

Benutting van fosfaat in landbouwgronden

*“Hoe kan het aanwezige fosfaat in
akkerbouwgronden worden vrijgemaakt voor
benutting door het gewas?”*

In opdracht van en gefinancierd door:



Dit project is uitgevoerd door:

Auteur(s):	Organisatie:
Harm Jan Russchen	DLV Plant
Johan Wander	DLV Plant
Jan Ties Malda	ALTIC
Projectnummer:	433643

Dit project maakt deel uit van het Masterplan Mineralenmanagement (MMM). Het MMM is een initiatief van LTO Nederland, de Nederlandse Akkerbouw Vakbond en het Productschap Akkerbouw. Binnen het MMM voeren diverse partijen gezamenlijk onderzoeks- en voorlichtingsprojecten uit op het gebied van bodem, bemesting en water. Dit rapport is eveneens terug te vinden op www.kennisakker.nl.



Voor uw vragen, op- en aanmerkingen over het MMM kunt u zich wenden tot Tjitse Bouwkamp (PA).

Stadhoudersplantsoen 12 • Postbus 29739 • 2502 LS Den Haag
☎ 070 370 84 26 • ✉ mmm@hpa.agro.nl • www.kennisakker.nl

Dit rapport is een uitgave van:

DLV Plant BV
De Drieslag 25
8251 JZ Dronten

Dit project is uitgevoerd door:

Harm Jan Russchen
Onderzoeker bemesting akkerbouw en vollegrondsgroenten
DLV Plant BV team onderzoek
De Drieslag 25
8251 JZ Dronten
06-51604521

Johan Wander
Projectleider akkerbouw en vollegrondsgroenten
DLV Plant BV team onderzoek
De Drieslag 25
8251 JZ Dronten

Jan Ties Malda
Specialist bemesting
De Drieslag 30
8251 JZ Dronten

Inhoudsopgave

1	Inleiding en doel	7
1.1	Inleiding	7
1.2	Doel van deze deskstudie	7
1.3	Inhoud verslag	8
2	Fosfaat	9
2.1	Fosfaat in de bodem	9
2.2	Bodemprocessen	11
2.3	Fosfaatbeschikbaarheid in relatie tot de bodem-pH	13
2.4	Fosfaattoestand in de Nederlandse bodem	15
2.5	Flexibele fosfaatgebruiksnorm	19
2.6	Fosfaatbehoefte akkerbouwgewassen in relatie tot de gebruiksnorm	20
3	Beschikbaarheid minerale fosfaatmeststoffen in de toekomst	24
4	Resultaten	26
4.1	Chemische oplossingsrichtingen	27
4.1.1	Bodemanalyses	27
4.1.2	Verzurende meststoffen op kalkrijke bodems	32
4.1.3	Bekalking op zure zandgrond	35
4.1.4	Startermeststoffen	37
4.1.5	Silicium	39
4.1.6	Humuszuren	41
4.2	Biologische oplossingsrichtingen	43
4.2.1	Uitmijnen van fosfaat in de bodem	43
4.2.2	Gewassen met een efficiënte fosfaatbenutting	46
4.2.3	Fosfaatoplossende bacteriën en schimmels	49
4.2.4	Mycorrhiza's	51
5	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	54
6	Literatuur	56

Samenvatting

De wereldvoorraad fosfaat is beperkt. Naar verwachting neemt hierdoor de beschikbaarheid van fosfaatmeststoffen vanaf 2030 af en de prijs toe. De fosfaatgebruiksnorm zal naar 2015 toe worden aangescherpt. Door deze 2 factoren zal de fosfaatgift per hectare afnemen en de fosfaatvoorziening van gewassen meer afhankelijk zijn van de fosfaatlevering vanuit de bodem.

In Nederlandse landbouwgrond is circa 1500 kilo tot 15 ton fosfaat per hectare aanwezig. Dit fosfaat is aanwezig als Fe-, Al-, Ca- en Mg-mineralen, geadsorbeerd aan Fe- en Al-hydroxiden, kleiplaatjes en koolzure kalk en ingebouwd in organische stof. In de bodemoplossing is slechts 0,04 tot 0,6 mg P_2O_5/l in oplossing. Het gewas neemt 40-100 kg P_2O_5/ha op afhankelijk van het soort gewas. Om het gewas van voldoende fosfaat te voorzien zal de opgeloste fosfaat in de bodemoplossing voordurend moeten worden aangevuld vanuit de bodemvoorraad.

In deze deskstudie zijn de mogelijkheden onderzocht om de benutting van de bodemvoorraad te verhogen. De noodzaak om de fosfaatbenutting van de bodemvoorraad te verhogen is het grootst bij de teelt van gewassen uit de gewasgroepen 0 en 1 bij een lage fosfaattoestand in de bodem ($Pw < 35$).

Het percentage percelen in de klasse laag $Pw < 35$ is circa 10-30 en varieert tussen de verschillende grondsoorten. Op zandgrond is het aandeel percelen in de klasse laag veel lager (circa 10%) dan op kleigrond circa 20-30%. Met name het aandeel percelen van de relatief jonge IJsselmeergronden in de Pw -klasse laag ($Pw < 35$) is relatief hoog.

Bij de teelt van gewassen uit de gewasgroepen 0 en 1 (o.a. vollegrondsgroenten, aardappelen en uien) op percelen in lage Pw -klasse is de fosfaatgebruiksnorm onvoldoende om aan de behoefte van het gewas te voldoen. Bij de teelt van gewassen uit gewasgroep 2 in de Pw -klasse 25-35 en bij de teelt van gewassen uit gewasgroep 0 en 1 in de Pw klasse 35-45 is de fosfaatgebruiksnorm onvoldoende om het gewas in fosfaatbehoefte te voorzien.

In deze deskstudie is van de onderstaande oplossingsrichtingen onderzocht hoe zij de benutting van de fosfaatvoorraad in de bodem kunnen verhogen:

Nieuwe bodemanalysemethoden

Fosfaat is in de bodem aanwezig in verschillende pools. Het vastleggen en vrijkomen van fosfaat in en uit deze pools is een gecompliceerd proces. Er zijn nog onvoldoende analysemethoden om een goede voorspelling te doen hoeveel en op welke termijn fosfaat beschikbaar komt uit de verschillende pools. Laboratoria gaan meer en meer over van het meten van de fosfaatcapaciteit naar intensiteit of een combinatie van beide. Het is nog onduidelijk welke meetmethode in welke grondsoort de meest nauwkeurige relatie heeft met de werkelijke fosfaatvoorziening van het gewas.

Beïnvloeding van de pH in de bodem

De fosfaatbeschikbaarheid in de bodem is pH-afhankelijk en optimaal bij een bodem-pH van 5,5. Door de pH in de bodem te veranderen kan de fosfaatbeschikbaarheid toe en afnemen. In de internationale literatuur wordt een stijging van de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem gevonden door bekalking. Dit betreft meestal sterk zure zandgronden, die in de Nederlandse akkerbouw niet aanwezig zijn. Wel kan door bekalking op korte termijn de

fosfaatbeschikbaarheid in de bodem toenemen door een gestimuleerde mineralisatie van organische stof.

Een verlaging van de bodem-pH op kalkrijke gronden voor een hogere fosfaatbeschikbaarheid in de bodem duurt jaren door de bufferende werking van de bodem. Wel lijkt rijenbemesting met verzurende ammoniummeststoffen een oplossing door lokaal in de wortelzone de pH te verlagen en daarmee de fosfaatbeschikbaarheid te verhogen.

Startermeststoffen

Door het gewas in de beginontwikkeling te stimuleren door een startgift kan het gewas verder groeien op levering van fosfaat vanuit de bodem. Veelal resulteert het effect van een startgift fosfaat in de rij in een versnelde beginontwikkeling. Het sterke effect van de gestimuleerde beginontwikkeling nivelleert grotendeels in de loop van het groeiseizoen, waar het effect op opbrengst kleiner is of verdwijnt. Het gebruik van startermeststoffen lijkt positief bij een lage fosfaattoestand, bij de teelt van gewassen vroeg in het seizoen en bij gewassen met een kort groeiseizoen.

Silicium

De fosfaatbeschikbaarheid is afhankelijk van de siliciumconcentratie in de bodem. Dit effect wordt vooral gevonden bij de teelt van gewassen bij een extreem lage fosfaattoestand, die nauwelijks in Nederland voorkomen. Silicium kan tevens resulteren in een betere translocatie van fosfaat in het gewas, maar dit effect wordt gevonden bij de teelt van rijst en gerst bij een lage fosfaattoestand in de bodem.

Op kleigrond is veelal voldoende silicium in de bodem aanwezig en heeft extra geen zin.

Humuszuren

Humuszuren kan de fosfaatadsorptie in de bodem beperken en hierdoor resulteren in hogere fosfaatbeschikbaarheid voor het gewas. Hierdoor kan de fosfaatgift voor sommige gewassen worden verlaagd. Dit kan door een direct effect van humuszuren (hogere P-beschikbaarheid in de bodem) als indirect (betere beworteling).

Uit veldproeven in België blijkt dat de werking van humuszuren beter is bij een lage bodemvruchtbaarheid. In de Nederlandse akkerbouw wordt veelvuldig organische meststoffen als drijfmest en compost toegepast, waardoor de bodemvruchtbaarheid van de Nederlandse bodems van nature hoog is.

Uitmijning

Uitmijning is het onttrekken van fosfaat aan de grond door middel van het oogsten en afvoeren van een gewas zonder fosfaatbemesting. Er is nog weinig informatie beschikbaar over veranderingen die op lange termijn optreden in de totale hoeveelheid fosfaat in de bodem en de verdeling ervan over de verschillende pools/vormen in de bodem (speciatie). Hierdoor zijn de gevolgen van deze maatregel op opbrengst en fosfaattoestand van de bodem moeilijk te voorspellen. Uitmijning van fosfaat zal resulteren in een negatieve organische stofbalans.

Gewassen met een efficiënte fosfaatbenutting

Van Cruciferen en vlinderbloemigen is bekend dat zij efficiënt fosfaat uit de bodem kunnen opnemen ook bij een lage fosfaattoestand. De plantenfamilie Cruciferen, waaronder bladrammenas, koolzaad, gele mosterd, en meerdere koolgewassen vallen, en Phacelia kunnen door hun uitgebreide wortelstelsel een groot volume van de bodem exploreren. Vlinderbloemigen (leguminosen) kunnen door een hoge stofwisselingsactiviteit in en rondom de wortels fosfaat in de wortelzone vrijmaken.

Het nadeel van de leguminosen als luzerne, klaver en lupine is dat zij enkel geschikt zijn als hoofdteelt. Het toepassen van groenbemesters als bladrammenas en gele mosterd zou de voorraad beschikbaar fosfaat voor het volggewas kunnen vergroten.

Fosfaatoplossende bacteriën en schimmels

De positieve werking van fosfaatoplossende bacteriën en schimmels op de fosfaatbeschikbaarheid/-opname door gewassen is veelal gevonden in pottenproeven en niet onder veldomstandigheden. Uit de workshop en uit literatuur blijkt dat onder veldomstandigheden de concurrentie met het van nature aanwezige bodemleven dusdanig groot is dat de geïnculeerde bacteriën in de bodem weinig kans krijgen om te overleven.

Mycorrhiza's

De kolonisatie van Mycorrhiza's is groter bij een lage fosfaatbeschikbaarheid in de bodem. Het positieve effect van mycorrhiza's op de beschikbare P zal vooral kunnen worden gevonden bij een lage voorraad beschikbaar P_2O_5 in de bodem. Het enten met mycorrhiza's lijkt enkel kans van slagen te hebben bij plantjes en minder bij zaad. In de bodem zijn mycorrhiza's van nature in meer of mindere mate aanwezig.

De plantenfamilies *Chenopodiaceae* (de Ganzevoetfamilie met bekende vertegenwoordigers als Melde, Quinoa en Bieten) en *Cruciferae/Brassicaceae* (de Kruisbloemigen met soorten als gele mosterd, bladrammenas en de koolsoorten) kunnen geen symbiose met mycorrhiza aangaan. De teelt van deze gewassen beïnvloeden de kolonisatie mycorrhiza in de volgteelt.

Door selectie op rassen met een hoge affiniteit met kolonisatie door mycorrhiza kan de fosfaatbenutting van de bodemvoorraad mogelijk verhoogd worden. Bij uien is een wilde variant ontdekt met een hoge affiniteit voor kolonisatie door mycorrhiza. Mogelijk kan deze eigenschap bij de huidige uienrassen worden ingekruist.

Over het effect van het toepassen van deze oplossingsrichtingen in de fosfaatvoorziening van gewassen onder de Nederlandse veldomstandigheden ontbreekt nog veel kennis.

Over het effect van het toepassen van humuszuren en verzurende meststoffen in de rij op de fosfaatvoorziening van het gewas zijn weinig proefresultaten bekend.

Ook het effect van de gewaskeuze op de fosfaatvoorziening van de volgteelt is nog weinig bekend. Het effect van inoculeren met mycorrhiza of fosfaatoplossende bacteriën is nogal wisselvallend en het is dan ook de vraag of dit effect heeft in Nederlandse bodems.

1 Inleiding en doel

1.1 Inleiding

Bij de productie van gewassen op Nederlandse landbouwgrond wordt gemiddeld 40-100 kg P₂O₅ opgenomen door het gewas (Smit et al., 2009). De beschikbaarheid van fosfaat in de bodemoplossing is in de orde van grootte van honderd gram tot een kilo per hectare. Dit betekent dat vanuit de bodemvoorraad fosfaat het beschikbare fosfaat in de bodemoplossing continue moet worden aangevuld om een gewas te kunnen voorzien van de fosfaatbehoefte. In Nederlandse landbouwgrond is circa 1500 kilo tot 15 ton fosfaat per hectare aanwezig. Deze voorraad wordt op peil gehouden door het toepassen van organische en minerale fosfaatmeststoffen. Door de Nederlandse mestwetgeving en de slinkende voorraad mineraal fosfaat in de wereld wordt de Nederlandse akkerbouwer beperkt om de fosfaatvoorraad in de bodem aan te vullen. Deze beperking zal in de toekomst toenemen. Hierdoor wordt het voor de Nederlandse akkerbouwer steeds belangrijker de bodemvoorraad fosfaat optimaal te benutten.

In dit rapport wordt verslag gedaan van een deskstudie uitgevoerd door DLV Plant en ALTIC, waarin meerdere mogelijkheden om de bodemvoorraad fosfaat beter te benutten, zijn nagegaan. Omdat de fosfaatgift op Nederlandse akkerbouwgronden zal teruglopen door beleid en beschikbaarheid van fosfaat, is door het Productschap Akkerbouw onderzoek aanbesteed naar de benutting van fosfaat in Nederlandse akkerbouwgronden.

1.2 Doel van deze deskstudie

De fosfaatvoorraad in de Nederlandse bodem is over het algemeen hoog. Het doel van dit project is om via een deskstudie na te gaan op welke wijze de fosfaatvoorraad in Nederlandse bodems beter benut kan worden. De bodem bestaat uit een fysische, chemische en biologische component. Als uitgangspunt voor deze studie is gekozen voor een bodem met voldoende vocht en een goede bodemstructuur. Bij een gebrekkige bodemstructuur en bij droogte is de fosfaatvoorziening van het gewas beperkt. Structuurverbeterende maatregelen en beregening kunnen dan de fosfaatvoorziening van het gewas verbeteren. Een verhoogde fosfaatgift kan een slechte bodemstructuur compenseren.

De fosfaatopname door het gewas kan zowel direct worden beïnvloed door verhoging van de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem als indirect. Indirect kan de fosfaatopname worden verhoogd door meer groei van plantenwortels. Bij een groter wortelstelsel kan een groter volume van de bodem worden geëxploreerd en meer fosfaat door het gewas worden opgenomen.

De beschreven oplossingsrichtingen in dit rapport geven de mogelijkheden aan om de fosfaatvoorraad in de bodem met een goede fysische structuur beter te benutten. De oplossingsrichtingen zijn zowel chemisch als biologisch van aard.

Een voorwaarde hierbij is dat de oplossingsrichtingen niet leiden tot schadelijke neveneffecten. Schadelijke neveneffecten kunnen zijn:

- Verlies van opbrengst
- Lager rendement voor de teler
- Niet duurzaam in de toekomst

1.3 Inhoud verslag

In hoofdstuk 2 is ingegaan op de vormen van fosfaat in de bodem, de hoogte van de fosfaattoestand van Nederlandse akkerbouwpercelen, het beleid met flexibele fosfaatgebruiksnormen, de fosfaatbehoefte van het gewas etc. In dit hoofdstuk wordt duidelijk waar de knelpunten wat betreft fosfaat in de Nederlandse akkerbouw liggen. In hoofdstuk 3 is kort de wereldwijde problematiek van de krimpende voorraad mineraal fosfaat beschreven, waardoor de beschikbaarheid van minerale fosfaatmeststoffen voor de landbouw beperkt zou kunnen worden.

Deze knelpunten zouden mogelijk kunnen worden opgelost door toepassing van de oplossingsrichtingen in hoofdstuk 4. De oplossingsrichtingen kunnen zowel chemisch als biologisch zijn.

2 Fosfaat

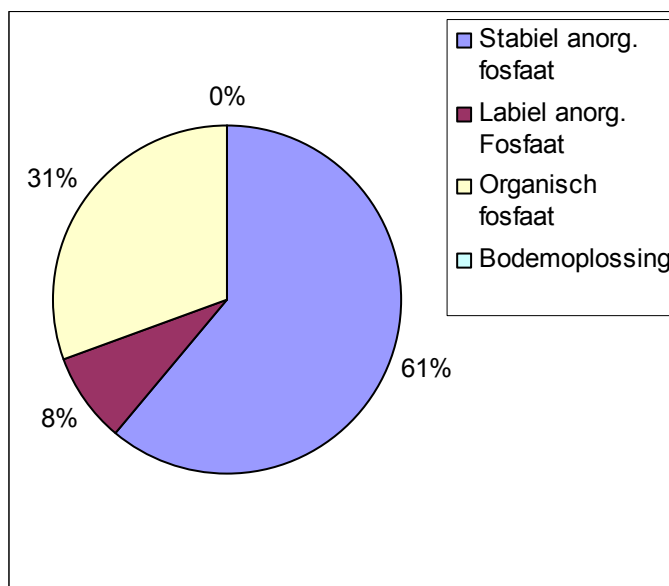
2.1 Fosfaat in de bodem

In Nederlandse landbouwgrond is circa 1500 kilo tot 15 ton fosfaat per hectare aanwezig. Deze is op te delen in:

- een anorganische en organische pool;
- een stabiele pool, een labiele pool en de bodemoplossing.

Fosfaat is in de bodem aanwezig ingebouwd in organische stof en in anorganische vorm. De verhouding C : P van organische stof is in de orde van grootte van circa 100 à 200 : 1. Dit betekent dat 1,25% van de organische stof bestaat uit P_2O_5 . Dus bij een organische stofgehalte van 4% is circa 1250 kg P_2O_5 /ha organisch fosfaat in de bodem aanwezig. Afhankelijk van het organische stofgehalte is 20 tot 90% van de totale fosfaatvoorraad in de bodem organisch ingebouwd. (Dekker & Postma, 2008).

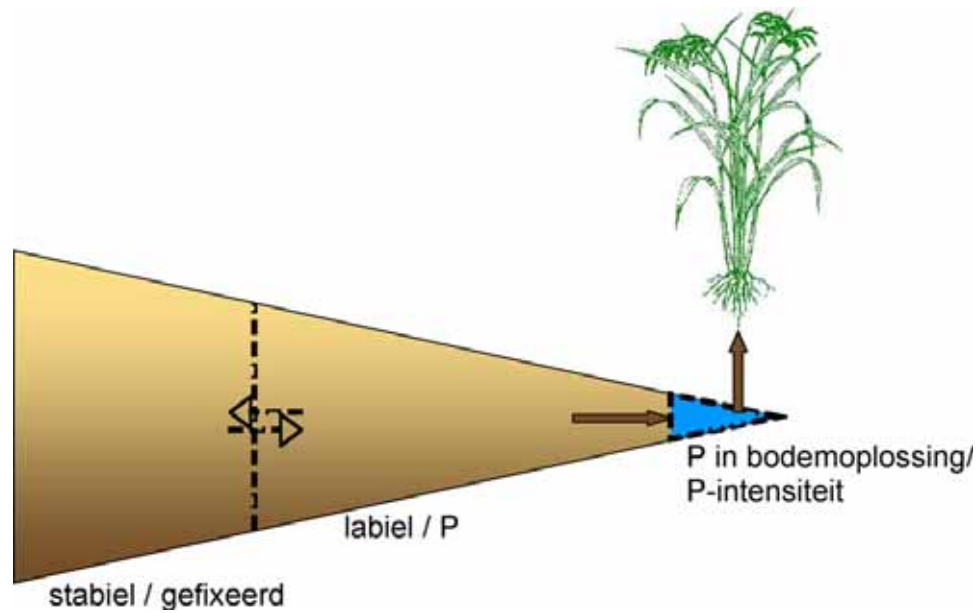
In de anorganische pool zijn een groot aantal fosfaathoudende mineralen aanwezig, waarvan de oplosbaarheid sterk uiteenloopt. Deze zijn op te delen in een stabiele en een labiele pool. De stabiele pool is groter dan de labiele pool. (figuur 2.2).



Figuur 2.1 Schematische weergave van de verdeling van fosfaatverbindingen in de bodem (Wild, 1988).

Gewassen nemen fosfor op uit de bodemoplossing. De belangrijkste vorm, waarin fosfor uit de bodemoplossing wordt opgenomen, is orthofosfaat (HPO_4^- en $H_2PO_4^{2-}$). In de bodemoplossing is slechts 0,04 tot 0,6 mg P_2O_5 /l in deze beschikbare vorm voor het gewas aanwezig. Per bouwvoor van 25 cm is dit ongeveer 0,1 tot 1,5 kg/ha. Het niet opgeloste fosfaat kan worden opgedeeld in een stabiele en een labiele pool. Het labiele fosfaat is in evenwicht met de bodemoplossing en kan vrij snel fosfor naleveren. De stabiele pool is slecht oplosbaar en de bijdrage van deze pool aan de fosfaatvoorziening van het gewas is dan ook gering (Dekker & Postma, 2008)

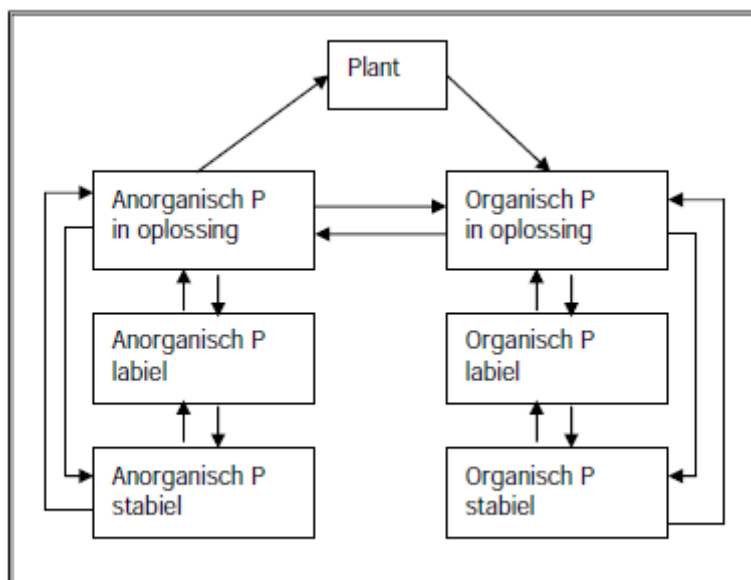
Een voorbeeld hoe de voorraad fosfaat is verdeeld over de verschillende pools is weergegeven in figuur 2.1. (DLV Plant et al., 2011)



Figuur 2.2 Schematische weergave van situaties van direct beschikbaar fosfaat (blauw plus verticale pijl) en de nalevering door de bodem (horizontale pijl). (Bussink et al., 2008)

2.2 Bodemprocessen

In figuur 2.3 is weergegeven hoe de verschillende pools in elkaar overlopen.



Figuur 2.3 Schematisch overzicht van fosfaatverbindingen en processen in de bodem. Pijlen geven mogelijke omzettingen weer. (Dekker & Postma, 2008)

In §2.1 is aangegeven dat per bouwvoor van 25 cm ongeveer 0,1 tot 1,5 kg/ha opgelost fosfaat aanwezig is, terwijl circa 50-100 kg P_2O_5 /ha door het gewas wordt opgenomen. Dit betekent dat de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing jaarlijks honderden keren moeten worden aangevuld. Deze aanvulling vindt plaats door 3 typen bodemprocessen:

1. Oplossen en neerslaan van mineralen
2. Adsorptie en desorptie
3. Mineralisatie en immobilisatie

Oplossen en neerslaan

Bij een lage bodem-pH worden slecht oplosbare Fe- en Al-fosfaten gevormd. Bij een hoge bodem-pH worden vooral slecht oplosbare calciumfosfaten gevormd. Deze dragen vrijwel niet bij aan de fosfaatvoorziening van het gewas omdat ze gefixeerd zijn en dus aanwezig in de stabiele pool. Bij een neutrale pH worden redelijk oplosbare Ca- en Mg-fosfaten gevormd.

Adsorptie en desorptie

Bij het naleveren van fosfaat aan de bodemoplossing spelen desorptieprocessen een belangrijke rol. Fosfaat kan worden geadsorbeerd aan positief geladen deeltjes/oppervlakten in de bodem. Deze binding is elektrostatisch en niet sterk, zodat dit fosfaat weer beschikbaar kan komen in oplossing (desorptie).

Bij een relatief lage bodem-pH adsorbeert fosfaat voornamelijk aan Fe- en Al-hydroxiden. Deze complexen kunnen tevens fosfaat adsorberen en weer vrijgeven.

Op kleigronden kan fosfaat adsorberen aan de randen van kleideeltjes. Bij een hoge pH speelt adsorptie en desorptie van fosfaat aan koolzure kalk een rol maar deze is minder

groot dan die aan kleiplaatjes. Op zandgronden met een lage pH kunnen in de bodem nogal veel organische Fe- en Al-complexen voorkomen. Deze complexen kunnen tevens fosfaat adsorberen en weer vrijgeven.

Mineralisatie en immobilisatie

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

Inositol fosfaten zijn moeilijker afbreekbaar dan nucleïnezuren en fosfolipiden. Bij de afbraak van bodemorganische stof met een C : P verhouding van circa 100 komt fosfaat vrij in de bodemoplossing.

Nutriënten verplaatsen zich op 2 manieren door de bodem:

- Diffusie
Diffusie is het transport van een hoge concentratie naar een lage concentratie. Door fosfaatopname bij de wortels ontstaat een concentratieverschil tussen de bodemoplossing in de rhizosfeer en de bodemoplossing buiten de wortelzone.
- Massastroming/Waterbeweging in de bodem
Door verdamping van het gewas ontstaat een waterbeweging in de bodem. Nutriënten verplaatsen zich door de bodem met deze waterbeweging en neerslag
- Interceptie
Interceptie is opname van fosfor door wortelgroei naar bodemfosfaat toe.

Transport van fosfaat naar de plantenwortel

Fosfaat komt bij de plantenwortel door 3 processen: diffusie, massastroming en interceptie door het gewas.

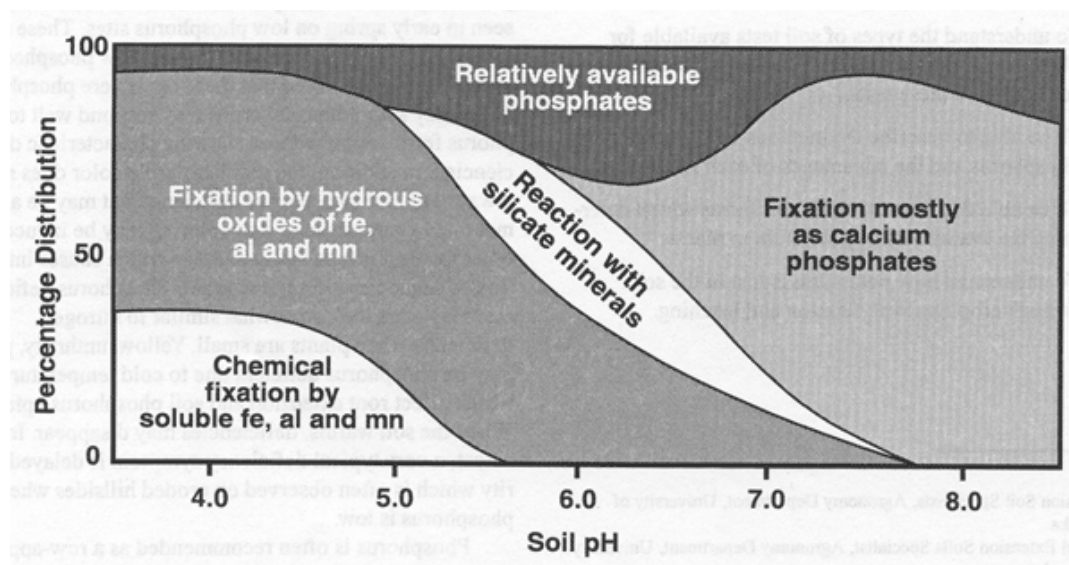
Fosfaat is vrij immobiel in de bodem. Meer dan 92% van de opgenomen fosfor komt bij de wortel door diffusie van fosfor in de bodem. Dit transportproces is afhankelijk van de adsorptie van fosfaat in de bodem, vochtgehalte en structuur/textuur van de bodem. Doordat de fosforconcentratie in de bodemoplossing laag is, zal weinig fosfaat zich verplaatsen door waterbeweging in de bodem. Circa 5% van de opgenomen fosfaat komt bij de wortel door massastroming.

Interceptie is de minst belangrijke factor waardoor plantenwortels met fosfaat in de bodem in aanraking komen (Dekker & Postma, 2008).

2.3 Fosfaatbeschikbaarheid in relatie tot de bodem-pH

Een overzichtelijke weergave van de verdeling van fosfaat in de bodem en de fosfaatbeschikbaarheid in relatie tot de bodem-pH is weergegeven in de Plant and Soil E-library (<http://plantandsoil.unl.edu>)

Uit figuur 2.4 blijkt dat de relatieve hoeveelheid beschikbaar fosfaat afhankelijk is van de bodem-pH. De hoogste fosfaatbeschikbaarheid is in het pH-traject van 5,5-6,5.



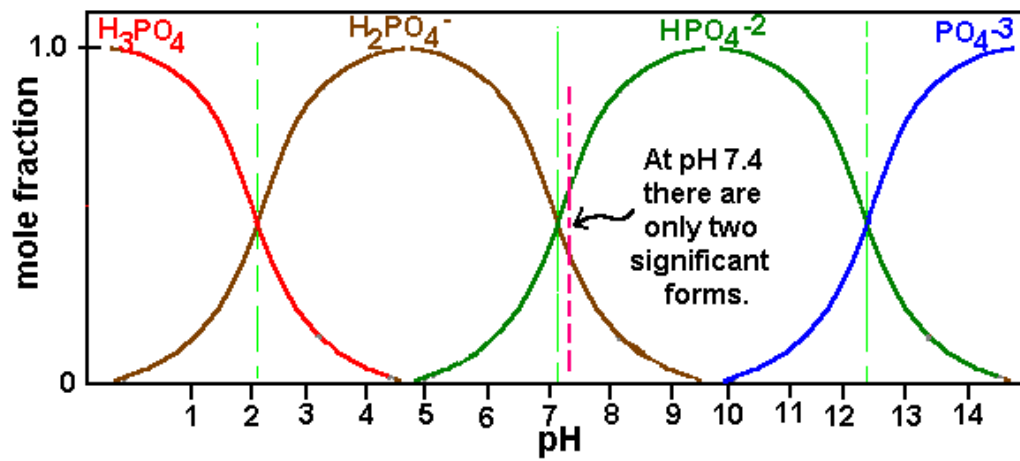
Figuur 2.4 Verdeling van de aanwezige fosfaten over de verschillende vormen in relatie tot de pH.

Op zure zandgronden wordt fosfaat gefixeerd aan ijzer en aluminium. Op deze gronden is dan ook het advies te bekijken tot aan de streef-pH (pH 5 à 6) afhankelijk van organisch stofgehalte en bouwplan.

In het pH-traject van 5 tot 6,5 spelen de adsorptie- en desorptieprocessen van fosfaat aan oxiden in de bodem een grote rol in de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing.

Op kalkrijke kleigronden wordt fosfaat sterk gefixeerd aan calcium en koolzure kalk. Deze mate van fixatie neemt toe in het traject van 6,5 tot 7,5.

De belangrijkste vorm waarin fosfaat in de bodemoplossing is, is orthofosfaat (HPO_4^{2-} en H_2PO_4^-). De verhouding tussen beide is pH-afhankelijk (figuur 2.5), bron: Planten nemen makkelijker eenwaardig geladen ionen op dan meerwaardig geladen ionen. Op neutrale en zure bodems is fosfor aanwezig als eenwaardig geladen diwaterstoffosfaat en op kalkrijke bodems met een hoge pH als tweewaardig geladen monowaterstoffosfaat (Hinsinger, 2001).



Figuur 2.5 Verhouding van orthofosfaatvormen in de bodemoplossing (Hinsinger, 2001).

2.4 Fosfaattoestand in de Nederlandse bodem

De traditionele methode om de fosfaattoestand van een akkerperceel vast te stellen is het Pw-getal. De waardering van het Pw-getal is weergegeven in tabel 2.1. Het fosfaatadvies is opgesplitst in 6 klassen. Het beleid deelt de akkerbouwgronden in het systeem met de flexibele fosfaatgebruiksnormen in 3 klassen. De extra reparatie die geldt voor fosfaatarme en –fixerende gronden is hierin niet opgenomen.

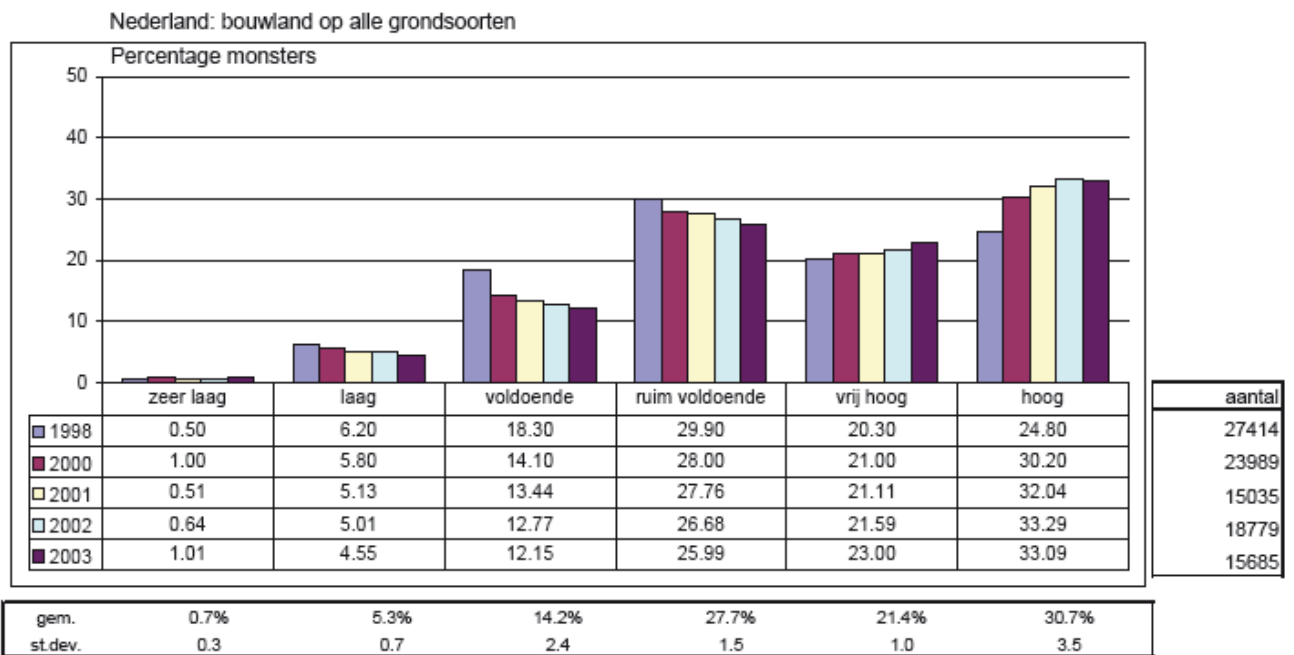
Tabel 2.1 Waardering van de fosfaattoestand van de bodem (Dijk van & Geel van, 2011) en klassen fosfaattoestand voor gebruiksnorm fosfaat (Willems et al., 2007)

Pw-klasse	Waardering adviesbasis	Waardering beleid
<11	Zeer laag	
11-20	Laag	Laag
21-30	Voldoende	
31-35	Ruim voldoende	
36-45		Neutraal
46-55	Vrij hoog	
56-60		Hoog
>60		

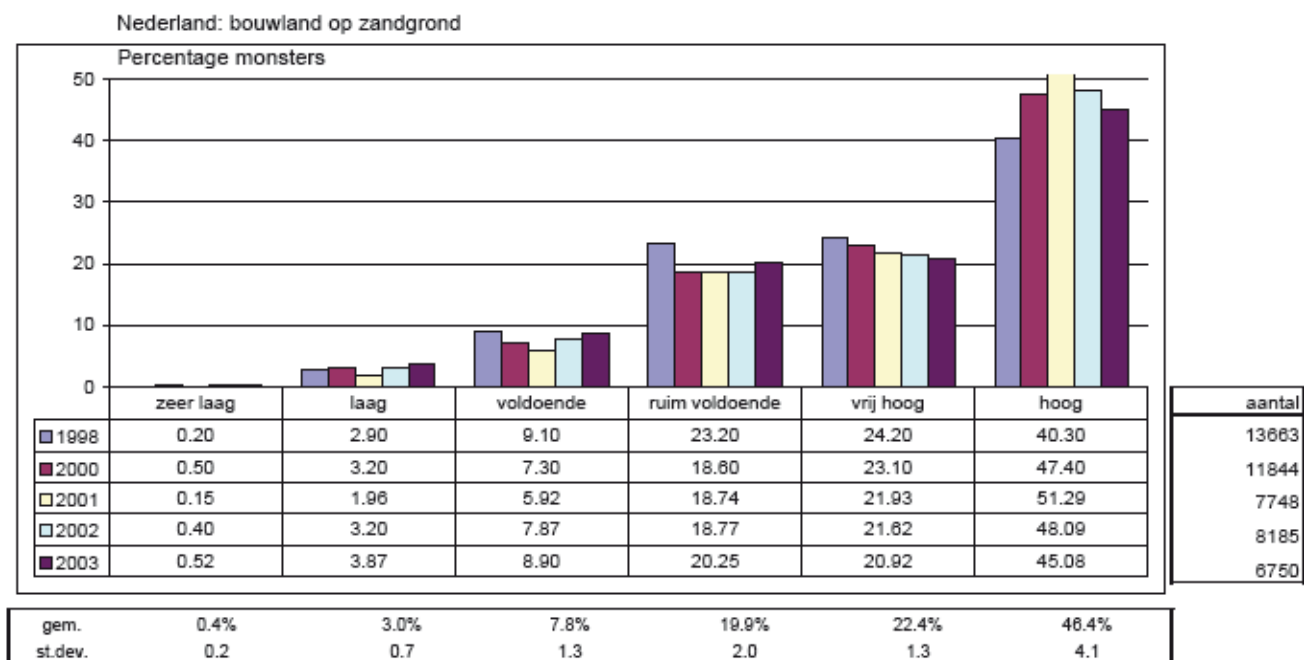
Schoumans (2007) heeft trends in de fosfaattoestand van akkerbouwgronden in de periode 1998-2003 geanalyseerd. De gebruikte dataset van Pw-getallen was afkomstig van BLGG. In de figuren 2.6, 2.7 en 2.8 is de verdeling van het Pw-getal over de fosfaatklassen weergegeven voor totale oppervlakte akkerbouwgrond en opgesplitst naar zand- en kleigrond.

Uit figuur 2.6 blijkt dat vanaf 2000 circa 20% van de akkerbouwpercelen in de Pw-klasse <31 valt, 50% in de Pw-klasse 31-60 en 30% in de klasse >60.

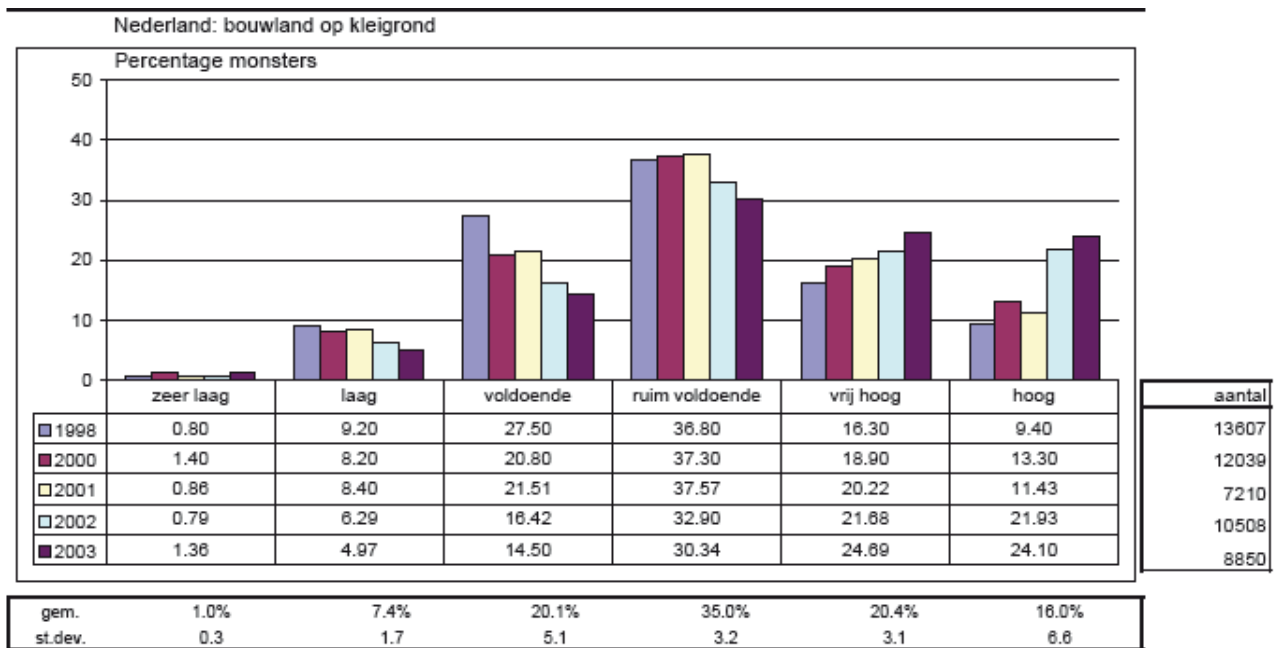
Bij de opsplitsing naar klei en zandgrond valt op dat bij zandgrond meer percelen in de hogere fosfaatklassen vallen. Op zandgrond viel circa 10% van de percelen in de klasse <31, 40% in de klasse 31-60 en 50% in de klasse >60, terwijl op kleigrond deze verdeling op 20-30%, 50-60%, 10-20% lag.



Figuur 2.6 Verdeling fosfaattoestand Nederlandse akkerbouwgronden (Schoumans, 2007).



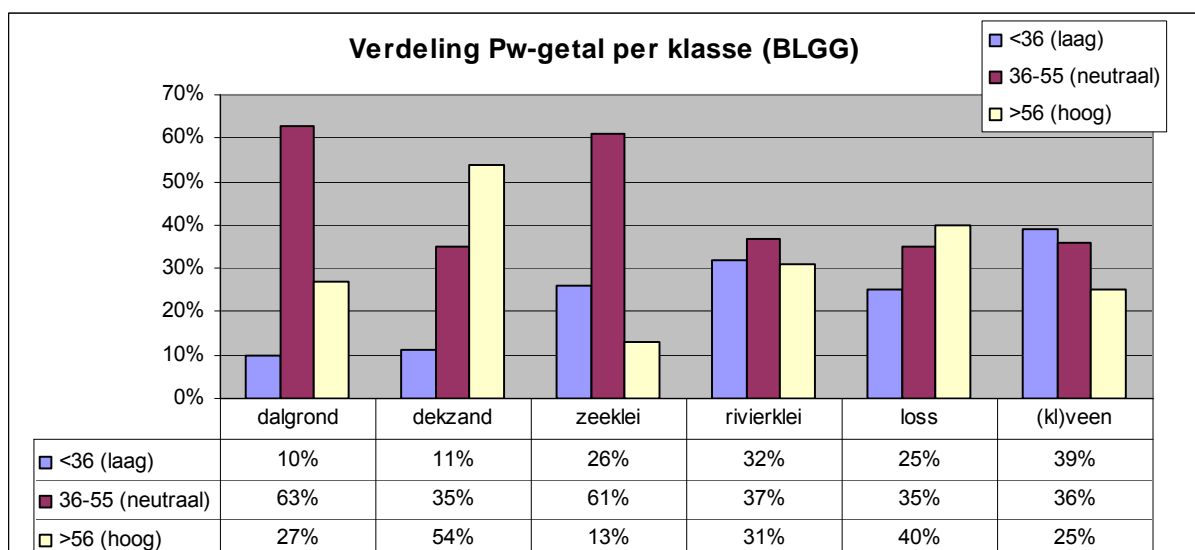
Figuur 2.7 Verdeling fosfaattoestand Nederlandse akkerbouwgronden op zand (Schoumans, 2007).



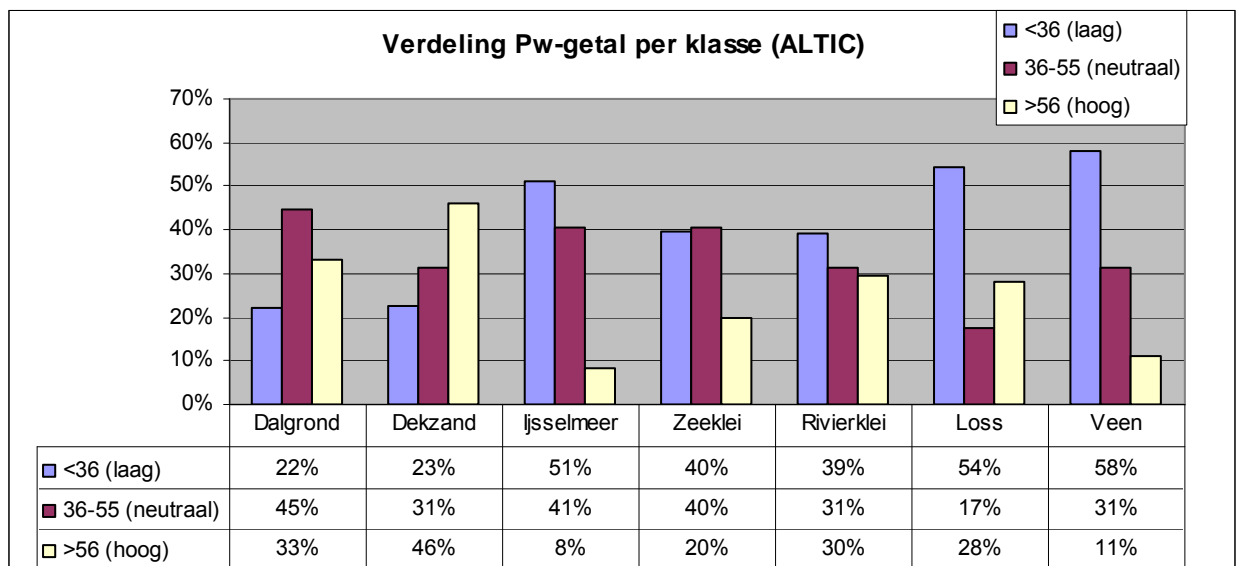
Figuur 2.8 Verdeling fosfaattoestand Nederlandse akkerbouwgronden op klei (Schoumans, 2007).

In de figuren 2.9 en 2.10 is de verdeling van de Pw-getallen van de laboratoria BLGG en ALTIC weergegeven. De dataset Pw-getallen van ALTIC is uit de periode 2007-2010 en de dataset van BLGG is van augustus 2009 tot augustus 2010.

Vanaf 2010 is het stelsel met flexibele gebruiksnormen ingevoerd. Om gebruik te maken van een hogere fosfaatgebruiksnorm moet een teler aantonen dat de Pw van het perceel in de klasse neutraal of laag ligt. Hierdoor zal een teler met percelen in de klasse laag of neutraal sneller geneigd zijn het Pw-getal te laten analyseren. Dit heeft mogelijk invloed op de verdeling van het Pw-getal over de verschillende klassen. Het aantal uitkomsten in de klasse laag kan dus overgewaardeerd zijn.



Figuur 2.9 Verdeling fosfaattoestand Nederlandse akkerbouwgronden per grondsoort (BLGG, 2010)



Figuur 2.10 Verdeling fosfaattoestand Nederlandse akkerbouwgronden per grondsoort (ALTIC, 2007-2010)

Uit figuur 2.9 en 2.10 blijkt dat zowel in de dataset van ALTIC als BLGG het aandeel percelen in de hoge Pw-klasse op zandgrond hoger was dan op kleigrond. Binnen de zandgronden was het aandeel in de klasse hoog op dekzand hoger dan op dalgrond. Een van de oorzaken hiervan is dat het Pw-getal op zuidoostelijke zandgronden sterk verhoogd is door het veelvuldig gebruik van drijfmest in dit intensieve veehouderijgebied. Binnen de akkerbouwpercelen op kleigrond valt op dat op rivierkleibodems meer Pw-getallen in de categorie hoog vallen dan op zeekleigronden. Met name bij de relatief jonge IJsselmeergronden (ALTIC) was het aandeel percelen in de categorie hoog relatief laag.

2.5 Flexibele fosfaatgebruiksnorm

De huidige Nederlandse wetgeving hanteert een systeem met gebruiksnormen voor stikstof en fosfaat. De fosfaatgebruiksnorm zal naar de toekomst toe steeds verder worden aangescherpt. Naar verwachting zal deze gebruiksnorm voor akkerbouwgronden afnemen tot 60 kg P₂O₅ per ha in 2015 (geldt voor zogenaamde fosfaatneutrale gronden). Sinds 2010 is de fosfaatgebruiksnorm gedifferentieerd naar fosfaattoestand. Op basis van de fosfaattoestand zijn de Nederlandse percelen opgedeeld in drie klassen: laag, neutraal en hoog. Daarnaast is er nog de mogelijkheid voor reparatiebemesting bij een Pw lager dan 25.

De flexibele fosfaatgebruiksnorm is weergegeven in tabel 2.2. Een teler kan gebruik maken van een hogere fosfaatgebruiksnorm dan die van klasse hoog door aan te tonen dat het Pw-getal van het perceel lager is dan 55 mg P₂O₅/l. De teler dient hiervoor een analyse te laten uitvoeren door een gecertificeerd laboratorium en de te bemonsteren eenheid te laten vastleggen met GPS-coördinaten.

Voor de classificering van de fosfaattoestand voor de flexibele fosfaatgebruiksnormen berekent BLGG een fictief Pw-getal op basis van het P-AI getal en P-PAE (Ehlert et al., 2006).

Tabel 2.2 Flexibele fosfaatgebruiksnormen (Willems et al, 2007)

Klasse	Jaar			
	2011	2012	2013 – 2014	2015 ¹
Reparatie (<25)	120	120	120	
Laag (<35)	85	85	85	75
Neutraal (36-55)	75	70	65	60
Hoog (>55)	70	65	55	50

¹ Indicatieve norm

De gemiddelde fosfaatafvoer loopt uiteen van 45-50 kg P₂O₅/ha voor akkerbouwbedrijven op zand-/ dalgrond tot 55 kg P₂O₅/ha voor bedrijven op kleigrond (Dijk van, et al, 2007). In 2015 zal op intensieve bedrijven de gebruiksnorm lager zijn dan de fosfaatafvoer vermeerderd met het onvermijdelijke verlies per jaar. In de klasse hoog mag in 2015 waarschijnlijk 50 kg P₂O₅/ha worden toegepast. Dit betekent dat zeker bij een hoge fosfaattoestand en iets minder bij een neutrale fosfaattoestand de fosfaatbehoefte van het gewas steeds meer afhankelijk wordt van de fosfaatvoorziening vanuit de bodemvoorraad.

2.6 Fosfaatbehoefte akkerbouwgewassen in relatie tot de gebruiksnorm

Het officiële bemestingsadvies is opgedeeld in een bodemgericht en een gewasgericht advies. Het gewasgerichte advies is opgedeeld naar gewascategorieën met een verschillende behoefte. Deze indeling is weergegeven in tabel 2.3 (Dijk van & Geel van, 2011). In tabel 2.4 is de fosfaatbehoefte van de verschillende gewasgroepen weergegeven.

Tabel 2.3 Indeling gewasgroepen bij de fosfaatadvisering (Dijk van & Geel van, 2011)

Gewasgroep	Gewassen
0	Andijvie (incl. krulandijvie), augurk (teelt-aan-touw), bleekselderij, Chinese kool, Consumptieraap, paksoi, pastinaak op zand, peen op zand (alle teelten), peterselie (eenmalige en meermalige oogst), sla (bind-, krop-, ijs-, eikenblad-, lolla rossa), snijbiet, spinazie, venkel, witlof op zand
1	Aardappel (consumptie-, zetmeel-, industriële verwerking), augurk (vlakvelds), boon (bruine, stamsla-, snij-, stok-, pronk-, tuin-, veld-) ¹ , erwten (dop-, landbouw), knoflook, koolrabi, knolselderij, mais (snij-, korrel-, suiker-) ² , peul, rammenas, spruitkool, uien (bosui, sjalot, zilverui, plant- en zaaiui), dahlia
2	Suikerbieten, voederbieten, zaadbieten, vlas karwij, raapsteel, radicchio, radijs
3	Klaver, wikken, gerst, witlof, 1- en 2-jarig grasland (2 sneden), peen op klei (alle teelten) pastinaak op klei, witlof op klei, gladiool, hyacint, krokus
4	Granen (behalve gerst), graszaad, koolzaad, aardbei, asperge (wit en groen), bieslook, bloemkool (witte, groene, romanesco), boerenkool, broccoli, courgette, koolraap, kroot, pompoen, prei (alle teelten), rabarber (alle teelten), schorseneer, sluitkool (groene rode, savooie, witte, spits-), bloembolgewassen (behalve dahlia, hyacint en krokus)

¹ Op zandgrond betreft het giften die als rijenbemesting worden toegediend; bij breedwerpig toediening dient 2x zoveel gegeven te worden. Op kleigrond betreft het giften die breedwerpig worden toegediend; bij rijenbemesting kan 75% van de breedwerpig geadviseerde gift worden volstaan.

² Bij rijenbemesting de halve hoeveelheid

Bij aardappelen (gewasgroep 1) is bij Pw-getallen hoger dan 25 een opbrengsteffect van fosfaatbemesting afwezig. In veel veldproeven in aardappelen is geen reactie op fosfaatbemesting waargenomen.

In gewasgroep 0 zijn veel groentegewassen aanwezig. Deze gewassen hebben een ondiep wortelstelsel en een kort teeltseizoen. Hierdoor zijn de P-adviezen in de vollegrondsgroententeelt veel hoger dan die van de fosfaatbehoefte akkerbouwgewassen (gewasgroep 1)

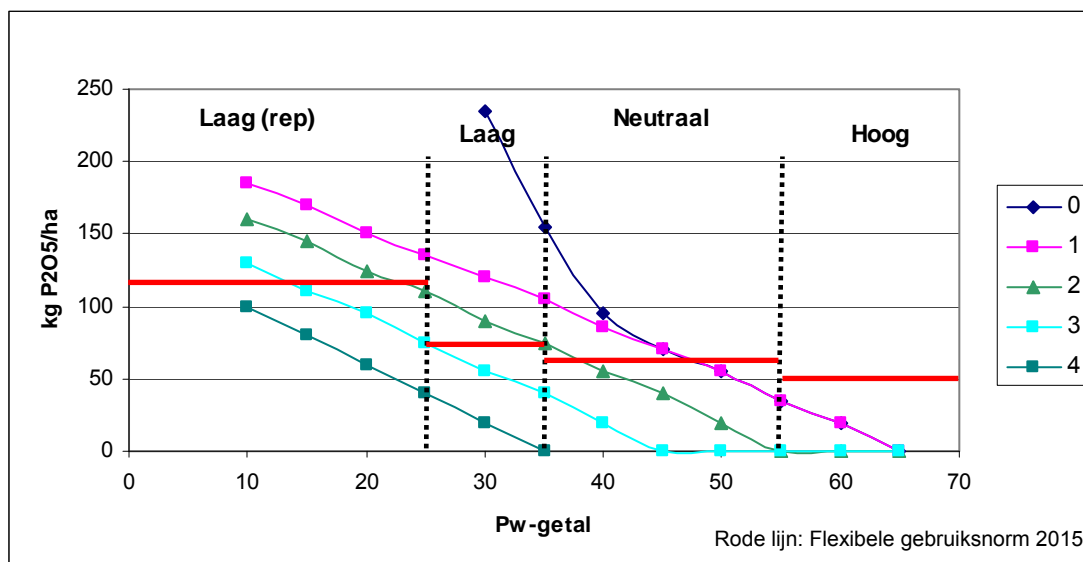
Een knelpunt ontstaat in een situatie waarin de fosfaatvoorziening niet kan voldoen aan de fosfaatbehoefte. In figuur 2.11 is voor de verschillende gewasgroepen de fosfaatbehoefte weergegeven in relatie tot het Pw-getal van de bodem. Ook zijn de huidige verschillende fosfaatgebruiksnormen ingetekend.

Tabel 2.4 Fosfaatbehoefte gewassen adviesbasis (Dijk van & Geel van, 2011)

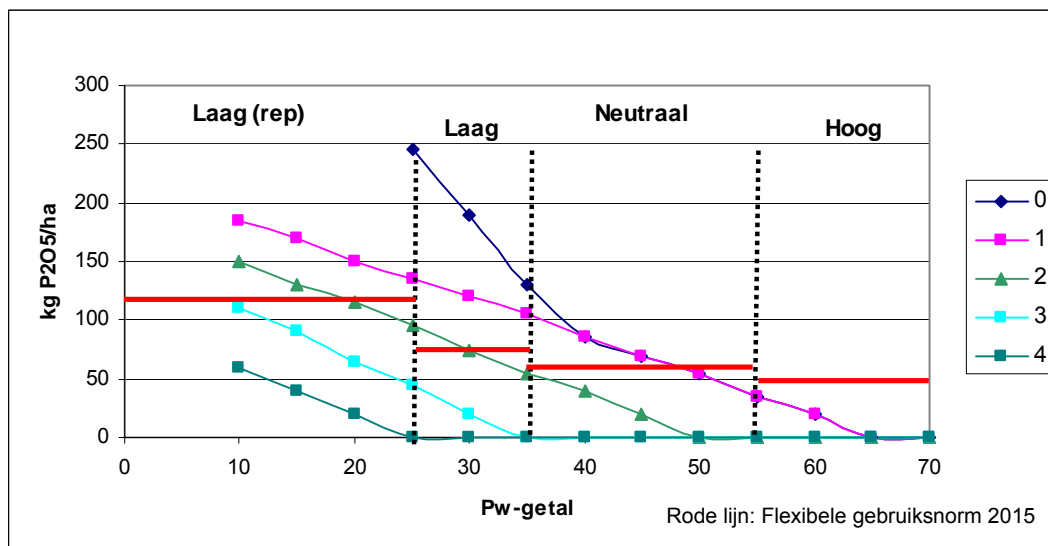
Pw	Dekzand, dalgrond, rivierklei, loss					Zeeklei, zandgrond				
	Gewasgroepen					Gewasgroepen				
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
10	-	185	160	130	100	-	185	150	110	60
15	-	170	145	110	80	-	170	130	90	40
20	-	150	125	95	60	-	150	115	65	20
25	-	135	110	75	40	245	135	95	45	0
30	235	120	90	55	20	190	120	75	20	
35	155	105	75	40	0	130	105	55	0	
40	95	85	55	20		85	85	40		
45	70	70	40	0		70	70	20		
50	55	55	20			55	55	0		
55	35	35	0			35	35			
60	20	20				20	20			
65										

¹ Gift plaatsen d.w.z. ondiep in zaaibed of op plantdiepte toedienen of als rijenbemesting toedienen.?

² Wanneer de meststof wordt geplaatst (bovenin het zaaibed, op plantdiepte of als rijenbemesting) kan worden volstaan met 50-75% van de adviesgift. De besparing is groter naarmate de groeiduur korter, de rijafstand ruimer, de beworteling ondieper, de dagelijkse vraag naar fosfaat en de totale fosfaatopname hoger en de fosfaattoestand lager is.



Figuur 2.11 Relatie tussen Pw getal en de fosfaatbehoefte voor de 5 gewasgroepen op dekzand, dalgrond en Löss en de gebruiksnormen (rode lijn is de indicatieve flexibele gebruiksnorm voor 2015) (Dijk van, et al, 2007).



Figuur 2.12 Relatie tussen Pw getal en de fosfaatbehoefte voor de 5 gewasgroepen op zeelei en zandgrond en de gebruiksnormen (rode lijn is de indicatieve flexibele gebruiksnorm voor 2015) (Dijk van, et al, 2007).

Knelpunten ontstaan wanneer de fosfaatbehoefte hoger is dan de wettelijke toegestane gebruiksnorm. In de figuren 2.11 en 2.12 is als wettelijke gebruiksnorm voor fosfaat de indicatieve norm voor 2015 ingetekend.

Uit figuur 2.11 en 2.12 blijkt dat een knelpunt vooral in de lagere Pw-classes, daar waar de grafieklijn per gewasgroep uitstijgt boven de horizontale rode lijn voor de gebruiksnorm. In de categorie hoog (Pw 55) is voor alle gewasgroepen de behoefte lager dan de norm. In de neutrale klasse is de fosfaatbehoefte van de gewasgroepen 0 en 1 hoger dan de norm bij een Pw lager dan 45. In de lage klasse is de behoefte van gewasgroep 0 veel hoger dan de wettelijk toegestane norm. Ook de behoefte van gewasgroep 1 is hoger dan de gebruiksnorm. Bij Pw < 30 kunnen gewassen uit groep 2 zelfs een knelpunt vormen.

In gewasgroep 0 zijn onder meer sla en peen op zandgrond belangrijke gewassen. In deze gewasgroep zijn vooral veel vollegrondsgroentengewassen ingedeeld. In gewasgroep 1 zijn aardappelen, uien, maïs, bonen en erwten ingedeeld. In gewasgroep 2 zijn suikerbieten en vlas ingedeeld. Gezien landelijk areaal ligt het grootste knelpunt bij de teelt van aardappelen, uien, snijmaïs in de Pw-klasse laag en een deel van neutraal (< 45).

Zandgronden hebben gemiddeld een hoger Pw-getal dan kleigronden. Het aandeel percelen met een hoge fosfaattoestand en dus een lage gebruiksnorm is groter dan op klei. Ondanks dat minder fosfaat kan worden aangevoerd op zandgrond dan op kleigrond, zijn de knelpunten op kleigrond groter. In de klasse laag mag weliswaar meer fosfaat worden aangevoerd, maar is de fosfaatbehoefte van het gewas hoger. Vooral op de jonge IJsselmeergronden is het aantal perceel in de klasse laag relatief hoog.

In tabel 2.5 is de opbrengstreductie weergegeven bij Pw 30 en 45 bij verschillende fosfaatgiften. Deze reductie is opgesteld door PPO-AGV. Met oranje zijn de situaties ingekleurd waarbij opbrengstreductie optreedt. Bij een rode kleur is een knelpunt ontstaan, waarbij opbrengstreductie optreedt en de fosfaatgift hoger is dan de gebruiksnorm.

Tabel 2.5 Indicatieve procentuele opbrengstreductie (fysieke productie) bij gereduceerde fosfaatbemesting (Dekker & Postma, 2008).

Gewasgroep	P-toestand	Fosfaatgift (kg/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. wintergerst)	Pw 30	0	0	0	0	0
	Pw 45	0	0	0	0	0

Uit tabel 2.5 blijkt dat knelpunten in de Pw-klasse laag (Pw <36) groter zijn dan die in de neutrale klasse 36-55. In de hoge klasse zijn geen knelpunten aanwezig. De knelpunten zijn voornamelijk aanwezig in de gewasgroepen 0 en 1. Ook in de gewasklasse 2 in de lage Pw-klassen doen knelpunten zich voor in de lage Pw-klasse.

Bij de teelt van gewassen in gewasgroepen 3 en 4 en bij de teelt op bodems met een neutrale/hoge fosfaattoestand fosfaattoestand van Pw 45 of hoger is de noodzaak om de fosfaatvoorraad in de bodem te gaan benutten niet nodig en misschien zelfs ongewenst. Bij opname door het gewas kan het fosfaatgehalte in het af te voeren oogstproduct toenemen. Deze luxe-consumptie leidt tot een hogere fosfaatafvoer terwijl de opbrengst niet is toegenomen.

Het mobiliseren van fosfaat in de bodem zonder dat het gewas dit fosfaat opneemt, kan resulteren in een verhoogd fosfaatverlies naar diepere grondlagen. Hierdoor neemt de kans op fosfaatverliezen door uitspoeling toe.

3 Beschikbaarheid minerale fosfaatmeststoffen in de toekomst

Wereldwijd wordt jaarlijks circa 48 Mt P_2O_5 per jaar gewonnen (Smit et al., 2009). Dit mineraal fosfaat is afkomstig uit mijnen en dan met name uit de Verenigde Staten, Rusland, China en Marokko.

In figuur 2.3 is de economisch winbare rotsfosfaat uit de fosfaatmijnen weergegeven. Het fosfaatgehalte in rotsfosfaat is gemiddeld zo'n 30% P_2O_5 . Totaal in de wereld is 16.500 Mt fosfaat aanwezig in de mijnen waarvan op dit moment 6.000 Mt economisch winbaar is. Indien de vraag naar fosfaat niet zal toenemen zou de economisch winbare voorraad na zo'n 125 jaar op zijn.



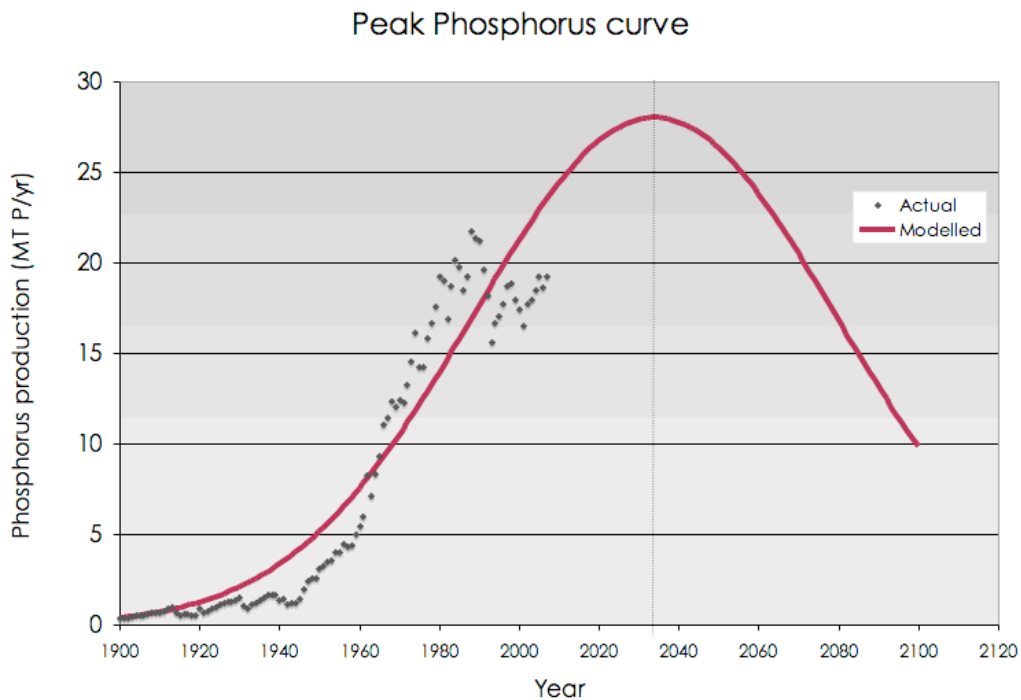
Figuur 3.1 Fosfaatreserves in de wereld, gebaseerd op data US Geological Survey 2008, naar huidige maatstaven economisch winbare voorraden (www.fosfaatrecycling.nl).

Van de 48 Mt mondiaal gewonnen fosfaat wordt circa 80% ofwel 43 Mt [rekenkundig klopt dit niet] per jaar ingezet als meststof in de landbouw (Haes, et al., 2009). Hiervan wordt 30% ingezet in China, 15% in India, 11% in de V.S. en 7% in de E.U. In Nederland wordt jaarlijks zo'n 30.000 ton aan mineraal P_2O_5 geïmporteerd en ingezet als meststof in de landbouw. Omdat China, de V.S. en Rusland grotendeels het gewonnen fosfaat zelf gebruiken, is de E.U. veelal afhankelijk van de fosfaatproductie in Marokko en de West-Sahara.

Door de toename van de wereldbevolking, de toenemende vleesconsumptie en de teelt van energiegewassen neemt de vraag naar fosfaat wereldwijd toe. Cordell et al., 2009 geeft aan dat de economisch winbare fosfaatvoorraad over 75 jaar is uitgeput en de totale fosfaatvoorraad na 150 jaar (Haes de, et al., 2009).

Vanaf 2030 zal de fosfaatproductie naar verwachting afnemen omdat het aanwezige fosfaat steeds moeilijker te winnen valt.

Dit zal leiden tot sterke prijsstijgingen van kunstmestfosfaat voor de landbouw en het gebruik ervan zal hierdoor sterk dalen.



Figuur 3.2. De verwachte ontwikkeling van de wereldfosfaatproductie, aansluitend bij de gemeten productie t/m 2006. Hypothetische “Peak Phosphorus Theory” van Cordell et al, 2009.

De Nederlandse akkerbouw zal dus vanaf circa 2030 te maken kunnen krijgen met sterk stijgende prijzen van minerale fosfaatmeststoffen. In de verdere toekomst zal de beschikbaarheid van fosfaatmeststoffen beperkt zijn.

Ook het fosfaatgehalte in veevoer is dalende en zal verder dalen in de toekomst. Hierdoor zal het fosfaatgehalte in drijfmest in de toekomst dalen. Door de te verwachten daling van de aanvoer van fosfaat met meststoffen op Nederlandse akkerbouwgronden zal het benutten van de bodemvoorraad fosfaat in de toekomst dan ook steeds belangrijker gaan worden.

4 Resultaten

Bodemvruchtbaarheid is het vermogen van de bodem om een plant van voedingsstoffen te voorzien. De bodemvruchtbaarheid wordt bepaald door de chemische, fysische en biologische eigenschappen. Voor wat betreft de fysische component geldt dat de structuur van de bodem goed moet zijn voor een goede nutriëntenvoorziening van het gewas. Dit geldt ook voor fosfaat.

In deze deskstudie is van de onderstaande chemische en biologische opties onderzocht of deze de benutting van de bodemvoorraad fosfaat verhogen:

- Chemisch
 - Nieuwe bodemanalysemethoden
 - Verzurende meststoffen op kalkrijke bodems
 - Bekalking op zure zand- en veengrond
 - Startermeststoffen
 - Silicium
 - Humuszuren
- Biologisch
 - Uitmijning van de bodemvoorraad fosfaat
 - Gewassen met een efficiënte fosfaatbenutting
 - Fosfaatoplossende bacteriën en schimmels
 - Mycorrhiza

4.1 Chemische oplossingsrichtingen

4.1.1 Bodemanalyses

Van de fosfaatlevering vanuit de bodem kan optimaal gebruik worden gemaakt door de bemesting af te stemmen op de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem. Het instrument om de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem vast te stellen is door middel van bodemanalyse. Er zijn meerdere bodemanalyses op de markt, die ieder een eigen deel van de fosfaatvoorraad in de bodem meten. Het gemeten fosfaat varieert van de actuele beschikbaarheid tot de totale fosfaatvoorraad in de bodem. De analyses zijn op te delen in analyses van de fosfaatcapaciteit en van de fosfaatintensiteit van de bodem op basis van de sterkte van de extractiemethode.

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. (Dekker & Postma, 2008).

Beschreven bodemanalyses

In Nederland worden de volgende beschreven analysemethoden gebruikt:

- P-totaal
- P-Olsen
- P-AI
- Pw-getal
- P-0,01 M CaCl₂
- P (1 op 1,5 extractie)

P-totaal

Door destructie van de bodemstructuren kan de totale fosfaatvoorraad van de bodem worden opgelost en gemeten. Een destructiemethode voor het bepalen van totaal fosfaat in de bodem is door het koken met zwavelzuur (Muir, 1952). De bepaling van de P-totaal wordt voor landbouwkundige doeleinden vrijwel niet toegepast.

P-Olsen

P-Olsen is een methode voor het bepalen van de fosfaatcapaciteit van de bodem. De P-Olsen wordt gemeten na extractie met 0,5 M natriumbicarbonaat (NaHCO₃) bij een pH van 8,5. (Olsen et al. 1954). Deze extractie is geschikt voor kalkrijke, basische en neutrale bodems. Voor zure zandgronden (pH<5,5) is deze methode minder geschikt. (Elrashidi, 2004). De P-Olsen methode wordt in Nederland vrijwel niet gebruikt.

P-AI

Het P-AI getal is net als P-Olsen een maat voor de fosfaatcapaciteit van de bodem; de fosfaat in de bodem die over een langere periode beschikbaar kan komen in het gewas (NMI Reader). P-Olsen geeft een hogere/lagere uitslag dan P-AI.

De P-AI bepaling is een 1:20 (w/w) extractie met 0,1 M ammoniumlactaat en 0,2 M azijnzuur bij een gebufferde pH van 3,75 (Vierveijzer, 1979). Er wordt intensief en lang geschud. Hierdoor wordt een groot deel van de fosfaatvoorraad in de bodem in oplossing getrokken en gemeten.

De officiële fosfaatadvisering voor grasland (adviesbasis bemesting grasland en voedergrassen) is op deze analyse gebaseerd. De P-AI methode is een robuuste methode. Het P-AI getal is vrij stabiel in de tijd en tussen jaren.

Het advies op grasland is om eens in de 4 jaar het P-Al getal te laten bepalen. In het huidige systeem met flexibele gebruiksnormen is de fosfaatgebruiksnorm op grasland afhankelijk van het P-Al getal. Een voldoende P-Al getal op klei en zand is 30 mg P_2O_5 /100 g droge grond. Dit komt ongeveer overeen met 1200 kg P_2O_5 in een bouwvoor (0-30 cm).

Pw-getal

Het Pw-getal is een combinatie van de capaciteit en de fosfaatintensiteit van de bodem. Het Pw-getal is een 1:60 w/w extractie met water (Vierveijzer, 1979). Bij kamertemperatuur wordt 1 uur geschud en het geëxtraheerde fosfaat wordt gemeten. Het Pw-getal is vrij stabiel in de tijd en weinig afhankelijk van weersinvloeden. Deze methode is minder robuust dan de P-Al methode..

Het probleem voor de bepaling van Pw voor laboratoria is dat reproduceerbaarheid van de analyse van het Pw-getal niet groot is. Bij heranalyse van hetzelfde monster kan de spreiding in Pw-getal tussen beide analyses relatief groot zijn.

Het Pw-getal wordt gebruikt voor de fosfaatadvisering op bouwland (adviesbasis akkerbouw en vollegroondsgroenten). In het huidige systeem met flexibele gebruiksnormen is de fosfaatgebruiksnorm op bouwland afhankelijk van het Pw-getal.

Een voldoende Pw-getal van 25 mg P_2O_5 /l grond komt overeen met 75 kg P_2O_5 /ha.

P-0,01 M $CaCl_2$

De in Duitsland veel gebruikte bodemanalyse is de $CaCl_2$ -methode. De P- $CaCl_2$ is een indicatie voor de fosfaatintensiteit van de bodem. De fosfaatbeschikbaarheid in de bodem wordt gemeten na extractie met 0,01 M $CaCl_2$ (Houba et al., 2000). De hoeveelheid fosfaat die met deze methode wordt geëxtraheerd, is in orde van grootte van 10-20 kg /ha Bij een voldoende gewaardeerd P- $CaCl_2$ wordt 10 kg P_2O_5 /ha gemeten.

Bij de $CaCl_2$ -methode kunnen meer nutriënten met 1 methode worden bepaald. Vanwege de arbeidstechnische voordelen van deze analyse zijn verschillende laboratoria in Nederland (BLGG, ALTIC, Lab ZVI en Koch) omgeschakeld van de traditionele algemeen bouwland methode naar de $CaCl_2$ -methode.

P (1 op 1,5 analyses)

In de glastuinbouw wordt fosfaat gemeten in een 1 op 1,5 extractie met water. De hoeveelheid fosfaat die wordt gemeten is grotendeels de opgeloste fosfaat in het substraatvocht. Deze methode wordt niet gebruikt bij open teelten.

Opmerking

De traditionele fosfaatbepalingen in de bodem (P-Olsen, P-Al getal en Pw-getal) meten een groot deel van fosfaatvoorraad in de bodem. De resultaten van deze analyses variëren weinig in het seizoen en tussen jaren, indien geen fosfaatbemesting is uitgevoerd.

Vanwege de robuustheid van de traditionele bodemanalyses lijken dit type bodemanalyses zijn deze fosfaatanalyses geschikt voor bemestingsadviezen op bouwplanniveau en minder geschikt voor fine-tuning van de fosfaatbeschikbaarheid.

De hoeveelheid fosfaat die met de calciumchloride methode wordt gemeten, ligt meer in de orde van grootte van de werkelijke fosfaatbeschikbaarheid en de fosfaatnalevering vanuit de bodem op korte termijn.

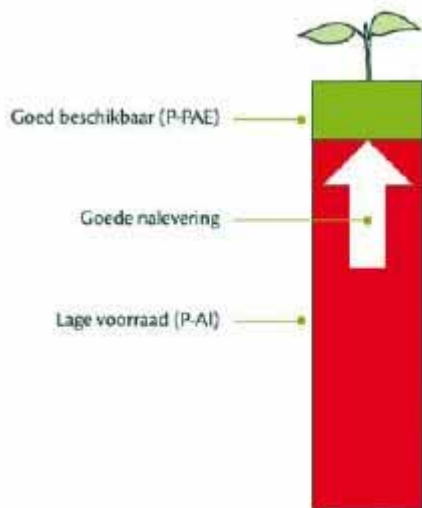
Laboratorium eigen methoden

Tegenwoordig worden in Nederland door veel laboratoria eigen methoden voor fosfaatbepalingen gebruikt. Zo zijn er:

- P-PAE
- P-Spurway
- P-Kinsey (Van Cingel methode)
- P-Koch

P-PAE (BLGG)

BLGG heeft sinds 2004 de PAE-methode geïntroduceerd. De PAE-methode is een combinatie van een P-AI bodemanalyse met een P-CaCl₂ extractie. De fosfaatcapaciteit in de bodem wordt bepaald met de P-AI analyse en de fosfaatintensiteit in de bodem wordt gemeten met de P-CaCl₂. Het advies is gebaseerd op de actuele beschikbaarheid van fosfaat in de bodem (P-PAE), de fosfaatvoorraad (P-AI) en de berekende nalevering. (bron: www.blgg.nl)



Figuur 4.1 Schematische weergave fosfaatvoorziening van het gewas door BLGG

P-Spurway (ALTIC b.v.)

De fosfaatbeschikbaarheid in de bodem van landbouwgrond is pH gerelateerd.

Een plantenwortel heeft de capaciteit de beschikbaarheid van nutriënten in de directe wortelomgeving te verhogen door het uitscheiden van organische wortelzuren (exudaten).

De Spurway-bodemanalyse is een extractie met een licht organisch zuur. Spurway probeert door in het laboratorium het wortelmilieu na te bootsen een nauwkeurige inschatting te maken van de actuele fosfaatbeschikbaarheid voor het gewas. Spurway is net als P-PAE een maat voor de fosfaatintensiteit van de bodem. Bij een voldoende P-Spurway wordt circa 20 kg P₂O₅/ha in de bouwvoor gemeten.

Bij de Spurway plus methode wordt het fosfaatadvies gegeven op basis van de P-Spurway (intensiteit) en het Pw-getal (capaciteit en intensiteit). (Bron: ALTIC)

P (Kinsey Laboratories, Eltjo van Cingel)

In Nederland is tegenwoordig veel aandacht voor de bodemanalyse van Kinsey Laboratories. Deze methode wordt in Nederland geïntroduceerd door Eltjo van Cingel.

De extractiemethode voor fosfaat die wordt gebruikt is de P-Olsen.

Het advies dat bij deze bodemanalyse wordt gegeven is op basis van de Albrecht-theorie. Volgens Albrecht, een Duitse landbouwkundige uit de vorige eeuw, produceert een bodem optimaal als de bodem in balans is.

Neil Kinsey heeft deze theorie uitgewerkt in een advies. Dit advies gaat sterk in op de onderlinge verhoudingen van nutriënten in de bodem (bodem-in-balans methode).

P-Koch

Het Koch laboratorium in Deventer geeft een fosfaatadvies gebaseerd op P-CaCl₂, het P-Al getal en de P-totaal.

Op basis van organisch stofgehalte wordt na de analyse het aandeel organisch fosfaat en het anorganisch fosfaat berekend.

Het gegeven fosfaatadvies is tevens afhankelijk van de actieve Mn, Fe, Zn, Al-beschikbaarheid; elementen die fosfaat kunnen vastleggen (fixeren). Bij het uitgebreide bodemanalysepakket wordt tevens rekening gehouden met een microbiologische bepaling van het bodemleven.

Opmerking

Met de traditionele methodieken van bepaling van de fosfaattoestand werd een groot deel van de fosfaatvoorraad in de bodem (capaciteit) vastgesteld. Bij de nieuwe laboratorium eigen methoden wordt meer de actuele fosfaatbeschikbaarheid en de directe nalevering van fosfaat gemeten. De nieuwe methoden maken gebruik van extractiemethoden die meer inzicht geven in de fosfaatintensiteit in de bodem. Meestal wordt nog een combinatie gemaakt met de fosfaatcapaciteit van de bodem gemeten met P-Al, zodat het advies wordt afgestemd op de gemeten fosfaatbeschikbaarheid in combinatie met de fosfaatvoorraad in de bodem.

De fosfaatcapaciteit is vrij stabiel en verandert vrijwel niet direct door bemesting en of omstandigheden. De fosfaatintensiteit van de bodem zal veranderen door factoren als temperatuur, vocht en bemesting. De traditionele methodieken voor bodemanalyse van fosfaat zijn hierdoor minder geschikt voor finetuning dan de nieuwe methodieken. De kans dat kleine verschillen in fosfaatbeschikbaarheid door de aangedragen oplossingsrichtingen worden gemeten (door middel van bodemanalyse) is groter bij de intensiteitsanalyses. Geschikte bodemanalyses hiervoor lijken de PAE-methode van BLGG en de Spurway-methode van ALTIC.

Een groot verschil van de nieuwe meetmethoden met de oude methoden is dat naast fosfaat meer nutriënten worden gemeten in een analysemethode. In de algemeen bouwlandmethode werd per nutriënt een andere extractiemethode toegepast. De algemeen bouwlandmethode is dan ook erg bewerkelijk.

Het grote nadeel van de nieuwe laboratorium eigen methoden is dat de wijze van extractie en/of advisering lab eigen is en niet openbaar. Een goede vergelijking tussen de methoden is hierdoor niet te maken. De uitzondering hierop is de P-PAE. BLGG heeft de rekenregels openbaar moeten maken, om in aanmerking te komen voor het aanwijzen van fosfaatarme en -fixerende gronden.

In de in het kader van dit project gehouden workshop zijn de nieuwe analysemethoden besproken. Professor van Riemsdijk (WUR, sectie bodemkwaliteit) stelt dat er op dit

moment nog onvoldoende kennis en analysemethoden zijn om de fosfaatlevering en vastlegging vanuit en in de verschillende pools (figuur 2.3 en 2.4) te analyseren. Een nauwkeurige voorspelling van de fosfaatlevering op basis van bodemanalyses is nog niet te geven. Iedere analysemethode meet haar eigen fractie van fosfaat in de bodem. Het is nog onduidelijk welke analysemethode op de verschillende grondsoorten de nauwkeurigste voorspelling van de fosfaatlevering voor het gewas geeft en leidt tot het nauwkeurigste fosfaatadvies.

In 2010 is in opdracht van het Productschap Akkerbouw een bemestingsonderzoek op 2 locaties opgestart waarin de opbrengst een bouwplan lang gevolgd wordt bij een bemesting op basis van de lab eigen methoden. Dit onderzoek wordt uitgevoerd door SPNA en DLV Plant.

Een samenvatting van de beschreven analysemethoden is weergegeven in tabel 4.1.

Tabel 4.1 Overzicht beschreven analysemethoden en onderverdeling in type analyse (capaciteit/intensiteit) en meetresultaat bij waardering fosfaattoestand voldoende

methode	extractie met	capaciteit	intensiteit	uitslag bij voldoende	
				meetresultaat	kg P ₂ O ₅ /ha bij 30 cm bouwvoor
P-totaal (destructie)	Zwavelzuur	x		?	
P-Olsen	0,5 M NaHCO ₃	x		200 kg P ₂ O ₅ /ha	
P-Al	Ammoniumlactaat	x		30 mg/100 g grond	1200
Pw	Water 1 op 60	x	x	25 mg/l grond	75
P-CaCl ₂	0,01 M CaCl ₂		x	Zie P-PAE	
P-PAE (P-CaCl ₂ +P-Al)	0,01 M CaCl ₂ Ammoniumlactaat	x	x	1 mg P/kg grond 27 mg P ₂ O ₅ /100 grond	10
P-Spurway	Licht organisch zuur		x	3 mg P/l grond	22,5
P-Koch	Zwavelzuur, Ammoniumlactaat, 0,01 M CaCl ₂	x		4 ton P ₂ O ₅ /ha (20 cm) 45 mg/100 g grond ?	6000
• P-totaal		x			1800
• P-Al			x		?
• P-CaCl ₂					
P-Kinsey	zie P-Olsen	x		zie P-Olsen	200

4.1.2 Verzurende meststoffen op kalkrijke bodems

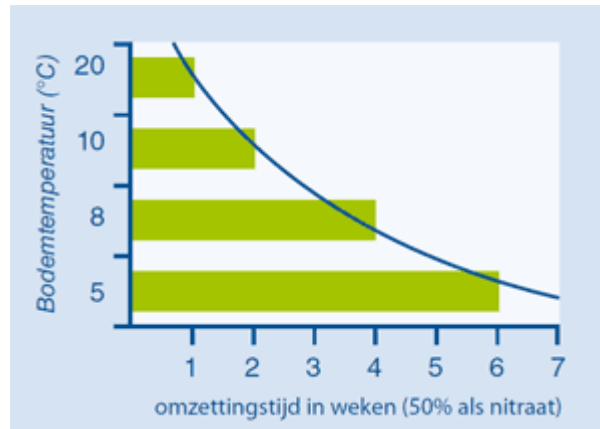
Uit figuur 2.4 blijkt dat de beschikbaarheid van fosfaat pH gerelateerd is. Op bodems met een relatief hoge pH resulteert verlaging van de pH in een hogere fosfaatbeschikbaarheid. Bij opname van ammonium scheidt een plantenwortel H^+ ionen uit om intern niet te verzuren en neutraal te blijven. De directe opname van ammonium zal de pH in de directe wortelomgeving (rhizosfeer) zodoende verlagen (Haynes 1990). Hierdoor neemt de fosfaatbeschikbaarheid dus toe.

In veel potexperimenten is een verhoogde fosfaatopname bij ammoniumvoeding van gewassen gevonden. Voorbeelden hiervan zijn:

In een potexperiment met snijmaïs resulteerde ammoniumbemesting in een verlaging van de bodem-pH (Hoffmann et al., 1994). Ammoniumbemesting resulteerde in een hogere fosfaatopname door het mobiliseren van fosfaat uit de bodem of door een verhoogde fosfaatopname efficiëntie door wortels.

In een experiment in een klimaatkamer met sojabonen verhoogde ammoniumbemesting de fosfaatopname door een verlaging van de pH in de rhizosfeer (Riley & Barber, 1971).

Het grootste deel van de N-opname door het gewas zal echter plaatsvinden in de nitraatvorm. Ammonium is in de bodem relatief slecht mobiel ten opzichte van nitraat en zal voordat het naar de plantenwortel kan worden getransporteerd voor een groot deel eerst worden omgezet in nitraat (nitrificatie). Dit proces (vergelijking 1) duurt een week tot enkele weken afhankelijk van de bodemtemperatuur.



Figuur 4.2 Temperatuursafhankelijke omzetting van ammonium in nitraat (Bron: Nutrinorm)

Als de bemesting breedwerpig in ammoniumvorm wordt toegediend zal dus het grootste deel nitrificeren. Deze omzetting van ammonium in nitraat verlaagt de pH doordat H^+ ionen vrij komen bij deze omzetting. Door opname van nitraat zal het gewas tevens H^+ ionen opnemen (volgens vergelijking 4.1), maar het verzurende effect van nitrificatie is sterker dan van nitraatopname (Haynes, 1990).

Vergelijking 4.1 Nitrificatie (bron: Biologische omzetting van ammonium in nitraat)



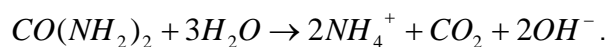
In tabel 4.1. is het verzurende effect van diverse meststoffen weergegeven. Omdat het gaat om N-gift is de kolom met de verzuring per 100 kg N het meest relevant. Het basenequivalent is de hoeveelheid calciumoxide (kg CaO) die nodig is om de verzurende werking van 100 kg meststof te neutraliseren. Uit tabel 4.1 blijkt dat naarmate het aandeel ammonium in de meststof hoger is, de verzuring ook hoger is. De sterkst verzurende meststoffen zijn ammonium- houdende meststoffen.

Tabel 4.2 Verzurende werking enkele minerale N-meststoffen (Evers & Pothoven eds., 1995))

Meststof	% N			Basenequivalent	
	N-NH ₂	N-NH ₄	N-NO ₃	per 100 kg product	Per 100 kg N
Kalksalpeter	-	1,1	14,4	+11	+71
KAS	-	13,5	13,5	-15	-56
ASS	-	19,0	7,0	-51	-193
Zwavelzure ammoniak	-	21,0	-	-63	-300
Ureum	46,0	-	-	-46	-100

Ureumstikstof wordt in de bodem binnen enkele dagen omgezet (gehydrolyseerd) in ammoniumstikstof. Vervolgens wordt de ammoniak omgezet in nitraat. Omdat bij het eerste proces de pH toeneemt, zijn ureummeststoffen minder verzurend dan ammoniummeststoffen.

Vergelijking 4.2 Ureumhydrolyse (omzetting van ureum in ammonium)



In het traject van pH 6 t/m pH 7,5 neemt de fosfaatbeschikbaarheid toe bij een afnemende pH (figuur 2.4). In dat pH-traject speelt binding als calciumfosfaat een grote rol. Door het inzetten van verzurende meststoffen op kalkrijke bodems zou de fosfaatvoorraad in de bodem mogelijk beter benut kunnen worden.

In tabel 4.2 zijn de verzurende effecten van meststoffen op een Australische bodem en Nieuw-Zeelandse bodem gepresenteerd. Op bodems met een bufferende werking zoals de Nieuw-Zeelandse duurt het tientallen jaren om de pH te verlagen. Een effect van het volvelds toepassen van ammoniummeststoffen op de fosfaatbeschikbaarheid voor het gewas door verlaging van de pH duurt circa tien jaren.

Bovendien zijn in Nederland voor de verschillende grondsoorten optimale pH-waarden voor de teelt van akkerbouwgewassen bekend. Afwijking van deze streef-pH kan opbrengstderving opleveren. Verzuring om de fosfaatbeschikbaarheid te verhogen is bij streef-pH ongewenst.

Bovendien kan op zandgronden verzuring de concentratie Fe en Al doen toenemen, waardoor de adsorptie van fosfaat toeneemt (Bolan et al., 2003).

Tabel 4.3 Verzurende effecten van verschillende meststoffen (Bolan et al., 2003)

Meststof	Equivalent verzuring ¹	Geproduceerde verzuring ²	Aantal benodigde jaren om de pH te verlagen met 1 punt ³	
			Australië	Nieuw Zeeland
Ammonium Sulfaat (ZA)	110	2,6	8	26
Diammonium Fosfaat DAP)	74	2,06	10	33
Ureum	79	0,86	25	78
Mono Superfosfaat (SSP)	8	0,48	45	140
Tripel Superfosfaat (TSP)	15	0,5	43	135
Elementair Zwavel (S°)	310	1,55	14	43

¹ Kg CaO₃ 100 kg-1 meststof

² Dosering ZA, DAP en Ureum 25 kg N/ha per jaar. Dosering SSP en TSP 30 kg P/ha per jaar en dosering S 30 kg S/ha per jaar.

³ pH buffering capaciteit (kmol H⁺/ha) = 21,7 en 67,5 respectievelijk voor de Australische en de Nieuw Zeelandse bodem.

Op zes bodems in Frankrijk is het effect van het toepassen van verzurende ammoniummeststoffen op de fosfaatbeschikbaarheid getoetst. Het toepassen van verzurende meststoffen had geen effect op de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing. Ook de efficiëntie van fosfaatmeststoffen werd niet verbeterd door het toepassen van ammonium meststoffen (Faurie, Fardeau, 1989).

Om ammoniumopname te bewerkstelligen zal de ammonium dus in de directe wortelomgeving moeten worden geplaatst. Ammonium buiten de directe wortelzone zal voor een groot deel worden omgezet in nitraat (vergelijking 4.1). Mogelijk dat door plaatsing van ammoniumhoudende meststof in de wortelzone lokaal de pH dusdanig verlaagt door ammoniumopname of nitrificatie, dat de fosfaatbeschikbaarheid lokaal in de rhizosfeer toeneemt (Bolan et al., 2003). De pH kan lokaal dalen tot onder pH 2 in de buurt van meststofkorrels.

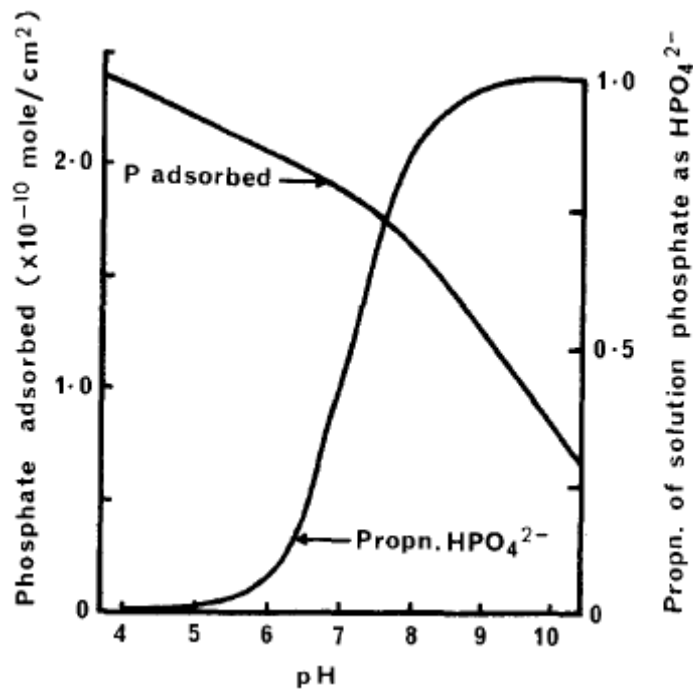
4.1.3 Bekalking op zure zandgrond

Bekalking kan de verdeling van het fosfaat in de bodem over de verschillende vormen in de bodem (speciatie) sterk beïnvloeden. Bekalking kan leiden tot een verschuiving van stabiel en labiel fosfaat (Ehlert, 2009).

Een kalkgift kan resulteren in:

- Een hogere P-beschikbaarheid door een daling van de concentratie vrij ijzer en aluminium
- Een lagere P-beschikbaarheid door toename van de adsorptie van fosfaat aan Fe- en Al-hydroxiden
- Een tijdelijke hogere P-beschikbaarheid door een gestimuleerde mineralisatie

Door de pH omhoog te brengen op zure zandgrond daalt de concentratie vrij ijzer en aluminium in de bodem en zal de capaciteit van de bodem om fosfaat aan ijzer en aluminium vast te leggen dalen. Volgens Haynes (1981) kan de adsorptie van fosfaat langzaam afnemen in het traject van 4 tot 7 en de beschikbaarheid toenemen. (figuur 4.3)

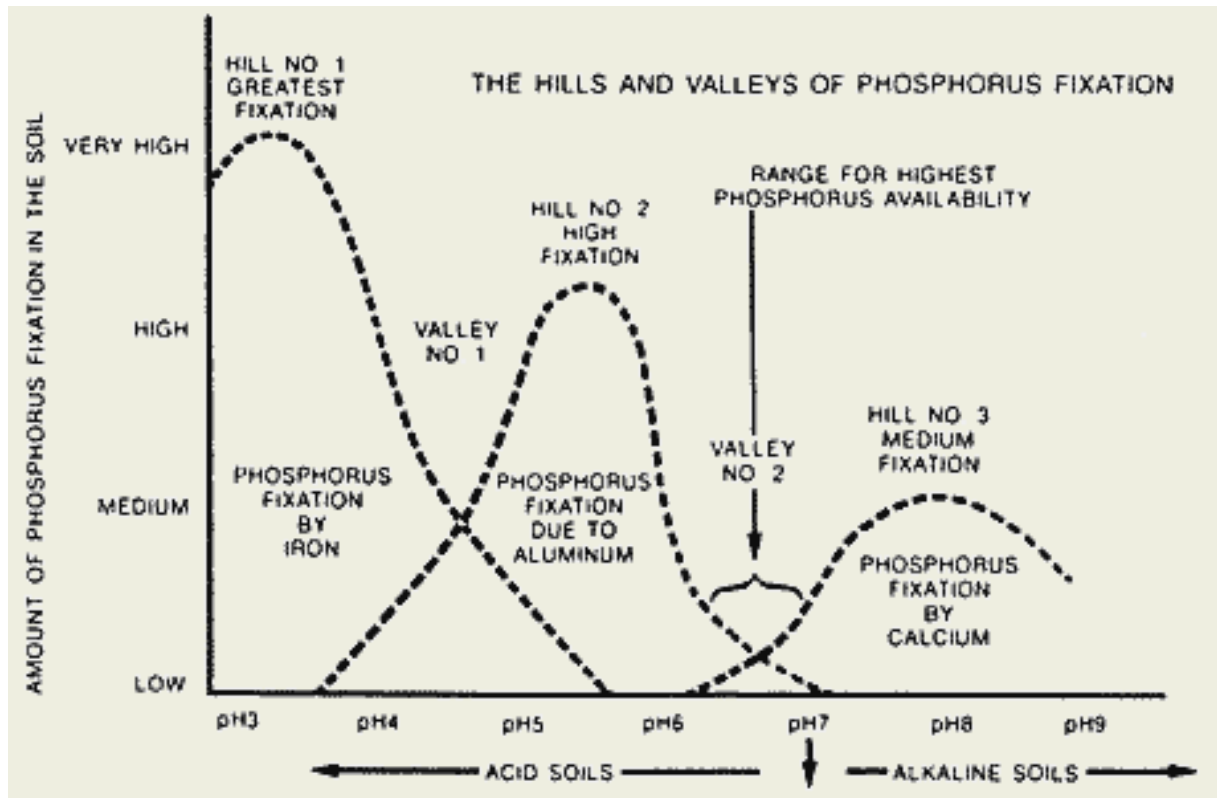


Figuur 4.3 Geadsorbeerd P en P in oplossing in relatie tot de pH (Haynes, 1981).

Bekalking kan echter ook leiden tot nieuwe fosfaatadsorberende oppervlakten zoals aluminiumhydroxiden. De sterke fixatie van fosfaat in ijzer- en aluminiumfosfaten neemt af, maar de bindingscapaciteit van fosfaat aan de bodem (ijzer- en aluminiumhydroxiden neemt (adsorptie) toe. Hierdoor kan de directe fosfaatbeschikbaarheid voor het gewas na bekalking op zure zandgronden juist afnemen (Haynes, 1981). Door bekalking kan de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem dus zowel af als toenemen (Haynes 1981).

Door een verhoogde activiteit van het bodemleven leidt bekalking tot een versnelling van het mineralisatieproces. Door deze versnelde mineralisatie kan bekalking leiden tot een hogere beschikbaarheid van fosfaat, dat vrijkomt bij de afbraak van organisch materiaal (Bolan et al., 2003).

In Nederlandse zandgronden komen bodems voor die fosfaat kunnen fixeren (definitief vastleggen). Dit zijn zandgronden met een lage bodem-pH (figuur 4.4). Fosfaat wordt in deze gronden grotendeels sterk vastgelegd (gefixeerd) als ijzerfosfaat (Schoumans et al., 2004). Het probleem van fosfaatfixatie op Nederlandse zandgronden wordt meer veroorzaakt door de hoge concentratie ijzer in de bodem van nature dan door een te lage pH.



Figuur 4.3 Vastlegging van fosfaat aan ijzer, aluminium en calcium in relatie tot de bodem-pH. (bron: Sydney Environmental Soil Laboratory, www.sesl.au).

Het advies in Nederland is om eens in de 4 jaar de bodem te laten bemonsteren en bij een te lage bodem-pH een reparatiebekalking uit te voeren. Voor elke grondsoort is de streef-pH vastgesteld door uitgebreid bemestingsonderzoek (Dijk van & van Geel, 2011). Bekalken om meer fosfaat beschikbaar te krijgen is dan ook geen optie als de pH al op streefniveau ligt.

Na bekalking op Nederlandse bodems daalt doorgaans het Pw-getal. Het vaststellen van het Pw-getal voor de flexibele gebruiksnormen mag daarom wettelijk gezien niet binnen een periode van 2 maanden na bekalking.

4.1.4 Startermeststoffen

De algemene benaming voor meststoffen, die worden gegeven voor de beginfase van de teelt, zijn starters. Starters zijn kleine hoeveelheden meststof, meestal stikstof, fosfaat en kali, die vaak worden geplaatst bij het zaaien in de rij, meestal direct in de zaai-/plantvoor. Starters zijn meestal vloeibaar. Voorbeelden zijn Powerstart, PK 32-6, APP. De starter Physiostart is een granulaat.

Fosfaat is een zeer belangrijk nutriënt in de beginfase van de teelt. Fosfaat stimuleert de beginontwikkeling van gewassen en de wortelvorming. In het voorjaar is de bodem nog relatief koud en komt er nog weinig fosfaat vrij in de bodemoplossing door oplossen van fosfaathoudende mineralen en desorptie. Ook is de mineralisatie van organisch fosfaat nog niet op gang. Hierdoor is in het vroege voorjaar de hoeveelheid fosfaat beschikbaar voor het gewas laag ten opzichte het verdere groeiseizoen.

Door bij zaaien een kleine hoeveelheid fosfaatmeststof mee te geven kan het gewas in de beginfase van voldoende fosfaat voor de beginontwikkeling en wortelvorming worden voorzien. Na deze fase kan het gewas verder groeien op de natuurlijke fosfaatlevering vanuit de bodem.

Door de fosfaatmeststof zo dicht mogelijk bij de plantenwortel te brengen, wordt de fosfaatconcentratie in de rhizosfeer sterk verhoogd. Hierdoor is diffusie naar de plantenwortel geen limiterende stap voor de beginontwikkeling van het gewas.

Het plaatsen van een startgift fosfaat is vooral van belang voor gewassen met een slechte beworteling en een korte groeiduur. De fosfaat opnamesnelheid is in de beginperiode weliswaar laag maar de immobiliteit van fosfaat in combinatie met de beperkte beworteling in de beginfase leiden ertoe dat fosfaat beperkend is. Voor gewassen met een korte teelt geldt dat dit in het groeiseizoen niet meer gecorrigeerd kan worden (Smit et al., 2009). Omdat de volgende gewassen goed reageren op plaatsing komen deze in aanmerking voor een geplaatste startgift fosfaat bij het zaaien/planten: augurk, kool, koolraap, kropsla, bonen, maïs, peen, zaaiuien (Smit et al., 2009).

In de teelt van maïs is het gebruikelijk een gift met startermeststoffen mee te geven. Het toepassen van een startgift in snijmaïs geeft niet altijd meeropbrengst maar bevordert wel de beginontwikkeling. In non tillage systemen is het effect van een startermeststof groter dan in conventionele landbouwsystemen. Het effect van de starter meststof is afhankelijk van de zaaidatum van het gewas (Bundy & Widen, 1992).

In gewassen met een kort teeltseizoen heeft het toepassen van een starter meer perspectief dan bij gewassen met een lang teeltseizoen.

Costigan (1984) vond een beduidend betere beginontwikkeling en kropopbrengst in sla. Hij stelt dat de startgift nog veel belangrijker is dan de totale fosfaatgift.

Bij de literatuurstudie naar plaatsing van meststoffen (Smit et al., 2009). is het positieve effect van een NPK startgift in de groenteteelt beschreven. Het effect op beginontwikkeling is relatief groter dan het effect op de uiteindelijke opbrengst.

Het effect op beginontwikkeling is vroeg in het groeiseizoen vaak zichtbaar.

In veldproeven in 2008 en 2009 van het PRI is het effect van geplaatste kleine fosfaatgiften (10 en 30 kg P₂O₅) vergeleken met een volveldse gift van 200 kg P₂O₅/ha en een nulobject. De veldproeven zijn uitgevoerd bij lage P_w-getallen van 27 in 2008 en 19 in 2009 (Ruyter de, et al., 2009).

Een kleine fosfaatgift versnelde de beginontwikkeling van spinazie, suikerbiet, ui, stamslaboon en snijmaïs. Bij ui verdwenen de verschillen in de loop van het groeiseizoen evenals bij snijmaïs in het tweede jaar. Bij de oogst verhoogde de kleine startgift in de rij de opbrengst van suikerbiet, spruitkool, prei, spinazie, vroege stamslaboon en snijmaïs. Fosfaatbemesting had geen effect op de opbrengst van ui, peen, ijsbergsla, late stamslaboon en maïs in het tweede proefjaar. Door plaatsing met een kleine startgift kon de totale fosfaatgift sterk worden gereduceerd.

In 6 veldproeven in aardappelen uitgevoerd door DLV Plant in 2009 en 2010 bij Pw-getallen van 17-28 zijn bemestingssystemen waarin een startgift vloeibaar fosfaat bij het poten wordt toegediend vergeleken met de volvelds adviesgift. Hieruit bleek dat door een startgift fosfaat in de rij de totale fosfaatgift in aardappelen sterk gereduceerd kon worden. (Wander et al., 2010).

In de veldproeven van PRI en DLV Plant is niet meegenomen dat de breedwerpige fosfaatgift mogelijk al gereduceerd kon worden.

In 2010 is in opdracht van het Productschap Akkerbouw onderzoek naar fosfaatbemesting in zaai-uien opgestart. Dit onderzoek wordt uitgevoerd door ALTIC. In de veldproeven die worden uitgevoerd, worden meerdere starters als APP en Powerstart getoetst.

4.1.5 Silicium

Het effect van silicium op de fosfaatbeschikbaarheid is beschreven in literatuurstudie uitgevoerd door het NMI in 2010. (Bussink en Scholl van, 2010)

Silicium komt in de bodemoplossing voor als monosiliciumzuur, polysiliciumzuur en als organosiliciumcomponenten. Alleen monosiliciumzuur is opneembaar voor planten. Zand- en veengronden hebben een lage siliciumbeschikbaarheid. Kleigronden bevatten in het algemeen een grotere voorraad beschikbaar Si.

De siliciumconcentratie in de bodemoplossing kan uiteenlopen tussen 3,5 tot 40 mg Si per liter bodemoplossing. Bij een lagere pH is meer Si beschikbaar in de Nederlandse bodems. De siliciumbeschikbaarheid wordt beïnvloed door temperatuur en vocht.

Si beïnvloedt de fosfaatvoorziening op 2 manieren:

- Si verhoogt de hoeveelheid mobiel fosfaat in de bodem door vervanging van het fosfaation door een silicaation in Ca, Al en Fe-verbindingen;
- Si zorgt voor een betere translocatie van P in de plant door een geringere opname van Mn en Fe.

Monosiliciumzuur is van invloed op de fosfaatbeschikbaarheid.

De fosfaatbeschikbaarheid kan worden verhoogd met de siliciummeststoffen amorf SiO_2 , silicagel, calcium-, kalium- of natriumsilicaten. Verschillende siliciummeststoffen verhogen de oplosbaarheid van CaHPO_4 , Ca_3HPO_4 , $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$, FePO_4 .

Ook het silicaat in "slakken" werkt positief op de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem.

Voorbeelden van meststoffen met silicaat zijn thomasslakkenmeel en thomaskali.

Silicium verhoogt met name de fosfaatbeschikbaarheid bij een lage fosfaattoestand in de bodem. Vooral op bodems met een hoge adsorptiecapaciteit door aanwezigheid van veel aluminium en ijzer bij een lage fosfaattoestand kan silicium de fosfaatbeschikbaarheid verhogen.

Meeropbrengst door het toepassen van silicium zijn gevonden in rijst en gerst bij lage fosfaattoestanden (Ma & Takahashi, 2002). Het positieve effect van Si bij fosfaatgebrek in rijst lijkt niet veroorzaakt door verbeterde opname van P, maar door een verhoogde translocatie van P van wortel naar bovengrondse (oogstbare) delen (Ma et al., 2001).

Siliciummeststoffen hebben een basische werking. Door dit pH-verhogende effect kan silicium de fosfaatbeschikbaarheid op zure zandgronden al beïnvloeden. Het effect van de pH-verhoging op de fosfaatbeschikbaarheid op zandgronden is beschreven in paragraaf 4.1.3.

De fosfaatbeschikbaarheid op gronden met een lage fosfaattoestand kan mogelijk verhoogd worden door silicium. Dit betreft vooral zand-, dal en veengronden met veel ijzer en aluminium met een lage fosfaattoestand en zandgronden met een hoge pH met veel calcium. Op zand- en veengronden kan het toepassen siliciummeststoffen resulteren in een indirect effect op de fosfaatbeschikbaarheid door de basische werking van siliciummeststoffen waardoor de pH wordt verhoogd. Op kalkrijke zandgrond met een hoge pH kan silicium resulteren in een hogere fosfaatbeschikbaarheid door de oplosbaarheid van calciumfosfaten te verhogen.

Door siliciumbemesting zou bij een lage fosfaatbeschikbaarheid de opgenomen hoeveelheid fosfaat beter kunnen worden benut door een betere verdeling van fosfaat in de plant.

4.1.6 Humuszuren

Humuszuren is een verzamelnaam voor humine- en fulvozuren. Deze zuren zijn van nature aanwezig in de bodem. Humuszuren worden gewonnen uit organische afzettingen in de bodem. Door toepassing van humuszuren zou de beschikbaarheid van meerdere nutriënten in de bodem waaronder fosfaat toenemen.

Humuszuren kunnen fosfaat inkapselen waardoor deze minder reactief is om te worden vastgelegd aan de bodem, maar nog steeds goed beschikbaar zijn voor het gewas. Ook kunnen humuszuren adsorptieplaatsen van fosfaat aan ijzer, aluminium en calcium in de bodem afschermen zodat de bindingscapaciteit van fosfaat aan de bodem wordt verlaagd. Humuszuren resulteren ertoe dat bij het ontstaan van calciumfosfaten deze in beter oplosbare vormen blijven. (Alvarez et al., 2003). Hierdoor stijgt het aandeel van de calciumfosfaten in de labiele pool ten opzichte van de stabiele pool.

Een toename van de fosfaatbeschikbaarheid bij toepassing van humuszuren wordt met name gevonden op basische gronden (Delgado et al., 1998) (Wang, 1995).

Door de chelaterende werking van de fosfaatbindende plaatsen in de bodem is fosfaat beter beschikbaar voor het gewas. Door toepassing van humuszuren zou de fosfaatgift kunnen worden verlaagd.

Humuszuren hebben een wortelstimulerende werking en een positief effect op de beginontwikkeling. Deze effecten worden ook toegeschreven aan fosfaatbemesting. In een fosfaatbemestingsproef in aardappelen in de V.S. wordt naast een fosfaattrap met APP 10-34 tevens humuszuren bijgemengd in de vloeibare fosfaatmeststof. Het toepassen van humuszuren met de fosfaatbemesting resulteerde in een hoger P-gehalte in het plantsap in de bladstelen en een hogere knolopbrengst (Hopkins & Stark, 2003).

Triferto, de vermarkter van het humuszuurproduct (Humifirst) in Nederland, geeft op haar website in proeven de meerwaarde van Humifirst in de fosfaatbehoefte gewassen pootaardappelen en snijmaïs (<http://www.triferto.eu/nl/specialties/humifirst>). Humifirst wordt geproduceerd door Tradecorp. In veel van deze proeven blijkt dat door het toepassen van de fosfaatgift kan worden gereduceerd.

Het product Humifirst is door de Universiteit van Gent in veldproeven in aardappelen, snijmaïs en gras getoetst (Verlinden et al., 2009). Door toepassing van twee Humifirst-formules nam de knolopbrengst in aardappelen toe met 13% en 17%. Door de hoge bodemvruchtbaarheid van de proefpercelen in snijmaïs was het opbrengsteffect in snijmaïs door Humifirst beperkt.

Ook zijn er nog pottenproeven uitgevoerd met Humifirst in gras en spinazie. Uit de meta-analyse over alle onafhankelijke proeven met Humifirst bleek dat Humifirst de nutriëntenopname in alle getoetste gewassen had gestimuleerd.

In onderzoek, waar het toepassen van humuszuren een positief effect heeft op opbrengst, wordt meestal ook een hogere opname van nutriënten waaronder fosfaat, gerapporteerd. De opname van nutriënten heeft een relatie met opbrengst.

Het is veelal niet aangetoond dat deze hogere fosfaatopname direct het gevolg is van een betere fosfaatbeschikbaarheid in de bodem. Door een betere beworteling en een betere nutriëntenbenutting (behalve fosfaat) wordt tevens de fosfaatopname door het gewas verhoogd.

De bodemvruchtbaarheid van Nederlandse bodems is van nature rijk. Op een groot percentage van de Nederlandse akkerbouwgrond wordt jaarlijks drijfmest toegepast. Door het toepassen van organische meststoffen en drijfmest worden humine- en fulvazuren aan de bodem toegevoegd. Hierdoor is het de vraag of het toepassen van humuszuren op de rijke Nederlandse akkerbouwgronden bij toepassing van organische meststoffen/drijfmest kan resulteren in meerwaarde.

4.2 Biologische oplossingsrichtingen

4.2.1 Uitmijnen van fosfaat in de bodem

In tabel 4.3 zijn de gewassen ingedeeld in klassen betreffende fosfaatafvoer.

De gemiddelde fosfaatafvoer loopt uiteen van 45-50 kg P₂O₅/ha voor akkerbouwbedrijven op zand-/ dalgrond tot 55 kg P₂O₅/ha voor bedrijven op kleigrond (Dijk van, et al, 2007).

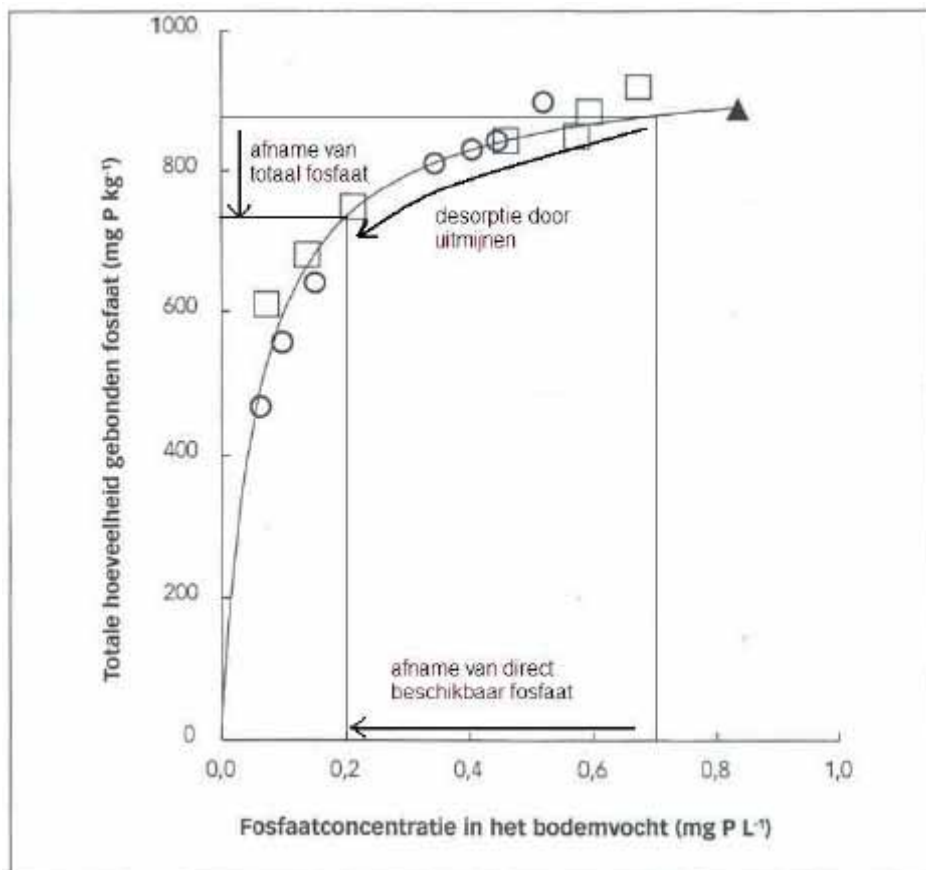
Tabel 4.4 Globale indeling gewassen in klassen betreffende de fosfaatafvoer in kg P₂O₅ per ha per jaar (Van Dijk et al., 2007).

Afvoer < 30 kg P ₂ O ₅ per ha (ongeveer 70.000 ha)	Afvoer 30-50 kg P ₂ O ₅ per ha (ongeveer 80.000 ha)	Afvoer 50 tot 70 kg P ₂ O ₅ per ha (ongeveer 700.000 ha)	Afvoer > 70 kg P ₂ O ₅ per ha (ongeveer 10.000 ha)
Appel	Spruitkool	Zetmeelaardappel	Hennepe
Peer	Bloemkool	Consumptieaardappel	Peen
Aardbei	Chinese kool	(Snij)mais	Knolselderij
Asperge	Chichorei	Koolzaad	
Andijvie	Pootaardappel	Luzerne	
Broccoli	Prei	Kroot	
Courgette	Schorseneer	Suikerbiet	
Dop(erwt)	Sla	Zaai-ui	
Stam(sla)boon	Vlas	Sluitkool	
Graszaad	Bloembolgewassen	Granen	
Bloembolgewassen		Veldboon	

Bij stijgende prijzen van fosfaatmeststoffen zou het uitmijnen van de fosfaatvoorraad in de bodem een optie kunnen zijn. Mogelijk dat in de toekomst dit zelfs een must wordt. Onder uitmijnen wordt verstaan: het onttrekken van fosfaat aan de grond door middel van het oogsten en afvoeren van een gewas zonder fosfaatbemesting. Bij uitmijnen wordt op lange termijn de voorraad fosfaat in de bodem benut voor de productie van gewassen zonder dat deze direct weer wordt aangevuld.

In de Nederlandse akker is zo'n 1.500 kilo tot 15.000 kilo fosfaat per hectare in de bouwvoor aanwezig. In vergelijking tot de fosfaatafvoer met verschillende gewassen (tabel 4.3) blijkt dat het tientallen jaren zal duren voordat het effect van uitmijning een duidelijk meetbaar effect op de fosfaatvoorraad in de bodem zal hebben.

In figuur 4.4 is het effect van uitmijnen op de hoeveelheid gebonden fosfaat en de beschikbare fosfaat in de bodemoplossing weergegeven voor een zandgrond.



Figuur 4.4 Fosfaatdesorptie-isotherm, die de relatie weergeeft tussen de direct beschikbare P in het bodemvocht en het totaal in de bodem aanwezige hoeveelheid P (Koopmans et al.,2005).

Uit figuur 4.4 blijkt dat bij een hoge hoeveelheid gebonden fosfaat het uitmijnen van een klein deel van de totale fosfaatvoorraad in de bodem de hoeveelheid beschikbaar fosfaat sterk reduceert. De oorzaak hiervan is dat bij uitmijning de voorraad beschikbaar voorraad en het aandeel fosfaat in de labiele pool snel aan de bodem wordt onttrokken.

Het uitmijnen van fosfaat zal naar verwachting de verdeling van fosfaatvoorraad over de verschillende pools (stabiel en labiel) kunnen beïnvloeden. Er is nog weinig informatie over veranderingen die op lange termijn optreden in de totale hoeveelheid fosfaat in de bodem en de verdeling ervan over de verschillende pools/vormen in de bodem (speciatie).

Een goede teelt om de fosfaatvoorraad uit te mijnen is grasland.

In fosfaatverzadigde gronden kan de uitspoeling van fosfaat naar het grondwater hoog zijn. De bijdrage van uitspoeling uit landbouwgronden aan de totale fosfaatbelasting van het Nederlandse oppervlaktewater werd recentelijk geschat op 44 procent.

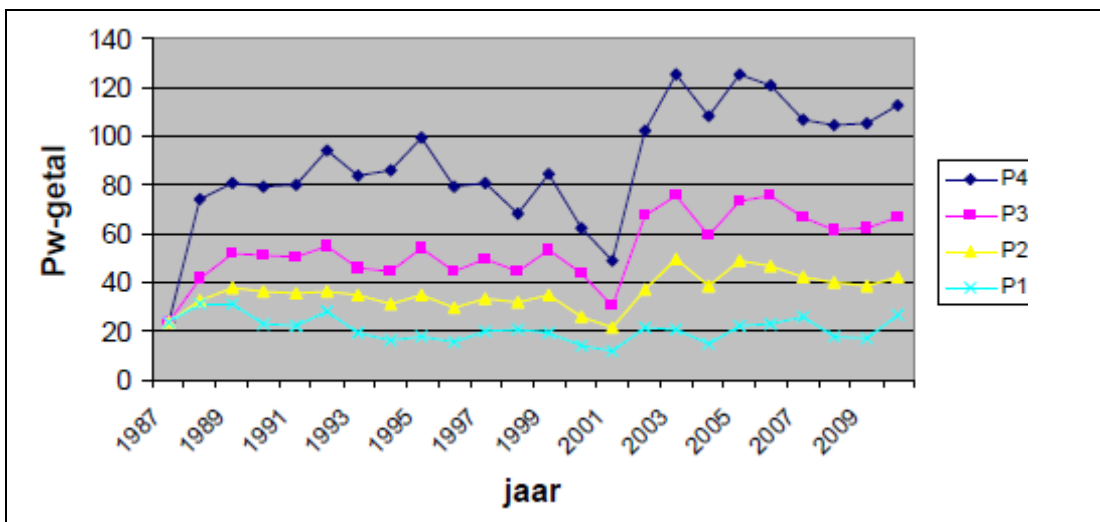
Uit een potexperimenter met gras blijkt dat door het oogsten van 31 snedes (vergelijkbaar met een buitenperiode van 6 jaar) de voorraad gebonden fosfaat in de bodem daalde. De fosfaatconcentratie in de bodemoplossing daalde met circa 90%.

De lage fosfaatbeschikbaarheid in de bodem biedt meer kansen voor mycorrhiza s om bij een lage fosfaatbeschikbaarheid het gewas in fosfaat te helpen voorzien.

Om de fosfaattoestand te handhaven zal jaarlijks de fosfaatafvoer moeten worden gecompenseerd met de onvermijdelijke verliezen. Hiertoe moet circa 10-20 kg P₂O₅/ha extra gegeven worden dan de gewasafvoer bij een hoge fosfaattoestand (Ehlert et al., 2007). Bij een lagere gift zal de fosfaattoestand in de bodem dalen en is er dus sprake van uitmijning.

Door uitmijnen zal naar verloop van jaren eerst de opbrengst en fosfaatafvoer gaan dalen. Hierdoor zal het uitmijningsproces steeds langzamer verlopen. Naar verwachting zullen opbrengst en fosfaat gaan dalen naar verloop van jaren. Hierdoor zal het uitmijningsproces steeds langzamer gaan verlopen.

Het is onduidelijk na hoeveel teeltjaren de opbrengsten gaan dalen bij uitmijning. Dit is afhankelijk van de fosfaattoestand bij aanvang van de uitmijningsperiode. Op de fosfaatrappenvelden van PPO in Lelystad en Marknesse wordt jaarlijks een lagere zaad-, knol-, en suikeropbrengst gevonden. Zonder fosfaatbemesting lijkt het Pw-getal op het proefveld in Lelystad zich te stabiliseren rond een niveau van Pw-20. Op het meerjarig fosfaatrappenveld in Lelystad aangelegd in 1987 werd in 2006 een sterk verlaagd gehalte aan orthofosfaat gemeten in de bodemoplossing zonder jaarlijkse fosfaattoediening.



Figuur 4.5 Verloop van het Pw- getal in objecten met een P-gift van circa 0, 70, 140, en 280 kg P₂O₅ per ha per jaar (respectievelijk de objecten P1, P2 ,P3 en P4) onderzoek PPO-agv in Lelystad).

Uit bemestingsproeven in aardappelen blijkt dat de meeropbrengst van fosfaat bij een Pw-getal van 25 of hoger klein is. Bij hogere Pw-getallen lijkt uitmijning dus mogelijk acceptabel. In de Nederlandse akkers is doorgaans een hoge fosfaatvoorraad aanwezig (Zie § 2.1). Bij de huidige prijzen voordrijfmest is uitmijnen in de huidige Nederlandse akkerbouw niet rendabel.

4.2.2 Gewassen met een efficiënte fosfaatbenutting

Fosfaat wordt opgenomen uit de rhizosfeer enkele millimeters rondom de wortels. Door de uitscheiding van wortelzuren (exudaten) en koolzuurgas dat vrijkomt bij de ademhaling van wortels wordt de pH in de wortelzone lokaal verlaagd. Hierdoor kunnen gewassen met een uitgebreid wortelstelsel bij een lage fosfaattoestand nog voldoende fosfaat uit de bodem opnemen (Werff van der et al., 1995).

De plantenfamilie Cruciferen, waaronder bladrammenas, koolzaad, gele mosterd en meerdere koolgewassen vallen, en Phacelia zijn voorbeelden van dit type gewassen. Een nadeel van Cruciferen is dat deze gewassen geen symbiose met een mycorrhiza-schimmel kunnen aangaan (Zie paragraaf 4.2.4).

Gewassen met een uitgebreid wortelstelsel en met een hoge wortelactiviteit kunnen de activiteit van bacteriën en schimmels in de wortelzone verhogen. Deze bacteriën kunnen anorganisch en organisch fosfaat vrijmaken door uitscheiding van organische zuren en het enzym fosfatase (Zie paragraaf 4.2.3).

Vlinderbloemigen (leguminosen) hebben een hoge stofwisselingsactiviteit in en rondom de wortels. Deze activiteit wordt veroorzaakt door de bacteriën die in symbiose leven met de plantenwortels. Door de hoge uitscheiding van koolzuur daalt de pH lokaal in de wortelzone en lossen fosfaatmineralen op.

Gewassen gaan bij een lage P-beschikbaarheid extra exudaten produceren. Het vrijmaken van fosfaat uit de bodem door het uitscheiden van exudaten kost veel energie. Het vrijgemaakte fosfaat uit de bodem door het uitscheiden van exudaten wordt primair gebruikt voor de fosfaatvoorziening van de eigen plant. Gezien de hoeveelheid energie die de productie van extra exudaten kost is het niet aannemelijk dat meer fosfaat in de bodem wordt gemobiliseerd dan de eigen fosfaatbehoefte (Jones, 1998).

Van de leguminose witte lupine (*Lupinus albus* L.) is bekend dat dit gewas fysiologische aanpassingen kan maken onder fosfaatarme omstandigheden. Onder fosfaatarme omstandigheden kan dit gewas grote clusters gespecialiseerde proteoidewortels (Keertsinghe et al., 1998).

vormen om zo een groot volume van de bodem te exploreren. De vorming van deze clusters plantenwortels werd onderdrukt bij een verhoging van de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem (Keertsinghe et al., 1998).

De clusters proteoidewortels hebben een alternatieve stofwisseling en zijn zo gespecialiseerd om de productie van organische zuren te verhogen. (Gilbert et al., 1999). Bij fosfaatarme omstandigheden worden grote hoeveelheden citroenzuur geproduceerd, waardoor meer anorganische fosfaten in de wortelzone oplossen (Neumann et al., 1998). Naast de hoge productie van exudaten is de activiteit van zure organische fosfaten groter, waardoor organische fosfaten beter beschikbaar komen voor het gewas (Gilbert et al., 1999).

Uit veldexperimenten in Nigeria en pottenexperimenten blijkt dat leguminosen meer fosfaatvormen uit de bodem beschikbaar kunnen maken dan maïs bij een gelimiteerde P-voorziening. Deze experimenten zijn uitgevoerd op een fosfaatarme/-fixerende bodem. Bij een gemengde teelt van snijmaïs met klaver en een rotatie van snijmaïs met klaver kan de maïs uiteindelijk profiteren van de door de leguminosen vrijgemaakte fosfaten uit de bodem. De bijdrage van deze methode aan de fosfaatvoorziening van de snijmaïs was

beperkt en veel minder groot dan het toedienen van wateroplosbare fosfaatmeststoffen (Horst et al., 2001).

Door het vastleggen van fosfaat in de braakperiode tussen 2 groeiseizoenen kan het gemobiliseerde fosfaat door het gewas weer worden vastgelegd. De volgteelt zal in rotatie dus niet volledig kunnen beschikken over het gemobiliseerde fosfaat door een P-efficiënt gewas. Hierdoor is de bijdrage in de fosfaatvoorziening van een P- efficiënt gewas aan een P-inefficiënt gewas groter bij een systeem met gemengde teelten dan bij rotatie. Het positieve effect van gemengde teelt in de fosfaatvoorziening van een inefficiënt P- gewas zal kleiner zijn als gewassen elkaar beconcurreren om andere nutriënten en water (Härdtner and Horst, 1991).

Onder vlinderbloemigen vallen onder meer bonen, erwten, peulen, klaver, luzerne en lupinen. Ondanks dat deze gewassen efficiënt fosfaat uit de bodem zouden moeten kunnen vrijmaken door een hoge stofwisselingsactiviteit van de wortels hebben deze gewassen wel een fosfaatadvies.

In de adviesbasis zijn gewassen als bonen, erwten, peulen en rammenas in gewasgroep 1 ingedeeld (tabel 2.3). Dit betekent dat deze gewassen fosfaatbehoefstig zijn vergelijkbaar met aardappel en ui. Klaver en luzerne zijn in gewasgroep 3 ingedeeld. De fosfaatbehoefte van klaver en luzerne is circa 50-100 kg P₂O₅/ha lager dan die van de gewassen uit gewasgroep 1. Luzerne kan door een diepe en intensieve beworteling een groot bodemvolume exploreren. Klaver wortelt minder diep, maar kan de toplaag intensief bewortelen.

Door het toepassen van groenbemesters kan buiten de hoofdteelt om fosfaat aan de bodem worden onttrokken. Na vertering van de ondergewerkte groenbemester komt (een deel van) de opgenomen fosfaat in de groenbemester vrij voor opname door het gewas. Het is nog onbekend wat de waarde is voor het toepassen van een geslaagde teelt van een groenbemesters op de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem voor de volgteelt. Mogelijk dat hierdoor naast de N-gift de fosfaataanvoer op percelen verlaagd kan worden. In een veldexperiment in Denemarken is het effect van de vanggewassen Italiaans raaigras, lupine, cichorei, zuring (*Rumex*) en wondklaver (*Anthyllis vulneraria*) op de P-opname, de P-beschikbaarheid en opname door de volgteelt getoetst bij een lage fosfaattoestand. Bij deze bodemtoestand produceerden de vanggewassen slechts 1-2 ton drogestof per hectare en werd 2-4 kg P/ha opgenomen. De vanggewassen resulteerden niet in een hogere P-beschikbaarheid en opname door het volggewas (Stouman Jensen et al., 2005).

Groenbemesters als leguminosen en cruciferen zijn efficiënte fosfaatonttrekkers aan de bodem. Het grote nadeel van leguminosen als groenbemester is dat gewassen als klaver, luzerne en lupinen enkel en alleen geschikt zijn als hoofdteelt. Er kan dus geen andere gewassen worden geteeld bij de teelt van deze groenbemesters. Cruciferen als bladrammenas en gele mosterd kunnen goed als nateelt worden gebruikt.

Zaaiuien hebben een beperkte bewortelingscapaciteit. Hierdoor heeft een zaaiui maar een beperkte capaciteit om op zoek te gaan naar water en nutriënten in de bodem waaronder fosfaat. Binnen de huidige uienrassen is er weinig variatie gevonden in worteleigenschappen. De wilde variant *Allium fistulosum* L. heeft wel een veel langer wortelstelsel met meer fijnere wortels en meer hoofdwortels. Er lijkt perspectief om de positieve eigenschappen van deze wilde variant in te kruisen bij de huidige uienrassen. Bij

de WUR sectie plantbreeding worden de mogelijkheden van de gekruiste uienplantjes onderzocht in 2011 en 2012 (Scholten et al., 2011).

4.2.3 Fosfaatoplossende bacteriën en schimmels

Fosfaatoplossende bacteriën en schimmels zijn bodemorganismen die fosfaat beschikbaar kunnen maken door het oplossen van vastgelegd fosfaat in de bodem. Dit kan op twee manieren:

- Door het uitscheiden van organische zuren wordt lokaal de pH verlaagd waardoor fosfaatmineralen sneller kunnen oplossen. Door de chelaterende werking van organische zuren van positieve bindingsplaatsen komt het fosfaat gebonden aan deze plaatsen vrij.
- Bacteriën of schimmels kunnen fosfatase uitscheiden. Fosfatase is een groep enzymen dat mineralisatie van organisch fosfaat stimuleert.

Bacteriën uit de families *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Rhizobium*, *Erwinia*, *Serratia*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Acinetobacter* en *Flavobacterium* kunnen fosfaat uit de bodem oplossen. De meest efficiënte fosfaatoplossers zijn *Pseudomonas*, *Bacillus* en *Rhizobium*. Fosfaatoplossende schimmels komen uit de families *Penicillium* en *Aspergillus* (Rodríguez & Fraga 1999). (Khan et al., 2009).

Van nature zijn al veel van deze bacteriesoorten in de bodem aanwezig die de capaciteit hebben fosfaatmineralen op te lossen. Dit mechanisme werkt vooral goed bij aanwezigheid van calciumfosfaten, die aanwezig zijn bij een hoge pH (Chen et al., 2006).

Phytaat is een inositol fosfaat, een vrij moeilijk afbreekbaar organisch fosfaat. Dit fosfaat kan in aanzienlijke mate in de bodem voorkomen. Circa 40 % van de bodembacteriën waren in staat phytaat als P-bron te benutten (Rodríguez & Fraga 1999).

Fosfaatoplossende bacteriën kunnen mycorrhiza's helpen de fosfaatvoorziening van het gewas te verbeteren. De fosfaatoplossende bacteriën maken het fosfaation vrij en de mycorrhiza is een brug voor het fosfaation naar de plantenwortel voor transport van het fosfaation. Deze interactie speelt vooral een rol bij een lage fosfaatbeschikbaarheid in de bodem (Rodríguez & Fraga 1999) (Khan et al., 2009).

Er zijn nogal wat pottenproeven/kasexperimenten etc. waarin het toepassen van fosfaatoplossende bacteriën en schimmels de fosfaatbeschikbaarheid en opname door het gewas hebben verhoogd. Vaak zijn deze proeven uitgevoerd met grond met een lage fosfaatbeschikbaarheid. Een hoge fosfaatbeschikbaarheid beïnvloedt de mobilisatie van fosfaat negatief voor sommige bacteriesoorten.

De kans op succes van inoculatie met fosfaatoplossende bacteriën in het veld lijkt kleiner, door concurrentie met het al aanwezige bodemleven.

Positieve effecten van inoculatie met fosfaatoplossende bacteriën zijn gevonden in onder meer sla, aardappel, radijs, rijst suikerbiet, bonen en wintertarwe (Rodríguez & Fraga 1999).

T. Kuijper, professor bij de sectie bodemkwaliteit van de WUR meldt dat het inoculeren van zaaizaad met mycorrhiza en fosfaatoplossende bacteriën en schimmels onder veldomstandigheden risicovol is. Onder veldomstandigheden is de concurrentie tussen verschillende soorten bacteriën en schimmels groot, waardoor de kans tot overleving van de geïnoculeerde bacteriën/schimmels/mycorrhiza klein is (Richardson, 2000). Bij overleven van de fosfaatoplossende bacteriën onder veldomstandigheden is het de vraag of deze bacteriën inderdaad fosfaat gaan oplossen en bijdragen aan de fosfaatvoorziening van het gewas (Richardson, 2000).

Om te komen tot een grotere kans van slagen met fosfaatoplossende bacteriën en schimmels is vervolgonderzoek nodig. Zo is onderzoek nodig naar nieuwe soorten fosfaatoplossende bacteriën.

Mogelijk dat genen die verantwoordelijk zijn voor de productie van de organische zuren en phosphatasen kunnen worden geïsoleerd en ingebouwd kunnen worden in andere bodembacteriën. Door het creëren van een stabiele bacterie met een verhoogde productie van zuren/phosphatase kan het succes van inoculatie met bacteriën worden verhoogd (Rodríguez & Fraga 1999).

4.2.4 Mycorrhiza's

Een mycorrhiza is een mutualistische symbiose van schimmels en plantenwortels.

Mycorrhiza's kunnen positief op de gewasgroei werken door een verbeterde

- opname van nutriënten (fosfaat)
- opname van water
- bodemstructuur door vorming van aggregaat
- ziekteverendheid

De plant voorziet de schimmel in suikers en de schimmel helpt de plant bij het opnemen van nutriënten. Een belangrijk nutriënt hierin is fosfaat. Bij wintertarwe bijvoorbeeld kan 24 tot 33% van de fosfaatopname door mycorrhiza's worden gerealiseerd. Bij organische bemesting is dit 48 tot 59% van de totale P-opname (Tarafdar, Marschner, 1994).

Ruwweg zijn er twee soorten mycorrhiza's:

- Ectomycorrhiza's: Deze mycorrhiza's komen vooral voor bij bomen. Hierbij groeien de schimmeldraden alleen om de buitenkant van de plantenwortel heen.
- Endomycorrhiza's: Deze groep komt voor bij de meeste plantensoorten (ongeveer 80%) De schimmeldraden groeien de wortelhuid in.

Het meest voorkomende en voor de land- en tuinbouw belangrijkste groep is de endotrophe vesikulaire-arbusculaire (VA)-mycorrhiza.

Onder fosfaatarme omstandigheden kunnen mycorrhiza's het gewas van extra fosfaat voorzien door (Bolan, 1991):

- Extra exploratie van de bodem door verkleining van de afstand die een fosfaat-ion moet afleggen tot de plantenwortel en een groter oppervlakte voor opname van het fosfaat-ion.
- De opname van fosfaat is hoger door een hogere affiniteit voor het fosfaat-ion dan plantenwortels.
- Oplossen van fosfaat door uitscheiding van organische zuren en fosfatase.

Onder de volgende omstandigheden zullen maatregelen gericht op de extra fosfaatlevering van mycorrhiza weinig tot geen effect hebben:

- Een hoge fosfaatbeschikbaarheid voor het gewas.
- Veelvuldig gebruik van meststoffen, fungiciden, ploegen en grondontsmetting.
- Niet alle gewassen kunnen een mycorrhiza symbiose aangaan.

Bij de kolonisatie van mycorrhiza zal het gewas suikers als voedingsbron voor de mycorrhiza moeten afstaan wat ten koste gaat van het gewas. Gewassen kunnen selectief zijn in het toelaten van mycorrhiza's. Dit blijkt uit het feit dat de kolonisatie van mycorrhiza's afhankelijk is van de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem. Bij hoge concentratie opgelost fosfaat in de bodemoplossing, is de kolonisatiegraad van plantenwortels door mycorrhiza's beperkt (Keltjens, 1999).

Hierdoor lijkt de rol van mycorrhiza's in de hoog productieve Nederlandse landbouw beperkt.

Het onderdrukkende effect van stikstofbemesting op de ontwikkeling van VA-mycorrhiza is sterker dan dat van fosfaatbemesting.

Het gebruik van meststoffen, fungiciden en grondontsmetting remt de ontwikkeling van de mycorrhiza schimmels (Limonard & Ruissen, 1989). Uit tabel 4.4 blijkt dat een

teeltsysteem met gereduceerde input van meststoffen en biociden de kolonisatie door mycorrhiza stimuleert.

Tabel 4.5 VA-mycorrhiza (%) van de wortellengte 3 jaar na drastisch gereduceerde input van meststoffen en biociden (Ruissen, 1982)

	Aardappelen	Wintertarwe
Huidige landbouw	3,8	17,6
Lage input	16,0	48,9

Ook grondbewerking/ploegen resulteert in een remming van deze schimmels.

In de biologische landbouw is de bodemvruchtbaarheid doorgaans lager door de beperking in het gebruik van minerale meststoffen. Ook wordt geen grondontsmetting en fungiciden toegepast. In de biologische landbouw spelen mycorrhiza's een grotere rol in de fosfaatvoorziening van gewassen dan in de conventionele landbouw.

De wortels van de meeste planten kunnen een symbiose aangaan met deze schimmels. Een uitzondering hierop zijn de plantenfamilies *Chenopodiaceae* (de Ganzevoetfamilie met bekende vertegenwoordigers als Melde, Quinoa en Bieten) en *Cruciferae/Brassicaceae* (de Kruisbloemigen met soorten als gele mosterd, bladrammenas en de koolsoorten). Aardappelen en wintertarwe hebben een matige affiniteit voor symbiose met mycorrhiza. De teelt van goede waardplanten voor mycorrhiza kan de kolonisatie van mycorrhiza voor het volggewas bevorderen.

De voorvrucht is van belang voor de kolonisatiegraad van mycorrhiza's. In een veldproef met gerst bleek dat de voorvrucht suikerbiet resulteerde in een lagere kolonisatie van de gerst dan veldbonen. Bij een lage fosfaattoestand resulteerde de kolonisatiegraad van 75% na veldbonen in een hogere fosfaatopname dan de lagere kolonisatie van 50% na suikerbiet (Van der Werff et al., 1995). Hieruit blijkt dat de teler door keuze van de voorvrucht of groenbemester de kolonisatie van het gewas door mycorrhiza kan beïnvloeden.

Knelpunten waarin de fosfaatvoorziening van het gewas lager is dan de toegestane gebruiksnorm zijn in § 2.6 gedefinieerd. Dit betreft gewassen uit gewasgroep 0 en 1 geteeld bij een lage fosfaattoestand ($P_w < 35$). Dit zijn vooral vollegrondsgroenten, aardappelen, uien en peen. Door de toename van het exploratievermogen van de bodem kunnen mycorrhiza's met name meerwaarde bieden bij de opname van fosfaat door gewassen met een beperkt wortelstelsel.

Zaaiuien is een fosfaatbehoefstig gewas uit gewasgroep 1 met een zeer beperkte bewortelingscapaciteit. Mycorrhiza's kunnen een ideale oplossing zijn om de fosfaatvoorziening van zaaiuien te verhogen. De affiniteit van zaaiuien voor een symbiose met mycorrhiza is groot.

In 2004 is de kolonisatie van mycorrhiza's in 20 uienpercelen in Nederland onderzocht (Tabel 4.5). De gemiddelde fosfaattoestand van de biologische percelen was 32 en 44 voor de gangbare percelen.

Tabel 4.6 Gegevens over de kolonisatie van arbusculaire mycorrhiza naar teeltsysteem en regio's in Nederland (Galvan et al., 2009)

Teeltsysteem	Regio	Pw- getal	Opbrengst (ton/ha)	Arbusculaire kolonisatie	Hyphal kolonisatie	Vesiculaire kolonisatie
Biologisch	Flevoland	32	33	62 a	89 a	9,2
	Zeeland	30	28	65 a	85 a	6,5
Conventioneel	Flevoland	45	76	67 a	91 a	7,7
	Zeeland	42	59	46 b	72 b	3,6

Gemiddelden in ieder kolom gevolgd door dezelfde letter verschillen niet significant van elkaar (Fischer LSD test, $p > 0,05$).

Alle geanalyseerde planten waren gekoloniseerd door mycorrhiza's. Van de wortels was 84% gekoloniseerd en 60% was arbusculair gekoloniseerd. In Flevoland was er geen verschil in kolonisatie tussen de biologische en conventionele uienpercelen. In Zeeland was een hogere kolonisatie gevonden in de biologische percelen. Uit dit onderzoek blijkt dat ook in de gangbare uienpercelen de kolonisatie van mycorrhiza hoog was ondanks dat de fosfaattoestand van de percelen hoog was.

Bij de teelt van gewassen uit gewasgroep 0 of 1 kunnen rassen worden gekozen die een hoge affiniteit hebben voor het vormen van een symbiose met mycorrhiza's. Hierdoor zou de fosfaatbehoefte van het gewas afnemen. Door selectie en veredeling van rassen die een symbiose kunnen vormen mycorrhiza, zou de teelt van uien bij een lage fosfaattoestand vergemakkelijkt worden. Ook op het gebied van mycorrhiza ligt potentieel bij veredeling met de wilde variant van zaaiui, omdat deze variant sterk reageert op de kolonisatie door mycorrhiza (Scholten et al., 2011). (zie §4.2.2.)

5 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In deze deskstudie zijn meerdere oplossingsrichtingen behandeld, op welke wijze de fosfaatbenutting van de fosfaatvoorraad verhoogd kan worden. Bij veel van de genoemde oplossingsrichtingen is nog vervolgonderzoek nodig onder de Nederlandse veldomstandigheden.

Het vastleggen en vrijkomen van fosfaat in en uit de verschillende pools is een gecompliceerd proces. Er zijn nog onvoldoende analysemethoden om een goede voorspelling te doen hoeveel en op welke termijn fosfaat beschikbaar komt uit de verschillende pools. Het is nog onduidelijk welke van de huidige meetmethoden in welke grondsoort de meest nauwkeurige relatie heeft met de werkelijke fosfaatvoorziening van het gewas.

Onder Nederlandse veldomstandigheden zal bekalking en bemesting met silicium naar verwachting de fosfaatbeschikbaarheid niet verhogen.

De effectiviteit van het merendeel van de aangedragen oplossingsrichtingen is groter bij een lage fosfaatbeschikbaarheid. Door uitmijnen of een negatieve fosfaatbalans zal naar verwachting de bodemtoestand in de Nederlandse bodems dalen en de meerwaarde van deze toepassingen toenemen. Er is nog te weinig kennis over het effect van uitmijnen op de fosfaatbeschikbaarheid en de nalevering op termijn vanuit de bodemvoorraad.

Bij toepassing van rijenbemesting met verzurende ammoniummeststoffen wordt meestal de efficiëntie van de toegepaste methode bestudeerd. Het effect van ammoniumbemesting op de fosfaatopname zou in de Nederlandse bodems moeten worden onderzocht of dit meerwaarde biedt voor het benutten van de fosfaatvoorraad.

Over het effect van het toepassen van humuszuren onder Nederlandse veldomstandigheden is weinig bekend. Bij minder rijke omstandigheden lijken de werking van het toepassen van humuszuren een optie om de fosfaatbeschikbaarheid in de bodem te vergroten. Het is nog maar de vraag of dit in de rijke Nederlandse bodems bij jaarlijkse toepassing van drijfmest ook het geval is.

Een teler kan door gewaskeuze inspelen op de benutting van de fosfaatvoorraad in de bodem. Cruciferen en leguminosen zijn efficiënte fosfaatbenutters bij een lage fosfaatbeschikbaarheid in de bodem. Cruciferen zouden mogelijk als vanggewas in de gewasvrije periode kunnen worden geteeld. Het is nog onduidelijk wat de waarde is voor de fosfaatvoorziening op bouwplanniveau indien deze gewassen meer in bouwplanrotatie worden geteeld.

Ook kan een teler bij de teelt en de gewaskeuze inspelen op mycorrhiza. Door achterwege laten van het telen van gewassen met geen of een lage affiniteit voor mycorrhiza als cruciferen en suikerbieten kan de kolonisatie van mycorrhiza voor het volggewas worden verhoogd. Ook kan hij dit doen door extensiever te telen met een lagere input van meststoffen en biociden. Het is nog onduidelijk wat de waarde is van mycorrhiza's in de fosfaatvoorziening van het gewas bij een lage fosfaattoestand en het effect op de fosfaatvoorziening van het gewas door in de gewaskeuze rekening te houden met gewassen met affiniteit voor mycorrhiza.

Veel bedrijven brengen tegenwoordig middelen van mycorrhiza's en fosfaatoplossende bacteriën op de markt. Het is nog onduidelijk onder welke omstandigheden welke van deze middelen in het veld de fosfaatvoorziening van het gewas kunnen verbeteren.

Om de onderzoeksvraag "Hoe kan het aanwezige fosfaat in akkerbouwgronden worden vrijgemaakt voor benutting door het gewas" lijken de volgende oplossingsrichtingen perspectiefvol:

- Rijenbemesting met een verzurende N-meststof
- Teelt van gewassen als groenbemester of hoofdgewas
 - Teelt cruciferen als groenbemester of hoofdgewas
 - Combinatieteelt ("mixed cropping") met leguminosen
 - Selectie op rassen met hoge bewortelingscapaciteit
- Mycorrhiza
 - Keuze voor de teelt van gewassen binnen het bouwplan met affiniteit voor vorming van Mycorrhiza's
 - Selectie en veredeling op rassen met een hoge affiniteit voor de vorming van mycorrhiza

6 Literatuur

- Alvarez R., L.A. Evans, P.J. Milham, M.A. Wilson (2003)
Effects of humic material on the precipitation of calcium phosphate *Geoderma* 118
p. 245–260
- Bolan, N.S. (1991)
A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of
phosphorus by plants *Plant and Soil* 134 p. 189-207.
- Bolan, N.S. , , D.C. Adriano, D. Curtin (2003)
Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal
transformation and bioavailability *Advances in Agronomy* Volume 78 p. 215-272
- Bundy, L.G., P.C. Widen (1992)
Corn response to starter fertilizer: Planting date and tillage effects. *Better Crops* 76
(Winter):20-23.
- Bussink, W., L. van Scholl (2010) Effecten van silicium op aardappel 38 p.
- DW Bussink, L van Schöll, DJ den Boer, H van der Draai, RF Bakker (2008) Demonstratie
nieuwe P-adviessystematiek: minder P-bemesting kan. NMI-rapport 1160, 47 pp.
- Costigan, P. A. (1984) The effects of placing small amounts of phosphate fertilizer
close to the seed on growth and nutrient concentrations of lettuce
Plant and Soil 79, 191-201
- Cordell, D., J-O Drangert, S. White (2009) *The Story of Phosphorus: Global food security
and food for thought*, *Global Environmental Change Journal*,
doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
- Dekker P.H.M., P.A.I. Ehlert (2005) Landbouwkundige en milieukundige gevolgen
van evenwichtsbemesting met fosfaat op bouwland Informatieblad 398.87
- Dekker, P.H.M., R. Postma (2008).
Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting. Bureaustudie in opdracht van
Productschap akkerbouw. 28 p.
- Delgado A., A Madrid, S Kassem, L Andre (2002) Phosphorus fertilizer recovery from
calcareous soils amended with humic and fulvic acids *Plant and Soil*, Volume
245, p. 277-286.
- Dijk Van, W. , P.H.M. Dekker, H.F.M. ten Berge, A.K. Smit, J.R. van der
Schoot (2007)
Aanscherping van fosfaatgebruiksnormen op bouwland bij akker- en
tuinbouwgewassen. 84 p.

- Dijk van, W., van Geel (2011)
 Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen
 p. 47-51.
- Dijk van, W., van Geel (2011)
 Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen
 p. 60-72
- Dijk, van W., P.H.M. Dekker, R. Postma, S.W. Moolenaar (2009)
 Bodembeheer op akkerbouwbedrijven in relatie tot het mineralenbeleid p. 63.
- DLV Plant, WUR-PRI, NMI (2011)
 Alles wat u moet weten over fosfaat. Vragen en antwoorden. 6p.
- Ehlert, P.A.I., S.L.G.E. Burgers, D.W Bussink, E.J.M. Temminghoff, P.J. van Erp, W.H. van Riemsdijk (2006)
 Deskstudie naar de mogelijkheden van het aanwijzen van fosfaatarme gronden op basis van P-PAE
- Ehlert, P.A.I. (2009) Advies bemonstering bodem voor differentiatie van fosfaatgebruiksnormen 51 p.
- Elrashidi M.A. (2004) Selection of an Appropriate Phosphorus Test for Soils
ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Analytical_Soils/phosphor.pdf
- Evers, M. A. A., R. Pothoven eds. (1995)
 Het handboek meststoffen p. 480.
- Galván G.A., & IsParádi K. Burger . J. Baar T.W. Kuyper, O.E. Scholten, C. Kik (2009)
 Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in onion roots from organic and conventional farming systems in the Netherlands *Mycorrhiza* 19:317–328
- Gilbert, G. A., J. D. Knight, C. P. Vance, D. L. Allan (1999)
 Acid phosphatase activity in phosphorus-deficient white lupin roots *Plant, Cell and Environment* (1999) **22**, 801–810
- Haes, U.H.A de., J.L.A. Jansen, W.J. van der Weijden, A.L Smit. (2009)
 Fosfaat – van te veel naar tekort. Beleidsnotitie van de 16 p.
- Härdter, R., W.J. Horst (1991)
 Nitrogen and phosphorus use in maize sole cropping and maize/cowpea mixed cropping system on an Alfisol in the Northern Guinea Savanna of Ghana. *Biol. Fertil. Soils* 10, 267–275.
- W.J. Horst, M.Kamh, J.M. Jibrin & V.O. Chude (2001)
 Agronomic measures for increasing P availability to crops
Plant and Soil 237: 211–223,
- Haynes, R.J. (1982)
 Effects of liming on phosphate availability in acid soils *Plant and Soil* 68, 289-308.
- Haynes, R. J. (1990).

Active ion uptake and maintenance of cation–anion balance: A critical examination of their role in regulating rhizosphere pH. *Plant Soil* 126, 247–264.

Hoffmann, C., E. Ladewig (1994)

Phosphorus uptake of maize as affected by ammonium and nitrate nitrogen - Measurements and model calculations. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* volume 157 issue 3 p. 225-232

Hopkins B., J. Stark (2003)

Humic acid effects on potato response to phosphorus

Houba, V.J.G., E.J.M. Temminghoff, G.A. Gaikhorst & W. Van, Vark (2000).

Soil analysis procedures using 0,01M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil and Plant Analysis*, 31 (9/10): 1299-1396.

Jones, (1998).

Organic acids in the rhizosphere- A critical review. *Plant and Soil* 295 p. 25-44.

Keerthisinghe, G., P.J. Hocking, P.R. Ryan, E. Delhayze (1998)

Effect of proteoid roots of white lupin (*Lupinus albus* L.) *Plant, Cell and Environment* 21 p. 467-478.

Keltjens WG (1999) Verhoogde fosfaatvoeding van planten op P-arme gronden als gevolg van Mycorrhiza. *NMI, Meststoffen*, 49-56.

Koopmans, G.F., W.J.Chardon (2004)

Uitmijnen biedt perspectief om het risico van fosfaatuitspoeling uit zwaar bemeste landbouwgronden te verminderen! *Informatieblad* 398.49 maart

Koopmans, G.W., W.J..Chardon, O.Oenema. (2005)

Uitmijnen van fosfaatrijke landbouwgronden: een realistische oplossing? *Bodem*, 5: p. 171-174

Khan, M.S., A.Zaidi, P.A. Wani (2009)

Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Sustainable Agriculture – A Review. *Sustainable Agriculture* 2009, Part 5, 551-570.

Jensen, L.S., A. Pedersen, J. Magid, and N.E. Nielsen, (2005)

Catch crops have little effect on P and K availability of depleted soils. *DARCOFenews*, Newsletter from Danish Research Centre for Organic Farming • June 2005 • No. 2

Mohammad Saghir Khan, Almas Zaidi and Parvaze A. Wani (2009)

Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Sustainable Agriculture – A Review. *Sustainable Agriculture* 2009, Part 5, 551-570.

Ma JF & Takahashi E (2002)

Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. p. 281.

Ma JF, Miyake Y & Takahashi E (2001)

- Silicon a beneficial element for crop plants. In: Datnoff LE, Snyder GH & Korndörfer GH (Eds). Silicon in Agriculture. Studies in Plant Sciences 8. p. 17-39.
- Muir, J.W. (1952) The determination of total phosphorus in soil with particular reference to the control of interference by soluble silica *Analyst*, 1952, 77, 313-317
- Neumann, G., A. Massonneau, E. Martinoia, V. RoËmheld (1999)
Physiological adaptations to phosphorus deficiency during proteoid root development in white lupin. *Planta* 208: p. 373-382
- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, and L.A. Dean. (1954)
Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dep. of Agric. Circ. 939.
- Richardson, A.E. (2001) Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants *Aust. J. Plant Physiol.*, 2001, 28, 897-906
- Riley D, S. A Barber. (1971) Effect of Ammonium and Nitrate Fertilization on Phosphorus Uptake as Related to Root-Induced pH Changes at the Root-Soil Interface1 *Soil Science Society of America Journal* Vol. 35 No. 2, p. 301-306
- Rodríguez, H., R. Fraga (1999)
Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion *Biotechnology Advances* 17 (1999) p. 319-339
- Ruissen, M.A., 1982.
The development and significance of vesicular-arbuscular mycorrhizas as influenced by agricultural practices. P. 111.
- Ruyter de, F.J., A.L. Smit, E.J.J. Meurs, (2009).
Plaatsing als strategie voor efficiëntere fosfaatbemesting. 1. Veldproeven. 28 p.
- Limonard, T. M.A. Ruissen (1989)
The significance of VA-Mycorrhiza to future arable farming in the Netherlands *Neth. J. P1. Path.* 95 (1989) Supplement 1 p.129-135
- Scholten, O.E., K. Burger, T.W. Kuyper (2011)
Veredelen op fosfaatopname. Veredeling biedt perspectief bij fosfaatproblematiek ui *Biokennis*, 2011 *Biovak*, 2011-01-19/ 2011-01-20
- Schoumans, O. (2007) Trends in de fosfaattoestand van landbouwgronden in Nederland in de periode 1998-2003 p.
- Schoumans, O., P.A.I. Ehlert, W.J. Chardon (2004) Evaluatie van methoden voor karakterisatie van gronden die in aanmerking komen voor reparatiebemesting p. 80.
- Smit, A.L., Bindraban, P.S., Schröder, J.J., Conijn, J.G. & Meer van der, H.G. (2009)
Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. 36 p.
- Smit, A.L., P. de Willigen, A.A. Pronk (2009).

Plaatsing als strategie voor efficiëntere fosfaatbemesting. 1. Literatuur en modelonderzoek. 28 p.

Tarafdar, J.C., H.Marschner (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

Verlinden, G., B. Pycke, J. Mertens, F. Debersaques; K. Verheyen, G. Baert, J. Bries, G. Haesaert (2009) Application of Humic Substances Results in Consistent Increases in Crop Yield and Nutrient Uptake *Journal of Plant Nutrition*, 32: p.1407–1426

Vierveijzer, H.C., A. Lepelaar, A. J. Dijkstra (1979)

Analysemethoden voor grond, rioolslib, gewas en vloeistof, p.19-22.

Vierveijzer, H.C., A. Lepelaar, A. J. Dijkstra (1979)

Analysemethoden voor grond, rioolslib, gewas en vloeistof, p.23-26.

Wander, J., H.J., Russchen, H. van den Akker, &, T.A. van Dijk (2010), Vloeibare meststofsysteemen in consumptieaardappelen. Resultaten veldproeven 2009 en 2010. p. 69.

Wang X.J., ZQ Wang (1995) The effect of humic acids on the availability of phosphorus fertilizers in alkaline soils *Soil use and management*, Volume 11:2 p. 99-102

Werff P.A. van der, Dekkers Th.B.M., Oenema O. (1995)

Fosforkringloop en ecologische aspecten van de fosfaathuishouding

In: A.J. Haverkort & P.A. van der Werff (Eds), Hoe ecologisch kan de landbouw worden? AB-DLO Thema's 3. AB-DLO, Wageningen/Haren, pp. 17-35

Werff, P.A. van der, 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 p.41-44.

Wild A (ed.) (1988)

Russell's Soil Conditions & Plant Growth. Longman Group UK Limited, Harlow, Essex, England. Eleventh edition, p. 991.

Willems, W.J., A.H.W. Beusen, L.V. Renaud, H.H. Luesink, J.G. Conijn, G.J. v.d. Born, J.G. Kroes, P. Groenendijk, O.F. Schoumans, H. v.d. Weerd (2007)

Verkenning milieugevolgen van het nieuwe mestbeleid- Achtergrondrapport Evaluatie Meststoffenwet 2007132 p.