare verteerbare organische stof. Deze bacteriën produceren fosfatases, enzymen die fosfaat kunnen vrij maken door mineralisatie van organische stof.

Regenwormen

Regenwormen leveren een grote bijdrage aan de afbraak van organische stof. Ze zorgen daarmee voor accumulatie van fosfaat uit hun voedsel maar vooral voor een verbetering van de P-beschikbaarheid. Veel plantewortels concentreren zich rond wormengangen en profiteren daarmee van de verhoogd fosfaatbeschikbaarheid in de wormenexcrementen. Het P-Al-getal in veldjes met wormen is in 6 jaar van 6,0 tot 7,6 mg P₂O₅ / 100 g gestegen vergeleken met niet-wormen-veldjes op onbemeste percelen van het proefbedrijf Nz 27 in Zeewolde, in beheer bij Directie Flevoland Rijkswaterstaat (Dekkers, 1995). Hier werd een Pw-getal in de wormenuitwerpselen gevonden van 28 mg P₂O₅ / liter

grond tegen 4 in de omringende grond bij een nagenoeg gelijk P-totaal-gehalte van 146 versus 132 mg P₂O₅/ 100 g grond (Van der Werff et al., 1995).

Regenwormen zijn afhankelijk van een ruim aanbod van jonge organische stof en een beperkte intensiteit van grondbewerking. Ze kunnen heel slecht tegen het gebruik van nematiciden en andere gewasbeschermingsmiddelen. Benutting van de wormenactiviteit is derhalve alleen mogelijk in bedrijfssystemen waar de wormenpopulaties zich kunnen ontwikkelen of handhaven.

Arbusculaire Mycorrhiza Fungi - AMF

Een biologisch complex proces van fosfaatopname is de activiteit van *Arbusculaire Mycorrhiza Fungi*. Reeds lang is bekend dat bij hogere planten de symbiose met wortelschimmels een doorslaggevende rol speelt bij de fosfaatopname. Bij bomen betreft het meestal ectomycorrhiza, die de wortel met hun hyfen omgeven als een mantel. In vele kruidachtige meerjarige en éénjarige gewassen gaat het om endo-mycorrhiza, die de wortel binnendringen met hun hyfen en binnenin de wortel blaasjes (vesicels) en boompjes (arbuscels) vertonen. De ontwikkeling van AMF is afhankelijk van de bodemtemperatuur en is beneden 10 °C beperkt. Zeer veel onderzoeksgegevens uit het buitenland betreffen bodems met een zeer lage directe fosfaatbeschikbaarheid zodat het niet voor de hand lag deze symbiose een rol toe te kennen in de moderne hoogproductieve (conventionele én biologische) Nederlandse landbouw (Ruissen, 1982). In de afgelopen 15 jaar bleek de AMF-kolonisatie van gewaswortels in de biologische landbouw vaak veel hoger dan in vergelijkbare conventionele bedrijven zoals is aangetoond op het proefbedrijf OBS in Nagele (Vereijken, 1984). In potproeven met zavelgrond uit Flevoland bleek dat bij een Pw-getal < 15 veldbonen met AMF een betere fosfaatopname en een hogere opbrengst vertoonden in vergelijking tot planten zonder AMF (Van der Werff & Buys, 1990). Ook andere proeven geven indicaties voor positieve effecten van AMF-kolonisatie op fosfaatopname en gewasgroei bij een Pw-getal van 15 à 18 mg P₂O₅ / liter grond.

In veldproeven met gerst bleek dat bij een Pw-getal van 4 - 8 de fosfaatopname significant beter was bij een AMF-kolonisatiegraad van de wortels van 75 % dan van 50 %. De variatie in kolonisatiegraad was verkregen door AMF-afhankelijke (veldboon) en AMF-onafhankelijke (suikerbiet) gewassen als voorvrucht. Hiermee was het infectiepotentieel, bestaande uit sporen en wortelresten met hyfen, aanzienlijk hoger na het voorgewas veldboon (Van der Werff et al., 1995). Uit de literatuur is bekend dat AMF een sterke bijdrage kan leveren aan de fosfaatopname in diverse gewassen. Berekeningen van Tarafdar and Marschner (1994) geven aan dat 24-33 % van de fosfaatopname bij wintertarwe werd gerealiseerd via AMF bij een P-voorziening in anorganische vorm. Bij organische P-voorziening bedraagt dit aandeel 48-59 % van de totale P-opname.

VERBETERING VAN DE FOSFAATBENUTTING OP BEDRIJFSNIVEAU

Met de kennis van de hiervoor behandelde fenomenen en processen hebben we nog geen inzicht in de samenhang van de processen, zoals die zich kan voordoen in de loop van de ontwikkeling van het gewas. In veldproeven met gerst bleek steeds dat de relatie tussen Pw-getal dan wel P-Al-getal en fosfaatopname in het gewas in de eerste vijf weken na zaaien het sterkst was (Van der Werff et al., 1995; Dekkers, 1995). Uit Figuur 6 (Dekkers, 1995) wordt duidelijk dat na 48 dagen de fosfaatopname van het gewas in de velden met wormen minder snel toegenomen was dan in de velden zonder wormen. In de wormenvelden was waarschijnlijk meer fosfaat in organisch gebonden vorm voorhanden hetgeen meer enzymatische (wortel-activiteit - microorganismen in wortelomgeving - fosfatase) activiteit vereist om het op te kunnen nemen. In de wormenvelden bleek de wortellengte-dichtheid (uitgedrukt in cm wortel per cm³ grond) sterk toenam in vergelijking met de niet-wormenplots op 70 dagen na zaai. Het volgende fenomeen was tussen 48 en 98 dagen de AMF-kolonisatie van de wortels sterk toenam. Vanaf 70 dagen na zaai tot de oogst was er geen significant verschil meer in het fosfaatgehalte van de spruit ondanks verschillen in PAI zoals die aan het begin van de ontwikkeling wel terug te vinden zijn in het gewas.

Indicaties van relevante verschillen in andere gemeten parameters:

bij 36 dagen na zaai: P-AI verschil bemest <> onbemest gerelateerd aan P-opname

bij 48 dagen: sterke toename P-opname in niet-wormenplots

bij 70 dagen: wortellengtedichtheid toename in wormenplots

bij 48-98 dagen: sterke toename AMF-kolonisatie

bij 126 dagen: geen significante verschillen in gemeten variabelen

Om de beschreven veldwaarnemingen te toetsen hebben we in 1995 uitgebreide kasproeven met vlas gedaan. De gebruikte grond was afkomstig van hetzelfde veld als de gerstproef van 1993. Voor het inzetten van de proef is de mycorrhiza in de bodem gedood door gamma-bestraling. De bemesting was gelijk aan de hierboven beschreven veldsituatie met zomergerst: onbemest, kippemest op basis van onttrekking sinds 1988, rundermest met ruwfosfaat op basis van onttrekking sinds 1988. Deze veldsituatie werd aangevuld met behandelingen op basis van onbemeste grond met een gift van tripelsuperfosfaat op basis van de beschikbaarheid van het kippemest-P-AI-getal en driemaal deze hoeveelheid. In deze proef bleek wederom dat de initiële gewasontwikkeling sterk werd bepaald door de direct beschikbare fosfaat. Het gewas met AMF-kolonisatie bij alle bemestingsniveaus ging zich al spoedig veel beter ontwikkelen dan zonder AMF-kolonisatie. Het eindresultaat was een vrijwel gelijke gewasontwikkeling bij alle P-beschikbaarheidsniveaus én AMF, maar blijvend grote verschillen naar rato van fosfaatbemesting bij de niet met AMF-inoculum behandelde potten (Fig. 7).

In alle veld- en kasproeven die we bij lage fosfaatbeschikbaarheid hebben gedaan blijkt dat de fosfaattoestand van de bodem in het begin van de gewasontwikkeling verklarend is voor de fosfaatopname. Geleidelijk kunnen biologische interacties optreden die bijdragen aan de mobilisering en de opname van fosfaat. De complexere biologische relaties, zoals de symbiose tussen gewas en AMF-schimmel, treden later in de systeemontwikkeling op. Dit is te vergelijken met de ontwikkeling van pionier-systeem waar de abiotische omstandigheden systeembepalend zijn tot een ontwikkeld systeem met vele interne biotische relaties.

Een dergelijke ontwikkeling in het bodemecosysteem kan worden bevorderd in de vruchtwisseling op bedrijfsniveau. In zo'n samenhangend systeem treden bufferende effecten op en is het gewas in staat te reageren op verschillende omstandigheden van fosfaatbeschikbaarheid. Hiermee wordt het biologische deel van de biogeochemische fosforkringloop versterkt en worden de mogelijkheden van organisch fosfaat beter benut.

Op bedrijfsniveau liggen de mogelijkheden voor verbetering van de benutting van fosfor in het goed verzorgen van de structuur en de zuurgraad van de bodem, een goede verdeling van de mest en bemesting van P in de plantrij bij gewassen die een hoge fosforbeschikbaarheid nodig hebben. Een ruimer aandeel van gewassen die langer te velde staan, die zich niet bijzonder vroeg in het seizoen bij lage bodemtemperaturen moeten ontwikkelen en die opgroeien bij een beperkte fosfaatbeschikbaarheid geeft in aanvulling op de fysische en chemische optimalisatie een ruime mogelijkheid tot ecologiseren van de fosfaatopname.

Fosfaatopname op lange termijn

In grote lijnen kunnen we stellen dat enzymatische mobilisering van fosfaat optreedt bij een lage fosfaattoestand van de grond en een voldoende aanbod van organisch gebonden fosfaat, bij een grote activiteit van wortels en micro-organismen die fosfatase afscheiden. Dit is een proces van recycling van organisch fosfaat met zeer geringe verliezen omdat het beschikbaar komende fosfaat onmiddellijk kan worden opgenomen door het gewas. Op langere termijn zal er niet alleen een efficiënte biogeochemische kringloop van organisch fosfaat binnen het bedrijf nodig zijn, maar ook een efficiënt gebruik van fosfaat in de geologische kringloop zoals dat uit verwerking beschikbaar komt of uit anorganische fosfaathoudende meststoffen. In een situatie met een geringe directe beschikbaarheid kan met name AMF fosfaat beschikbaar maken uit zowel organische stof als uit calciumfosfaat. Indien we van de experimenten op 'De Schreef' in Oostelijk Flevoland (Remmelzwaal en Habekotté, 1986) uitgaan mogen we rekenen op een bijdrage uit de calciumfosfaat voorraad van 10 kg fosfaat/ha per jaar op termijn van 23 jaar, dat is 20 % van de totale fosfaatopname van 50 kg per ha per jaar voor een gemiddeld akkerbouwgewas. Uit het zelfde onderzoek blijkt ook dat de gemiddelde

fosfaatonttrekking over de hele proefperiode bij lage beschikbaarheid 10 kg fosfaat/ha/jaar lager is dan bij een hoge beschikbaarheid. Aan het eind van de proef was het P-Al-getal 11 respectievelijk 40 mg P₂O₅/100 g grond bij lage en hoge beschikbaarheid. Bij de start was het P-Al-getal voor beide 20 mg P₂O₅/100 g grond. De op lange termijn noodzakelijke aanvulling van fosfaat over de 23 jarige proefperiode is in de fosfaatarme situatie 40 kg P₂O₅/ha per jaar en in de rijke situatie 60 kg P₂O₅/ha. De gewasopbrengst was wel lager in de variant met lage P-beschikbaarheid, namelijk 5 % (suikerbieten), 10 % (tarwe) tot 15 % (aardappelen) (Remmelzwaal en Habekotté, 1986).

De conclusie uit de combinatie van de genoemde onderzoeken is dat bij een beperkte fosfaatbeschikbaarheid (P-Al tussen 10 en 20) biologische fosfaatopnameprocessen worden gestimuleerd. Deze mechanismen treden op in volgorde van toenemende biologische samenhang en complexiteit van de processen en leiden op verschillende wijze tot een vrijwel gelijke fosfaatopname door het gewas uit moeilijk toegankelijke fosfaatpools. In dergelijke situaties is de gewasopname lager dan in een conventionele situatie met een ruime fosfaatbeschikbaarheid.

CONCLUSIES EN PERSPECTIEVEN

Biogeochemische kringloop

Uit de bovenvermelde gegevens van Remmelzwaal en Habekotté (1984) blijkt dat er op bodems met toegankelijke organische en anorganische fosfaatreserves een besparing van maximaal 33 % op de fosforinput is te realiseren indien niet wordt ingeteerd op de fosforvoorraad van de bodem. Hierdoor treden er minder verliezen op in de biogeochemische kringloop van de uit de geologische kringloop gedolven fosfaatreserves. Dit leidt tot een verhoging van de fosfaatefficiëntie van 22 - 30 %, afhankelijk van de gewassen met correctie voor de lagere gewasopbrengst. Door de toch noodzakelijke aanvulling van de fosfaatonttrekking toe te dienen aan de meest fosfaatbehoefte gewassen zoals aardappel, die geen of weinig gebruik maken van AMF, kan de opbrengstreductie nog worden beperkt. Aanvulling van fosfaat met restprodukten zoals thomasslakkenmeel en GFT-compost versterkt de recycling van fosfaat in deze kringloop en vermindert de aanspraak op geologische reserves.

Om op de beschreven wijze de biogeochemische fosforkringloop te optimaliseren dienen in de bedrijfsvoering aanpassingen te worden gemaakt. Aanpassing van de grondbewerking en beperking van het gebruik van in de bodem werkzame gewasbeschermingsmiddelen zoals nematiciden en systemische fungiciden bevordert de overlevingskansen van wormen, AMF-schimmels en andere bodemorganismen die door hun activiteiten de beschreven processen ondersteunen (bijvoorbeeld Marinissen, 1995). De zorg voor een hoog infectiepotentieel bij de ontwikkeling van AMF-afhankelijke gewassen versnelt het effect van AMF op de fosfaatopname. Dit dient één van de overwegingen te zijn bij het vaststellen van de gewasrotatie.

Naast de AMF-activiteit moeten ook de mogelijkheden van diepwortelende gewassen met een fijn wortelstelsel, zoals *Phacelia*, worden benut om fosfaat uit diepere lagen te mobiliseren en in de bouwvoor als organisch gebonden fosfaat te laten bijdragen aan de organische-fosfaatpool.

Geologische fosforkringloop

Voor een duurzame landbouw op lange termijn is een langdurige beschikbaarheid van fosfaatrijke apatieten een vereiste zolang niet al te fosfaat in de biogeochemische kringloop kan worden behouden vanwege onvermijdbare verliezen in de bodem en afvoer van fosfaat buiten het bereik van de landbouw. Het is voor de ontwikkeling van de wereldvoedselproductie noodzakelijk dat de fosfaatafvoer uit de nu fosfaatexporterende gebieden wordt aangevuld, zonodig uit de in apatiet-houdende gesteenten aanwezige reserves. In deze gebieden, waar fosfaat vaak sterk beperkend is voor de plantaardige produktie, moet de voedselproductie ook op langere termijn mogelijk blijven of verhoogd worden.

REFERENTIES

Bloemhof, H. (1988)

The uptake of phosphate by rape (*Brassica napus*): simulation and experiments.
Report Wageningen Agricultural University.

Bockman, O.C., O. Kaarstad, O.H. Lie & I. Richards (1990)

Agriculture and fertilizers, Norsk Hydro, Oslo, 220 pp.

Bolan, N.S. (1991)

A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant & Soil* 134: 189-207.

CBS (1992)

Kwartaalbericht milieustatistieken 9: 1.

Cooke, G.W. (1988)

The intercontinental transfer of plant nutrients. In: Nutrient balances and the need for potassium. Proceedings of the 13th I.P.I. Congress in Reims. IPI, Bern, 267-287.

Cooke, G.W. (1967)

The control of soil fertility. Crosby, Lockwood & Sun Ltd, London, 526 pp.

Lehr, J.R. (1980)

Phosphate raw materials and fertilizers: Part I-A look ahead. In: F.E. Khasawaneh, E.C. Sample & E.J. Kamprath (Eds), The role of phosphorus in agriculture, 81-120.

Dekkers, Th.B.M. (1995)

Effect of organic manure and earthworms on the colonization of indigenous AM Fungi and phosphate uptake of barley in an organic farm. Proc. Granada.

Gerretsen, F.C. (1939)

Bodem bacteriologie in dienst van de land- en tuinbouw. Rijkslandbouwproefstation voor den akker- en weidebouw te Groningen.

Mackay, A.D., J.A. Springett, J.K. Syers & P.E.H. Gregg (1983)

Origin of the effect of earthworms on the availability of phosphorus in a phosphate rock.- *Soil Biology and Biochemistry* 15: 63-73.

Marinissen, J.C.Y. (1995)

Earthworms, soil-aggregates and organic matter decomposition in agro-ecosystems in The Netherlands. Thesis Landbouwuniversiteit Wageningen.

Tarafdar, J.C. & Marschner H. (1994)

Phosphate activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA Mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus. *Soil Biol. Biochem.* 26(3): 387-395

Meeuwissen, P.C., R. Boeringa & P.A. van der Werff (1988)

Fosfaatnormering, mineralenbalansen en milieubelasting in de (biologische) vollegrondsgroententeelt. NRLO rapport nr 88/10, NRLO, 's Gravenhage.

Oenema, O. & T.A. Van Dijk (red.) (1994)

Fosfaatverliezen en fosfaatoverschotten in de Nederlandse landbouw.
Project Verliesnormen, deelrapport I. VROM, Den Haag, 102 pp.

Reijerink J.G.A., A. Breeuwsma, H.H. Luesink & A. Kleijer (1993)

Rekenmodel voor de fosfaatverzadigingstoestand van mestoverschotgebieden.
Rapport 241, SC-DLO, Wageningen, 101 pp.

Remmelzwaal A.J. & Habekotté, A. (1986)

23 Jaar P-bemestingsonderzoek op proefboerderij de Schreef in Oostelijk Flevoland
RIJP rapport, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, en Rijksdienst voor IJsselmeerpolders, Lelystad.

Ris J. & B.J. van Luit (1973)

The establishment of fertilizer recommendations on the basis of soil tests.
Rapport 0 85, Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren, 52 pp.

Ruissen, M.A. (1982)

The development and significance of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizas as influenced by agricultural practices.
PhD thesis, Wageningen Agricultural University.

Schlesinger, W.H. (1991)

Biogeochemistry, an analysis of global change. Academic Press Inc. London, 443 pp.

Sharpley A.N. & P.J. Withers (1994)

The environmentally-sound management of agricultural phosphorus. *Fertilizer Research* 39: 133-146.

Sissingh, H.A. (1971)

Analytical procedure of the Pw method for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands.
Plant & Soil 34: 483-486

Tiessen, H., J.W.B. Stewart & J.O. Moir (1983)

Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60-90 years of cultivation. *Journal of Soil Science* 34: 815-823.

Tunney, H., A. Breeuwsma, P. Withers & P.A.I. Ehlert (1995)

Phosphorus recommendations and requirements for sustainable agriculture
(in press)

Van der Salm, C. & A. Breeuwsma (1995)

Fosfaatverliezen in kalkloze zandgronden, vergelijking van modelberekeningen en meetgegevens voor gras- en maïsland. Rapport 404, SC-DLO, Wageningen, 54 pp.

Van der Werff, P.A. & J. Buys (1990)

Zur Bedeutung der Mycorrhiza in alternativen Produktionssystemen.
In: Nährstoffdynamik und Nährstoffbilanzen in alternativ wirtschaftenden Betrieben. M. Kücke, (Ed.)-
Landbauforschung Volkenrode, Sonderheft 113.

Van der Werff, P.A., P.A.M. van Amelsvoort, J.C.Y. Marinissen & P. Frissen (1995)

The influence of earthworms and Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza on the availability of phosphate in ecological arable farming. *Acta Zoologica Fennica* 196: 41-44.

Van der Werff, P.A. (red) (1993)

Milieu-emissies en mineralenbalansen van biologische gemengde bedrijven op zandgrond. Rapporten Vakgroep Ecologische Landbouw nr 93/6 ; VROM projectnr. 341.004. Landbouwuniversiteit Wageningen, vakgroep Ecologische Landbouw.

Van der Zee, S.E.T.M. & M.C. del Campillo (1995)

Uitspoeling en fixatie van fosfaat; overwegingen voor de balans van de bouwvoor. Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding, LUW. (rapport in voorbereiding)

Vereijken, P. (1984)

Verslag over 1982. Proefbedrijf Ontwikkeling Bedrijfs-Systemen. OBS-publikatie nr.3. Proefstation voor de akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, Lelystad.

Walker, T.W. & J.K. Syers (1976)

The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma* 15: 1-19.

Weissbach, F. & P. Ernst (1994)

Nutrient budgets and farm management to reduce nutrient emissions.

In: L.'t Mannetje & J. Frame (Eds), *Grassland and Society*. Wageningen Pers, Wageningen. p. 343-360.

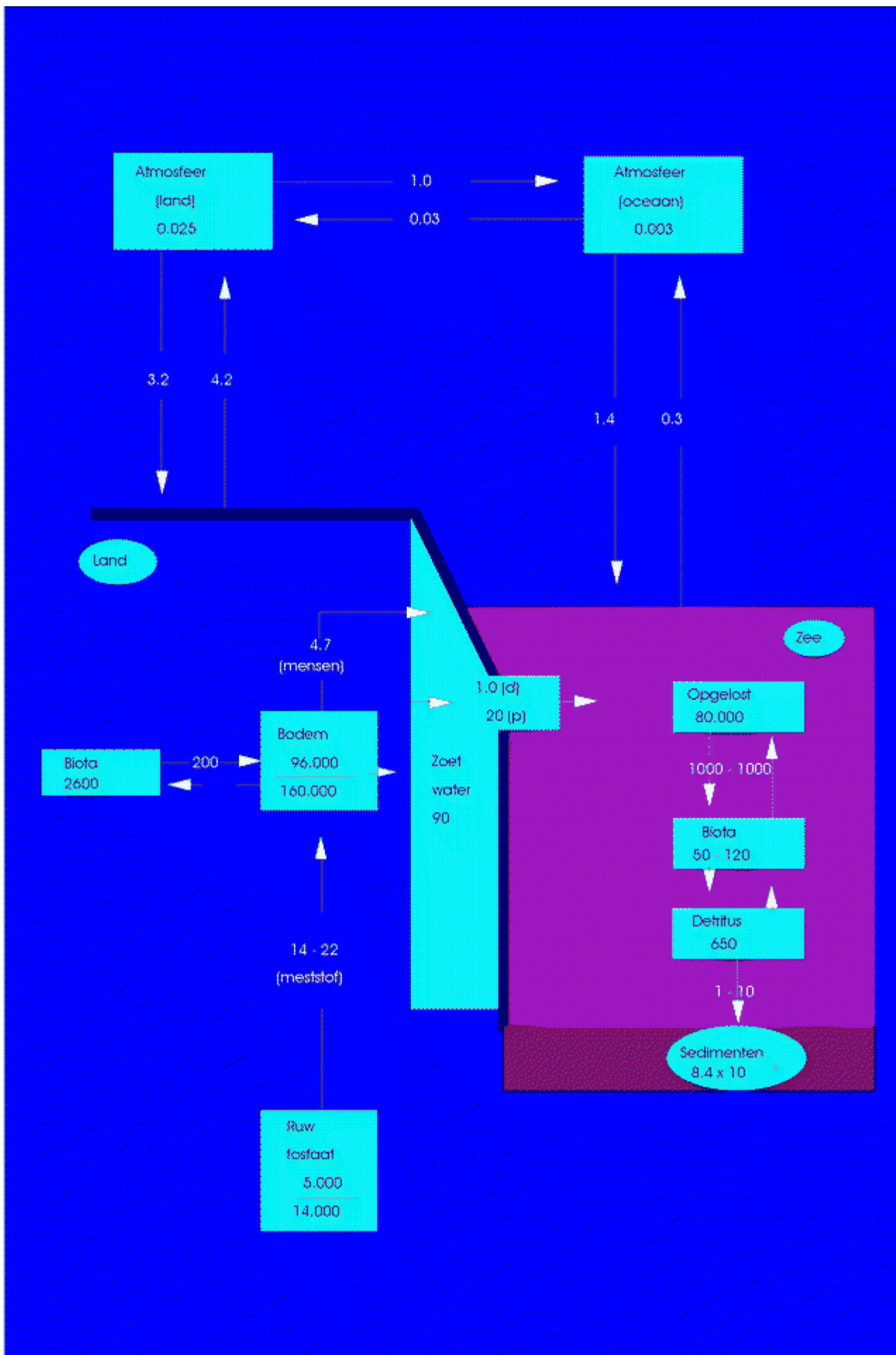
Willigen, P. de & M. van Noordwijk (1987)

Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD Thesis Wageningen Agricultural University.

 [Vorige artikel](#)  [Volgende artikel](#)  [Inhoudsopgave](#)

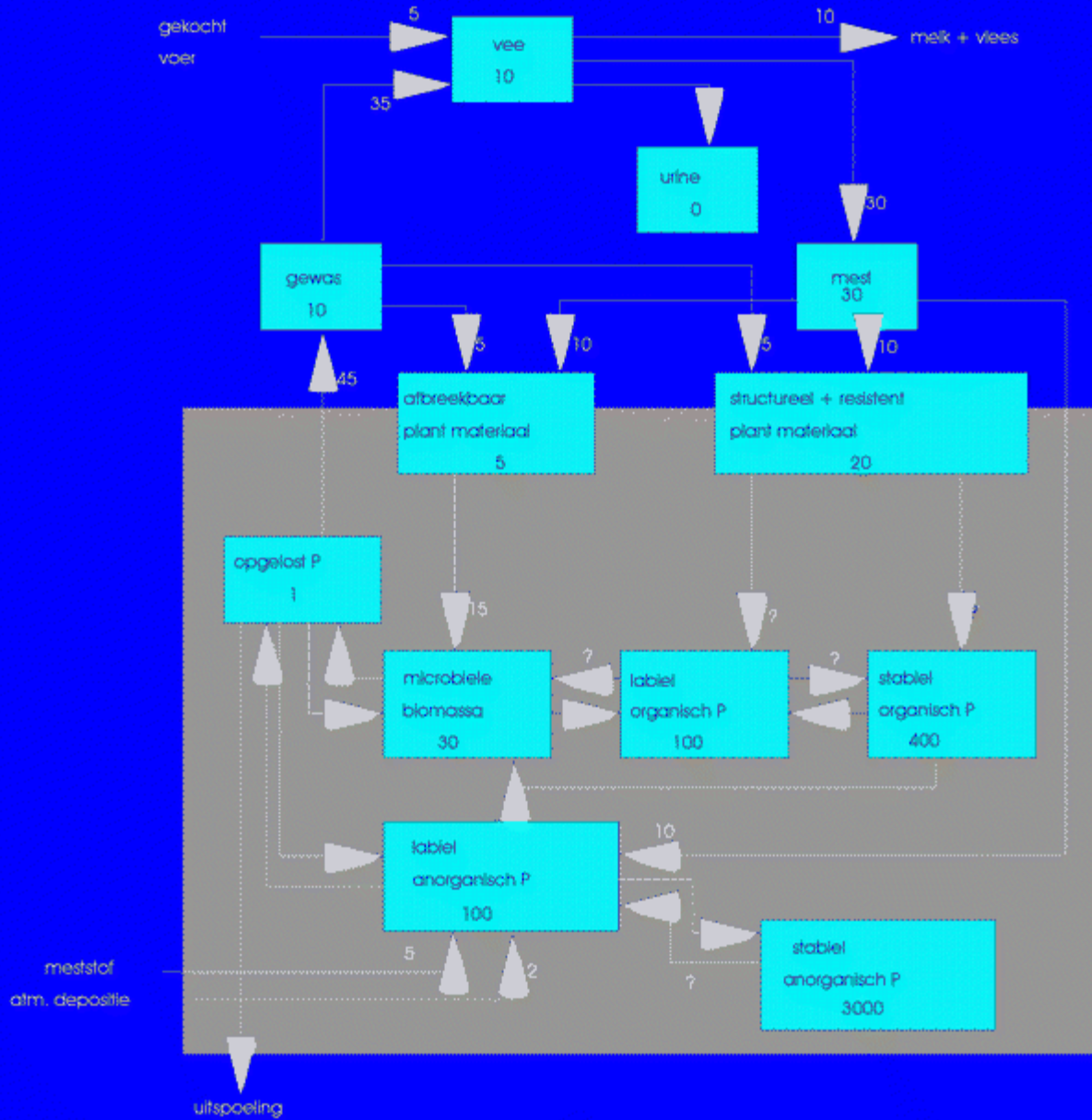
Last updated on 1995-12-22 by [Hugo Besemer](#)

Figuur 1



Figuur 1.

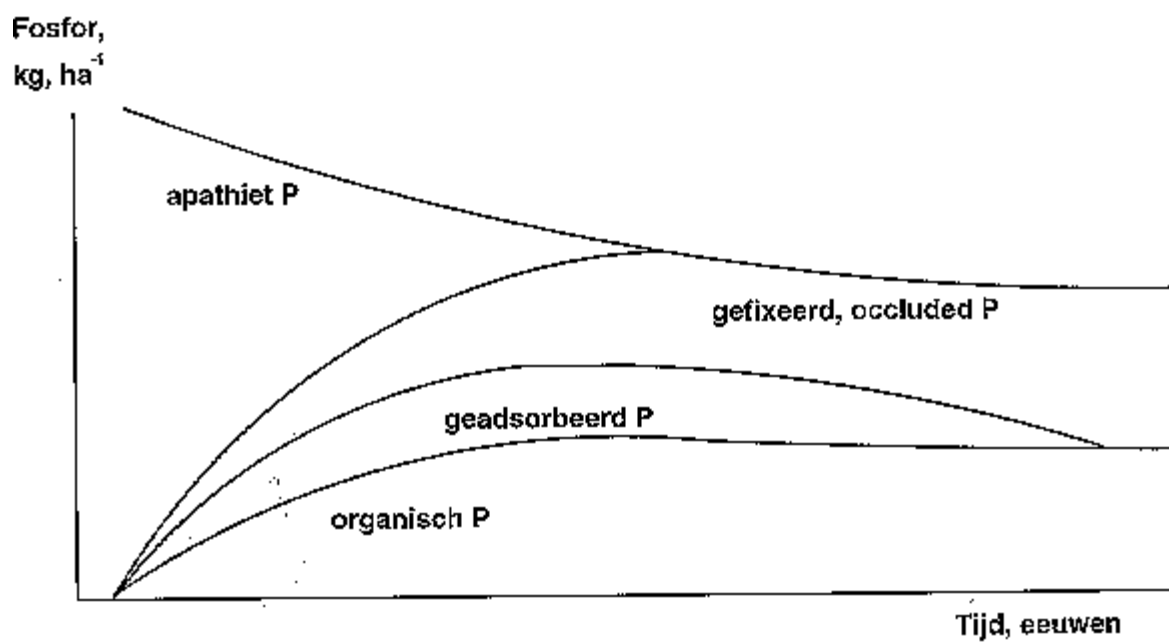
Geologische fosfaatkringloop op wereldschaal. Hoeveelheden fosfor (P) in reservoirs zijn weergegeven in Tg (1 Tg = 10^{12} g), P-stromen tussen reservoirs zijn weergegeven in Tg per jaar.



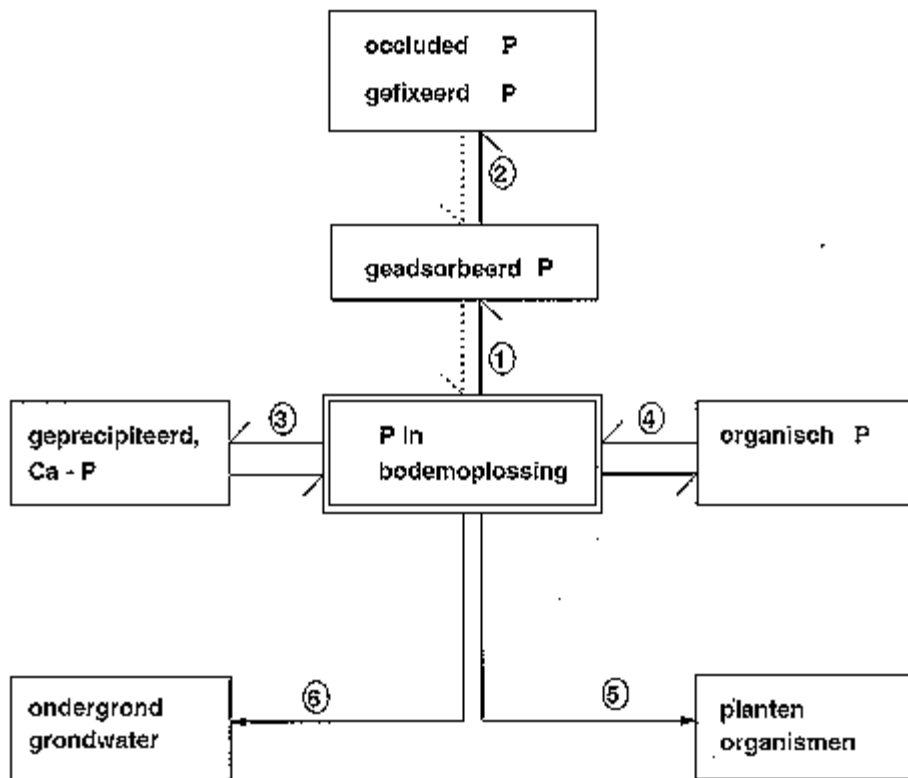
Figuur 2

Figuur 2.

Biogeochemische kringloop van fosfor in beweid grasland. Hoeveelheden fosfor (P) in reservoirs zijn weergegeven in kg per ha, P-stromen tussen reservoirs zijn weergegeven in kg per ha per jaar, voor een modelsituatie.

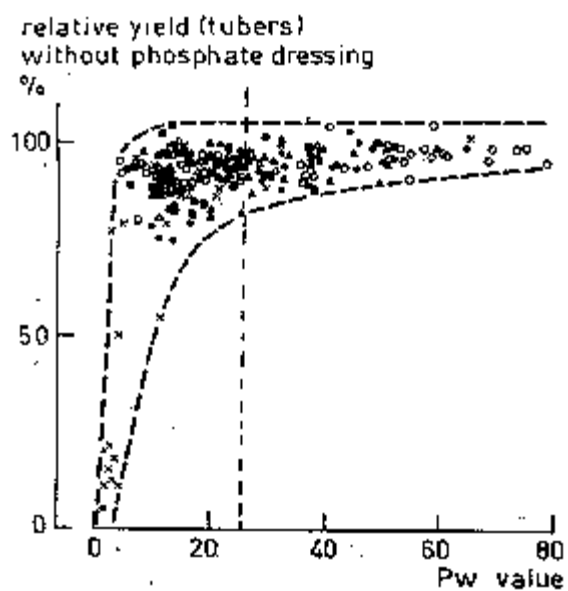


Figuur 3.
Veranderingen in P-vormen in de bodem tijdens het proces van bodemvorming gedurende zeer lange perioden (duizenden jaren). Het moedermateriaal bevat in de uitgangssituatie alleen P in de vorm van het primaire mineraal apathiet (naar Walker and Syers, 1976).



>

Figuur 4. Schematische voorstelling van de interacties tussen Pfracties in de bodem. Opgelost P in de bodemoplossing heeft een centrale rol. De nummers in de figuur geven de interacties tussen de verschillende P-fracties weer: (1) adsorptie en desorptie, (2) vastefase diffusieprecipitatie en oplossing/desorptie, (3) precipitatie en oplossing van calciumfosfaten, (4) immobilisatie en mineralisatie, (5) diffusie van P naar en in plantewortel, en (6) uitspoeling van P naar de ondergrond.



Figuur 5.
Reactie van de aardappelopbrengst op P-bemesting als functie van Pw-getal

(naar Ris en Van Luit, 1973)