

**Telen bij lage
fosfaatniveaus in de
biologische landbouw;
achtergronden en
literatuurstudie**

LOUIS BOLK
I N S T I T U U T

*Bart Timmermans
Wijnand Sukkel
Jan Bokhorst*

de natuurlijke kennisbron

*Een uitgave van het Louis Bolk Instituut
in samenwerking met*



WAGENINGEN UR
For quality of life

© 2012 Louis Bolk Instituut
Telen bij lage fosfaatkiveaus in de biologische
landbouw; achtergronden en literatuurstudie,
Bart Timmermans, Wijnand Sukkel
en Jan Bokhorst,
Aantal pagina's: 32,
publicatienummer 2012-029 LbP

www.louisbolk.nl

Voorwoord

Fosfaat is belangrijk in de biologische landbouw. Het opraken van fossiele voorraden en emissies naar het oppervlaktewater maken het noodzakelijk het gebruik van fosfaatmeststoffen te beperken en kringlopen na te streven. In de praktijk van de biologische landbouw is er al gauw een fosfaatoverschot op de mineralenbalans wanneer men niet oplet. Aan de andere kant blijkt dat er in de praktijk ook goed geteeld kan worden bij zeer lage fosfaatgehalten in de bodem. Redenen genoeg om een en ander nader te analyseren. Dit onderzoek, uitgevoerd door het Louis Bolk Instituut in samenwerking met Praktijkonderzoek Plant en Omgeving (PPO, WUR), is mogelijk gemaakt binnen het budget van het onderzoeksprogramma Biologische Landbouw van het ministerie EL & I. Dank aan Peter van Erp van Bgg AgroXpertus en Geert-Jan van der Burgt van het LBI voor het doorlezen en becommentariëren van concepten van deze studie.

Inhoud

Voorwoord	3
Inhoud	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
2 De opname van fosfaat door planten	11
3 Fosfaat in de bodem	13
3.1 Het voorkomen van fosfaat in de bodem	13
3.2 Analyse van beschikbaar fosfaat in de bodem	14
3.3 Fosfaatsituatie op kleigronden met akkerbouw	17
4 Bodemprocessen	19
4.1 Organisch fosfaat	19
4.2 Bodemstructuur en beworteling	20
4.3 Reactie van de plant op lage fosfaatgehalten	23
4.4 Bodemleven	23
4.5 Mycorrhiza	23
4.6 Interactie van fosfaat opname met andere (an)ionen	24
4.7 Stikstofbinding bij lage fosfaatvoorziening	24
5 Conclusies	27
6 Praktische maatregelen en vervolgonderzoek	29
7 Literatuur	31

Samenvatting

Door jarenlang bemesten en importeren van veevoer en kunstmest zijn in Nederland de meeste bouwlanden rijk aan fosfaat, met uitspoeling en afspoeling naar het oppervlaktewater tot gevolg. Fosfaatvoorraden wereldwijd zijn echter eindig. Het beleid is de afgelopen jaren veranderd, en er zijn fosfaatnormen ingesteld die een overmatige bemesting aan banden leggen. De fosfaatnormen voor bouwland hangen af van bodemmetingen (Pw). Ook het meeste bouwland in de Biologische landbouw is rijk aan fosfaat, maar in Flevoland zijn er een aantal bedrijven die sinds jaren bij lage fosfaatgehalten en fosfaataanvoer telen. De Zonnehoeve doet dit al sinds 1981. Opbrengsten bleven hier bij lage Pw gehalten relatief hoog. In dit literatuuronderzoek willen we hier een licht op werpen en kennis maar ook open vragen omtrent het gedrag van fosfaat in de bodem en de interactie met gewassen op een rij zetten.

De opname van fosfaat door planten gebeurt na mineralisatie, in de vorm van fosfaat-anionen. Planten doen dit actief door uitstoot van bv. protonen en zijn hier relatief goed in (hoge affiniteit). Het is dan ook niet de opnamesnelheid die beperkend kan worden, maar de beschikbaarheid van het gemineraliseerde fosfaat in de bodem. Planten hebben een aantal manieren om om te gaan met minder bodemfosfaat: ze kunnen 'sparen' (langzamere groei), investeren in meer of diepere wortels of met exudaten de wortelomgeving veranderen. Dit laatste kan direct door verzuring van de rhizosfeer via uitstoot van zuren of uitstoot van meer fytaat en indirect, door het stimuleren van mineralisatie door micro-organismen. De fosfaatanionen in de bodemoplossing die planten opnemen verplaatsen door de bodem middels diffusie. Dit is een langzaam proces. Daarbij komt dat de anionen kunnen worden geadsorbeerd aan positief geladen bodemdeeltjes. Deze reactie is echter omkeerbaar en desorptie van fosfaat zorgt voor een gedeelte van de nalevering. Bodemfosfaat komt voor in minerale verbindingen (aluminium fosfaten, ijzerfosfaten en calciumfosfaten) en in organische verbindingen (fosfaat monoesters (vooral fytaat), diesters en fosfonaten). De verdeling van de verschillende fosfaatvormen in een grond kan gemeten worden met de methode van Chang en Jackson (1958).

Er zijn veel verschillende analysemethoden om bodemfosfaat te meten. Vaak wordt gekozen voor een combinatie van makkelijk en moeilijk te extraheren methodes. Veel gebruikte extractiemethoden voor beschikbaar bodemfosfaat zijn P-PAE, Spurway-analyse, Pw, P-Olsen en P-Al. Het probleem van deze extractiemethoden is dat ze allen worden uitgevoerd aan de gehele bodem, en geen rekening houden met beworteling, bodemcompactie of mineralisatie uit organisch fosfaat. Blgg agroxpertus heeft, in samenwerking met NMI, onlangs een meer mechanistische methode ontwikkeld gebaseerd op metingen van direct beschikbaar fosfaat (intensiteit genoemd, door P-PAE) en metingen van de mogelijke nalevering (capaciteit genoemd, P-Al). Deze methode is een verbetering, maar ook hier wordt geen rekening gehouden met beworteling, bodemstructuur en mineralisatie uit organisch fosfaat.

Bodemfosfaat op bouwland is in het verleden vooral gemeten met behulp van het Pw-getal. Historische gegevens van akkerbouw op kleigrond laten een vergelijkbare situatie zien voor biologische en gangbare landbouw: lage gehalten komen weinig voor, voldoende tot hoog zijn evenredig aanwezig. Pw getallen zijn vaak hoger op oudere biologische bedrijven, doordat mest

wordt gegeven om het organische stofgehalte en de stikstofvoorziening beide te verzorgen. Onbedoeld wordt er dan te veel fosfaat gegeven. De verwachting is dat het huidige mestbeleid dit niet drastisch zal veranderen.

Aan de onvolledigheid van de bestaande bodemanalyses liggen een aantal nog onvoldoende onderzochte zaken ten grondslag: een eerste is de rol van organisch fosfaat. Het is in veel bodems 30 tot 90 procent van het totale fosfaat. Het wordt niet meegenomen bij de standaard bodemanalyses. Er zijn internationaal een aantal aanwijzingen dat het van belang is voor plantenvoeding, maar harde kwantitatieve gegevens over hoe groot deze rol in verschillende bodems en voor verschillende gewassen is ontbreken.

Een tweede punt is de rol van bodemstructuur en beworteling. Uit een modelberekening in combinatie met literatuurgegevens blijkt dat een gewas fosfaat opneemt uit enkele procenten tot maximaal zo'n 40 procent van het totale bodemvolume. Met compactie is hierbij nog geen rekening gehouden. Deze cijfers zijn ontvullend te noemen.

De plant kan reageren op lage fosfaatgehalten door aanpassing van de wortelmorfologie en door symbiose met mycorrhiza's aan te gaan, of door enzymen (bv. fosfatase) of stoffen die fosfaattransport ondersteunen uit te scheiden. Het bodemleven (inclusief regenwormen) kan fosfaat mineraliseren en is van belang voor een goede fosfaatvoorziening. De wijze waarop dit proces gestuurd kan worden is nog onvoldoende bekend.

Landbouwgewassen kunnen symbiose aangaan met endotrophe Vesiculaire-Arbusculaire mycorrhiza's (VA). Deze schimmels zorgen voor een soort 'uitbreiding' van het eigen wortelsysteem, vergroten hiermee het worteloppervlak en de fosfaatopname. De fosfaatopname gaat bij deze schimmels ook efficiënter dan bij wortels van landbouwgewassen. Een lage voedingstoestand van fosfaat, maar ook van stikstof van de bodem stimuleert de symbiose van gewassen. Het verschilt per soort gewas: zaaiuien hebben een klein wortelstelsel maar veel symbiose, aardappels en tarwe hebben beperkte symbiose en bieten en koolgewassen gaan geen symbiose aan. De symbiose wordt beïnvloed door voorvrucht en grondbewerking. Stikstofbinding door vlinderbloemigen is belangrijk voor de biologische landbouw, en hiervoor is voldoende kalium van groot belang. Echter, over de gevolgen van lage bodemfosfaatgehalten op stikstofbinding zijn er nog geen gegevens beschikbaar.

We concluderen dat fosfor zich in anorganische en organische vorm in de bodem bevindt. Beide lijken van belang voor plantenvoeding, maar over de verhouding waarin deze bronnen een rol spelen voor akkerbouw op kalkhoudende klei en zavelgronden is nog onvoldoende bekend. De huidige bodemanalyses worden verbeterd, maar er wordt vooral anorganisch fosfaat geanalyseerd. Planten hebben veel mechanismen om fosfaat op te nemen, maar het speelt zich allemaal heel dicht bij de wortel af en de meeste potentieel beschikbare fosfaat is daarom toch niet effectief beschikbaar. De bodemstructuur en beworteling bepalen het deel van de bodem dat toegankelijk is. Verzorging van de bodemstructuur en stimulering van het bodemleven zijn belangrijke maatregelen om bij lage fosfaatniveau's te kunnen telen. Dat biologische bedrijven die dit goed verzorgden langere tijd zonder fosfaatgebrek goed konden telen is gezien de aard van de processen aannemelijk.

1 Inleiding

Fosfaatvoorraden zijn eindig, net als olievoorraden. Wereldwijd is fosfaat winbaar in slechts een paar landen en het zal naar verwachting ergens in de nabije toekomst opraken. De eindigheid van de fosfaatvoorraden gaat steeds meer de voedselproductie bepalen. Lokaal in Nederland zijn er echter overschotten die het gevolg zijn van het importeren van veevoer en kunstmest van elders gedurende langere perioden. Op het moment neemt het gebruik van fosfaatmeststoffen sneller toe dan de voedselproductie (Hinsinger, 2011). In Nederland is een groot deel van de landbouwpercelen erg rijk aan fosfaat, met af- en uitspoeling naar het oppervlaktewater tot gevolg. De wetgeving op dit punt is aan het veranderen. Bij de voedselproductie moet de aandacht steeds meer gaan in de richting van kringlopen met een minimale verspilling van fosfaat. Er zijn maxima voor fosfaatbemesting vastgesteld (fosfaatnormen) die, afhankelijk van de hoogte van het Pw getal, voor bouwland in 2012 65-85 kg P₂O₅ per hectare toelaten. Omdat in veel soorten mest vaak relatief veel fosfaat zit, wordt door deze normen in de biologische landbouw ook stikstof een probleem. Daarnaast is de verwachting dat in de toekomst fosfaatvoorraden in bouwland zullen afnemen en op grotere schaal fosfaatarmere situaties zullen ontstaan. Toch lijkt de aandacht die fosfaat krijgt bij de bemesting eigenlijk een beetje vreemd want planten hebben maar weinig fosfaat nodig. De reden dat fosfaat terecht toch veel aandacht krijgt heeft te maken met de slechte oplosbaarheid van fosfaat in de bodem. In het verleden werd in de gangbare landbouw de oplossing gevonden door gebruik van wateroplosbare fosfaatmeststoffen. Het is op langere termijn wel mogelijk om op deze wijze de fosfaatbeschikbaarheid te verbeteren, maar dat gaat niet direct, maar indirect. Het is de bodem die de plantbeschikbare fosfaat levert en maar ten dele de meststof. Wanneer de bodem dat niet kan is het op korte termijn niet mogelijk om het probleem goed op te lossen met water oplosbare fosfaatmeststoffen.

In de biologische landbouw wil men op een duurzame wijze landbouw bedrijven. Er ligt dan wat fosfaat betreft een flinke taak te wachten: wanneer een biologisch bedrijf ouder wordt gaat het fosfaatgehalte van de bodem steeds meer het wenselijke niveau overstijgen (Bokhorst, 2011). In Flevoland zijn er biologische bedrijven die een andere koers insloegen en bij lage fosfaatgehalten in de bodem en een lage aanvoer van fosfaat teelden. Het bedrijf de Zonnehoeve in Zeewolde doet dit al sinds 1981. Wat zijn nu de consequenties van een ander beleid? Wat er gebeurt er nu precies rond fosfaat in de bodem en hoe kies je de goede maatregelen: hoe laag kun je gaan? En hoe is dit te meten? Dit zijn de vragen waarop in het volgende rapport zal worden ingegaan.

2 De opname van fosfaat door planten

In het algemeen wordt aangenomen dat planten fosfaat opnemen in de vorm van fosfaat-anionen (negatief geladen deeltjes). In de meeste bodems wordt deze opname beperkt doordat de anionen in te lage concentratie in de bodemoplossing aanwezig zijn (< 5 micromolair), of omdat de diffusie snelheid en de evenwichtsreactie in de bodem die de concentratie in stand houden geen voldoende aanvoer waarborgen. De bodemoplossing bevat vaak organische fosfaatverbindingen in veel hogere concentraties dan die van fosfaat-anionen, maar toch zijn er geen aanwijzingen dat andere vormen van fosfaat dan mineraal fosfaat direct door planten worden opgenomen. Met andere woorden, mineralisatie van organisch fosfaat tot fosfaat-anionen lijkt nodig alvorens planten het kunnen opnemen.

Vrij recent heeft men in planten genen geïdentificeerd die coderen voor membraantransporterende eiwitten, die met name te vinden zijn in de membranen van cellen in de wortel-epidermis, en dan vooral in de wortelharen. Deze hebben een hoge affiniteit voor fosfaat-anionen (HPO_4^{2-} en H_2PO_4^- , K_m van 3 micromolair). Ze worden actief bij fosfaat-deficiëntie en zorgen voor proton-uitstoot, zodat fosfaat-anionen tegen een concentratiegradiënt van een factor 2 tot 3 toch naar binnen kunnen worden getransporteerd. Dus met andere woorden: binnen is de fosfaat concentratie twee tot drie keer hoger dan buiten, maar door protonen actief (kost energie) uit te stoten en de wortelomgeving te verzuren wordt de osmotische waarde buiten de wortels hoger, en kunnen de fosfaat-anionen naar binnen stromen. Omdat planten op deze manier erg goed zijn in het opnemen van fosfaat-anionen is het waarschijnlijk dat niet de opname zelf limiterend of te langzaam is. Het is de mineralisatie of het in oplossing komen van fosfaat in het bodemvocht in de rhizosfeer die de opname van fosfaat beperkt.

Planten hebben daarnaast nog een aantal andere mechanismen om om te gaan met fosfaat-limitatie. Hierbij horen spaarstrategieën: langzamere groeisnelheden en veranderd fosfaatmetabolisme (intern hergebruik), maar ook veranderingen in wortelstructuur, of wortelfuncties, om meer fosfaat op te kunnen nemen. Aanpassingen van de wortels wat betreft bijvoorbeeld wortelgroeisnelheid, wortellengte, hoeveelheid vertakkingen, worteldiepte, hoeveelheid en lengtegroei van wortelharen zijn belangrijke mechanismen die ervoor zorgen dat een groter deel van de bodem beschikbaar is of beter benut kan worden voor fosfaatopname. Symbiose met schimmels is nog een extra belangrijk mechanisme om bodemfosfaat te bereiken: de schimmels voorzien nl. in een 'uitbreiding' van het eigen wortelsysteem.

Planten kunnen ook de wortel-omgeving chemisch en fysisch veranderen door exudaten uit te scheiden. Deze kunnen de fosfaat-beschikbaarheid beïnvloeden, direct doordat ze bv. de pH veranderen, of indirect doordat ze micro-organismen stimuleren meer fosfaat te mineraliseren (Read *et al.*, 2003). Verzuuring van de rhizosfeer en uitstoot van organische zuren zijn de bekendste van deze processen. Zo is dit bijvoorbeeld voor witte Lupine uitgebreid beschreven: de planten maken speciale wortels, proteïde wortels genoemd, als reactie op fosfaat-deficiëntie en scheiden hiermee lokaal grote hoeveelheden organische zuren uit om de fosfaat-beschikbaarheid te vergroten (bv. beschreven in Vance *et al.*, 2003). Een toename van de fosfataseactiviteit in de rhizosfeer wordt ook waargenomen als respons op fosfaatdeficiëntie, en kan ook als een aanpassing worden gezien.

3 Fosfaat in de bodem

3.1 Het voorkomen van fosfaat in de bodem

Wanneer planten vocht onttrekken uit de bodem komt bijvoorbeeld het aanwezige nitraat ook in de plant. Bij fosfaat is dat ook wel het geval, maar de hoeveelheid is gering. Fosfaat wordt in de bodem voornamelijk door diffusie verplaatst. Dat wil zeggen dat een concentratieverschil het transport bepaalt. Dit is een traag proces. Bovendien wordt het negatief geladen fosfaat aan positief geladen plaatsen in de grond geadsorbeerd. Deze binding is niet sterk, zodat dit fosfaat makkelijk kan oplossen in het bodemvocht en zo beschikbaar kan komen voor de plant: de desorptie van bodemfosfaat. Desorptie zorgt voor een deel van de nalevering van beschikbaar bodemfosfaat als planten het opnemen uit de bodemoplossing. De positief geladen plaatsen in de bodem, bijvoorbeeld de randen van kleimineralen, zijn echter beperkt aanwezig.

De bronnen van fosfaat zijn mineraal en organisch.

De minerale fosfaten in neutrale en basische gronden bestaan voornamelijk uit fluorapatiet ($\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$) of hydroxyapatiet ($\text{Ca}_{10}\text{OH}_2(\text{PO}_4)_6$).

In zure gronden zijn het vooral ijzerfosfaat ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) en aluminiumfosfaat ($\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). Fosfaten in de bodem zitten vooral in de fractie $< 0,002$ mm.

De verdeling van de verschillende fosfaatvormen in een grond kan gemeten worden met de methode Chang en Jackson (1958).

Voor de verschillende fosfaatvormen wordt de grond achtereenvolgens geëxtraheerd met:

1. NH_4Cl 1n: wateroplosbaar fosfaat
2. NH_4F 0,5n: aluminiumfosfaat
3. NaOH 0,1n: ijzerfosfaat
4. H_2SO_4 0,5n: calciumfosfaat
5. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{Na}$ dithioniet 0,3n: in ijzeroxide ingesloten ijzerfosfaat
6. Na_4F : in ijzeroxiden ingesloten aluminiumfosfaat

Vervolgens wordt totaal fosfaat bepaald door een extractie met geconcentreerd zuur ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HCl}$). Het verschil tussen de som van de verschillende fracties en totaal fosfaat is organisch fosfaat.

Het organische deel van het fosfaat in de bodem is meer dan 30% van het totale fosfaat, maar kan oplopen tot wel 80% van het totale fosfaat (Dalal, 1977). Het meeste hiervan is geassocieerd met bodemcomplexen met een relatief hoog molecuulgewicht. Verschillende chemische extractietechnieken in combinatie met NMR (nuclear magnetic resonance, Cade-Menun, 2005) procedures hebben laten zien dat het merendeel van het organische fosfaat in bodems bestaat uit fosfaat monoesters (tot 90%) en een kleiner deel bestaat uit fosfaat diesters en fosfonaten. De

meeste fosfaat monoesters bestaan weer uit fytaat (hier bedoeld als alle metaal-ion-derivaten van inositol hexa- en pentakifosfaten). In contrast hiermee vormen de fosfaatdiesters (voornamelijk nucleïnezuren en fosfolipiden) slechts een klein deel van het organische fosfaat, meestal rond de 5% (Dalal, 1977). Het belang voor plantopname van de verschillende vormen van organisch fosfaat voor planten is echter niet zomaar aan hun grootte af te lezen: de omzettingssnelheid is hierbij namelijk ook van belang. Deze is hoger bij fosfaatdiesters dan bij fytaat en daarom kan de bijdrage van diesters dan ook van belang zijn voor planten en gewassen.

Het gehalte aan organisch fosfaat in enkele gronden is weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Gehalte aan organisch fosfaat in Nederlandse gronden
(Van Diest, 1971)

Regio	Organische koolstof mg/kg	Organisch fosfor mg/kg	Verhouding <u>org C/org P</u>
Flevoland, bouwland	14200	39	364
Zeeland, bouwland	21100	193	109
Zeeland, grasland	51900	250	208
Veluwe, bouwland	19200	168	114

3.2 Analyse van beschikbaar fosfaat in de bodem

Bij een bodemanalyse gaat het er om inzicht te krijgen in de beschikbaarheid van fosfaat voor de plant. Vaak wordt dan gekozen voor een combinatie van makkelijk te extraheren fosfaat en moeilijk te extraheren fosfaat. In het laboratorium zijn hiertoe verschillende extractiemiddelen te kiezen, maar het is de vraag of in het veld die grens wel bestaat (van Diest, 1971). Het ligt voor de hand dat die grens flexibel is en afhankelijk is van:

- soort gewas. Meerjarige gewassen en gewassen met een langere groeidiur kunnen meer opnemen.
- wortelstelsel. Gewassen met een uitgebreid wortelstelsel kunnen meer opnemen.
- bodemstructuur. Een betere bodemstructuur geeft meer bewortelingsmogelijkheden en meer mogelijkheden tot fosfaatopname.-kwaliteit en kwantiteit van het bodemleven.
- vochtgehalte en temperatuur. Voldoende vocht en een hogere temperatuur geven een hogere vrijmaking van fosfaat door fysische en biologische processen.
- mycorrhiza.

Ook van Riemsdijk, hoogleraar WUR sectie bodemkwaliteit (Russchen et al., 2011) stelt in een workshop in 2010 dat een nauwkeurige voorspelling van de fosfaatlevering door bodemanalyses nog niet te geven is.

Studies rond fosfaat moeten worden uitgevoerd onder omstandigheden die zeer nauw lijken op de werkelijke omstandigheden in de bodem (Schachtman et al., 1998). Onderzoek op deze wijze is moeilijk en gekozen wordt voor potproeven met een bodemstructuur, bodemleven en jaarritme dat ver af staat van de werkelijkheid.

De bodemanalyse is dus altijd een benadering.

De belangrijkste analysemethoden in Nederland om de beschikbaarheid van fosfaat te beoordelen zijn: P-CaCl₂ (=P-PAE), Spurway-P, Pw-getal, P-Olsen en P-Al. Dit is maar een deel van de analyses die er gebruikt worden. In de EU gaat het om totaal ca 27 analyses.

P-PAE, mg P per 100 g grond

Wordt gebruikt door het Bgg. Een lage concentratie zoutoplossing van CaCl₂ (0,01 M) wordt als extractiemiddel gebruikt. Een gebruikelijke P-PAE van 1 mg P per 100g droge grond is ongeveer 7 kg P₂O₅ per ha. Bij een minder goede bodemstructuur en beworteling is dit niet allemaal beschikbaar voor de plant. Planten nemen bijvoorbeeld 75 kg P₂O₅ per ha op. Veel meer dus dan de P-PAE aangeeft.

Spurway-analyse, kg P per ha

Deze methode wordt toegepast door Altic. De grond wordt geëxtraheerd met 0,018 N (Normaal, is bij eenwaardige zuren gelijk aan 0,018 M) azijnzuur. Gemiddeld wordt er zo'n 25 kg P₂O₅ per ha gemeten en de methode zit daarmee tussen de P-PAE en de Pw in.

Pw, mg P₂O₅ per liter grond

Na bevochtiging gedurende 24 uur wordt een 1:60 (v/w) extract gemaakt. De klassieke methode, maar door meerdere laboratoria nog gebruikt. Water is het extractiemiddel. Het is de methode die gebruikt wordt om toestemming te krijgen voor hogere fosfaatgiften dan de geldende gebruiksnorm. Een Pw van 25 mg P₂O₅ per l betekent ca. 75 kg P₂O₅ per ha. De liter grond heeft betrekking op het volume van gedroogde gemalen grond. Een liter droge gemalen grond weegt ongeveer 1 kg.

P-Olsen, mg P per kg grond (ook wel mg P per 100 g en µmol P per kg)

Wordt internationaal veel gebruikt. Het extract heeft een pH van 8,5 en meet daarom vooral ijzer- en aluminiumfosfaten. In Nederland met veel kalkrijke gronden wordt het daarom weinig gebruikt. P-Olsen meet minder fosfaat dan P-Al.

P-Al, mg P₂O₅ per 100 g grond

In Nederland veel gebruikt, daarbuiten weinig. Als extractiemiddel wordt ammoniumlactaatazijnzuur gebruikt (1:20 (w/w) extract met 0,1 M ammoniumacetaat en 0,2 M azijnzuur). Dat heeft een pH van 3,75 en je verwacht dan dat er vooral calciumfosfaten worden geanalyseerd maar dat is niet zo omdat de melkzuur ijzer en aluminium complexeert en dit extract meet daarom ook ijzer- en aluminiumfosfaten. P-Al meet globaal zo'n 30% van alle fosfaat in de grond. Een P-Al van 30 is ca 1200 kg P₂O₅ per ha.

Het dilemma van de bodemanalyse van de beschikbare fosfaat

De in het bodemvocht opgeloste fosfaat, de voor de plant beschikbare fosfaat en de extraheerbare fosfaat staan aangegeven in Tabel 2.

Tabel 2. Fosfaat in bodem, plant en analyse extract

	Kg P₂O₅ per ha
Aanwezig in de bodemoplossing	1
Opname door het gewas	50-100
P-CaCl ₂ waardering voldoende	10
Pw-getal waardering voldoende	75
P-Al waardering voldoende	1200

De werkelijkheid:

Fosfaatvrijmakingsprocessen spelen zich vooral af dicht bij de wortels, dicht bij de mycorrhiza, in gangen met dode wortels en dood bodemleven. Meestal zijn grote delen van de grond niet betrokken bij de vrijmakingsprocessen. Wat er binnen in de structuurelementen vrijgemaakt wordt komt slechts ten dele beschikbaar voor de plant omdat het transport via diffusie plaats moet vinden en dit proces te traag is om plantbeschikbare fosfaat aan te voeren.

De analyse op het laboratorium:

De gehele structuur van de bodem, van kluiten tot gangen en levende en dode organismen wordt verstoord bij drogen en malen. Door het malen kan enerzijds het binnenste van dichte structuurelementen nu wel meedoen aan vrijmaking van fosfaat, anderzijds krijgt het bodemleven geen tijd om dat te doen wat er gedurende het hele groeiseizoen in het veld gebeurt. Dat deze beide totaal uiteenlopende processen elkaar precies opheffen is niet waarschijnlijk.

P-CaCl₂: wanneer deze slechts 10 kg P₂O₅ per ha levert, ook nog de niet bereikbare fosfaat analyseert en er 50 tot 100 kg per ha nodig is voor plantopname, dan is duidelijk dat deze analyse alleen geen goed beeld geeft van het proces in het veld.

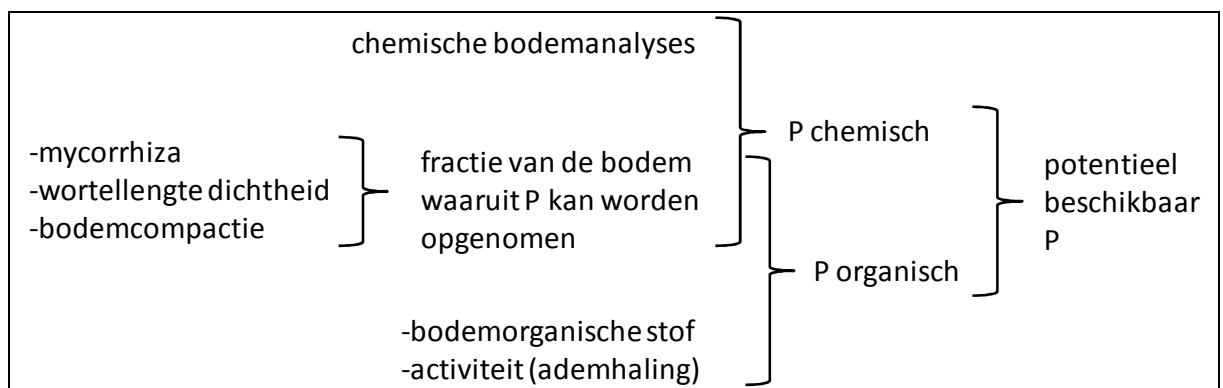
Pw-getal: van 75 kg per ha komt aardig in de buurt, maar ook hier is de fosfaat in de voor de plantenwortel niet bereikbare plaatsen meegenomen in de meting en ook andere belangrijke factoren zoals de activiteit van het bodemleven laat het Pw-getal niet zien.

P-Al: 1200 kg. Deze extraheert zoveel meer dan werkelijk in een jaar vrijkomt dat een goede correlatie onwaarschijnlijk is.

Naar aanleiding van het promotie onderzoek van van Rotterdam-Los (2010) heeft Blgg AgroXpertus in samenwerking met het NMI een nieuwe methode ontwikkeld om plantbeschikbaar bodemfosfaat te meten. Deze methode is gebaseerd op metingen van het binden van fosfaat aan ijzerpapiertjes. Het gaat hierbij om al eerder onderzochte gronden, die bevochtigd zijn (4 g grond in 40 mL 0.01 M CaCl₂) en waarin onder continu schudden ijzerpapiertjes zijn gehangen, die verwijderd worden op gezette tijdstippen, van 2 uur tot 20 dagen. De gronden bleken verschillende karakteristieken te vertonen: sommige gronden waren initieel rijk aan fosfaat, maar het fosfaatgehalte nam snel af en

vervolgens kwam slechts langzaam gebonden fosfaat vrij. Andere gronden waren initieel minder rijk aan beschikbaar fosfaat, maar hieruit kwam in een behoorlijke snelheid gebonden fosfaat vrij. Dit heeft ertoe geleid dat volgens de nieuwe methode niet alleen de hoeveelheid direct beschikbaar fosfaat, 'intensiteit' genoemd, gemeten wordt, maar ook rekening gehouden wordt met de nalevering van gebonden (en niet beschikbaar) fosfaat uit de bodem, de 'capaciteit' genoemd. Voor beschikbaar fosfaat hanteert men P-calciumchloride (P-PAE), en voor de snelheid van nalevering de P-AI. Via multivariate analyse is een formule met deze twee maten, en met de ratio tussen de twee, gemaakt waarmee het bodemfosfaatiniveau kan worden gekarakteriseerd.

Het probleem van deze aanpak is dat het verschil tussen wat er in het veld en in het laboratorium gebeurt niet opgevangen wordt. De benadering is een verbetering, maar we zijn er nog niet. Dat er bij bijvoorbeeld een laag Pw-getal een goede fosfaatbeschikbaarheid mogelijk is, is waarschijnlijk, mits de omstandigheden in de bodem dat toelaten. De oorzaak van de beperkte waarde van bodemanalyses of combinaties ligt in de aard van de bodemprocessen en opbouw van de bodem en het wortelstelsel in de praktijk. Hierop zal in hoofdstuk 4 nader ingegaan worden. In de standaard bodemanalyses worden metingen aan de gehele grond uitgevoerd, na drogen en malen en een van de mogelijke extractiemethoden. Dit geldt ook voor de nieuwe methode van Blgg AgroXpertus en het NMI. Ook wordt hierin het organische fosfaat en de mineralisatie hieruit door het bodemleven niet meegenomen, aangezien er is gewerkt met gedroogde gronden. Daarbij komt dat het werkelijke proces heel anders is: een plant haalt zijn fosfaat uit slechts een beperkt deel van de bodem, gedeeltelijk in samenwerking met micro-organismen zoals mycorrhiza's (die het worteloppervlak vergroten) en micro-organismen die organisch fosfaat mineraliseren in de rizhosfeer. De wortels zullen moeilijkheden hebben om in de compacte delen van de bodem door te dringen. Idealiter zou er een schema moeten worden toegepast als in Figuur 1, met voor elke schakel zijn eigen meetmethode.



Figuur 1. Schematische weergaven van de factoren die invloed hebben op plantbeschikbaar fosfaat.

3.3 Fosfaatsituatie op kleigronden met akkerbouw

In het verleden was het Pw-getal verreweg de meest gebruikte analyse in de akkerbouw. De hoogte van het Pw-getal in het verleden bij kleigronden met akkerbouw is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3. De hoogte van het Pw getal in de biologische en gangbare akkerbouw op kleigronden.

Pw-getal (mg P₂O₅/l)	Waardering	% gangbaar 1998-2003 1)	% biologisch 2004 2)
<11	Zeer laag	1	0
11-20	Laag	7	12
21-30	voldoende	20	29
31-45	Ruim voldoende	35	23
46-60	Vrij hoog	20	16
>60	hoog	16	19

1)Schoumans, 2007.

2)Bokhorst, 2010

Gangbaar en biologisch (31 aselekt gekozen biologische akkerbouwbedrijven) vertonen een vergelijkbaar beeld. Lage gehalten komen weinig voor, voldoende tot hoog zijn evenredig aanwezig. In deze aselekte groep is het zo dat op oudere biologische bedrijven het Pw-getal hoger is dan op bedrijven die nog maar kort biologisch zijn. Dit beeld komt niet uit alle studies naar voren, waarschijnlijk omdat de bedrijven in een andere studies bewust met bemesting omgingen. Dat er op veel bedrijven hoge Pw getallen worden gevonden hangt samen met de bemestingsgewoonten. Vaak wordt mest gegeven om het organische stofgehalte en de stikstofvoorziening beide te verzorgen. Onbedoeld wordt er dan bijvoorbeeld met vaste mest meer fosfaat gegeven dan met de gewassen wordt afgevoerd en stijgt het Pw-getal. Dit laatste geeft aan dat het bemestingsbeleid in de biologische landbouw moet veranderen om in een situatie met lage Pw-getallen te komen. De huidige mestwetgeving stuurt al enigszins in die richting, maar zal een stijging niet voorkomen omdat door wat lagere opbrengsten de afvoer van fosfaat biologisch wat lager is dan gangbaar en de gebruiksnormen, ook gangbaar, een hogere fosfaatbemesting toestaan dan de afvoer bedraagt. Na 2015 wordt het mestbeleid mogelijk herzien, maar de wijze waarop is nu nog niet bekend.

4 Bodemprocessen

Hoe kan het nu dat de aandacht voor de bodemanalyse zo groot is terwijl de zeggingskracht zo beperkt is. De reden is eenvoudig. De bodemprocessen die de werkelijke beschikbaarheid bepalen zijn zo buitengewoon ingewikkeld dat er heel moeilijk vat op is te krijgen. Door het mondiale belang van fosfaat in de voedselproductie wordt er de laatste jaren wel heel veel onderzoek gedaan, maar er is nog een lange weg te gaan. In de volgende alinea's wordt geprobeerd wat meer helderheid in de duistere bodem te krijgen. Fosfaat is een Grieks woord en betekent lichtdrager, dus wie weet. Eerst wordt ingegaan op organisch fosfaat. Organisch fosfaat is de belangrijkste oorzaak van de ingewikkeldheid van de fosfaatprocessen in de bodem. Andere thema's zijn bodemleven, worteling en bodemstructuur.

4.1 Organisch fosfaat

Het ophopen van de verschillende vormen van organisch fosfaat in bodems wordt door veel processen beïnvloed. Om echter beschikbaar te komen voor planten moet het organisch fosfaat gemineraliseerd worden zodat fosfaat vrijkomt, door hydrolyse van fosfaatesters, fosfoanhydride en fosfonaat. Dit proces gebeurt voornamelijk door fosfatase-enzymen, en wordt gestuurd door de microbiële activiteit in de bodem. Over deze afbraakprocessen is evenwel weinig bekend. Er zijn bij planten veel verschillende mechanismen bij de afbraak van organisch fosfaat en het is waarschijnlijk dat het afbraakproces per gewas verschilt (Turner, 2008).

Er zijn verschillende aanwijzingen dat organisch fosfaat van belang is als fosfaatbron voor planten: in natuurlijke systemen (bossen) in Amerika en Australië laat onderzoek zien dat men mineralisatie van bodemorganisch fosfaat als een van de belangrijke bronnen van plant beschikbaar fosfaat kan beschouwen (bv. Fox en Comerford, 1992). Ook laboratoriummetingen hebben laten zien dat mineralisatie van organisch fosfaat in bodems groot genoeg is om een substantieel deel van de behoefte van planten aan fosfaat te vervullen (bv. Oehl et al., 2001). Steffens et al. (2010) deden onderzoek met potproeven bij diverse gewassen naar de beschikbaarheid van het organische Na-hexaphyrate ($C_6H_6O_{24}P_6Na_{12}$) bodemfosfaat. Dit fosfaat kon niet significant geëxtraheerd worden met de extractiemethoden CAL, DL, $NaHCO_3$, EUF en ME/III. Toch was dit fosfaat gedeeltelijk beschikbaar voor de plant. Vergeleken met wateroplosbaar fosfaat was de opname bij koolzaad, bonen en phacelia ca. 100%, bij lupine en mais ca. 80%, bij suikerbiet, zonnebloem, tarwe en boekweit ca. 60 % en bij rogge ca. 35%. Zij concludeerden dat biologisch omzetbaar organisch fosfaat niet meegenomen wordt bij routine bodemanalyses.

De directe bijdrage van organisch fosfaat aan de plantenvoeding is een tot nu toe onvoldoende onderzochte factor. Het is ook moeilijk te onderzoeken. Om de vraag te beantwoorden welk deel van de fosfaat afkomstig is van organisch gebonden fosfaat en welk deel van anorganisch gebonden fosfaat zijn zeer specifieke onderzoeksmethoden nodig. Wat wel duidelijk is, is dat de mineralisatie van fosfaat in de rhizosfeer vlak bij de wortel moet plaatsvinden om opname door planten mogelijk te

maken, aangezien het vrije fosfaat anders meteen weer gebonden wordt. Bij de opname hiervan concurreert de plantenwortel met micro-organismen.

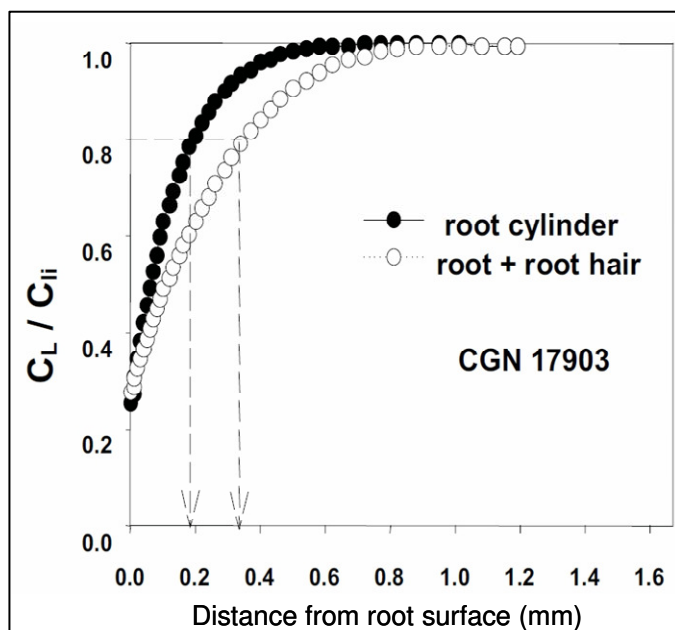
Organisch fosfaat komt in de bodem met gewasresten en mest. Gehalten in mest staan aangegeven in Tabel 4.

Tabel 4. Indicatieve gehalten aan organisch fosfaat in mest en compost. Ehlert, e.a. 2004.

Mestsoort	kg P ₂ O ₅ per ton	Mineraal (%)	Organisch (%)
Vaste rundveemest	3,3	60	40
Rundveedrijfmest	1,5	90	10
Kippendrijfmest	6,7	80	20
Vaste varkensmest	11,8	85	15
Varkendrijfmest	2,6	95	5
GFT-compost	4,4	70	30
Tuinturf	0,6	20	80

4.2 Bodemstructuur en beworteling

Voor de fosfaat opname uit de bodem is het van belang om te realiseren dat in een veldsituatie niet het gehele bodemvolume beschikbaar is voor opname van fosfaat. Fosfaatopname gebeurt namelijk alleen in een heel kleine zone rondom de wortels (de rhizosfeer). De grootte van het stukje bodem rondom de wortels dat planten kunnen gebruiken voor fosfaatopname werd gemeten en met modelberekeningen geschat op minder dan 1 (Lewis & Quirk, 1967; Balemi & Schenk, 2009, Figuur 2) tot maximaal zo'n 2 mm (Bhat & Nye, 1973).



Figuur 2. De fractie overgebleven beschikbaar fosfaat in de bodem (C_L / C_{Li}) als functie van de afstand vanaf het worteloppervlak (x-as, mm). Grafiek afkomstig uit: Balemi & Schenk, 2009.

Om een indruk te krijgen van het effect van zo'n beperkte afstand vanaf de wortel(haren) waarbinnen fosfaatopname plaatsvindt kunnen we enkele berekeningen maken naar analogie van De Willigen & Van Noordwijk (1987). Zij gaan in hun berekeningen uit van een aangepaste Poisson verdeling, die de voor alle willekeurige punten in de bodem berekent welke fractie (P) dichter dan een bepaalde afstand (D, cm) bij een wortel in de buurt zit, gegeven een wortellengtedichtheid (RLD, cm cm⁻³), een aantal worteltopjes per eenheid wortellengte (λ , # cm⁻¹) en de gemiddelde diameter van de wortels (R₀, cm):

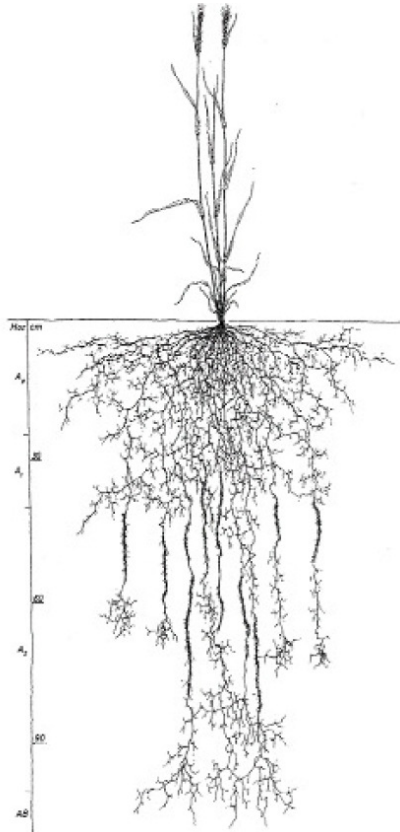
$$P(d < D) = 1 - \pi \text{RLD} (R_0)^2 - \exp(-\pi \text{RLD} (D^2 + 4/3 \lambda D^3))$$

De tweede term aan de rechterkant van het is-teken is een correctie voor het volume van de wortels zelf, en is meestal te verwaarlozen als het over de dunne wortels gaat. Typische diameters van de dunne wortels zitten meestal zo rond de 0.3 mm (bv. voor zomertarwe, Noulas et al., 2010) maar dit deel van de berekening kan dus ook verwaarloosd worden bij gebrek aan informatie. Tabel 5 laat de uitkomst van deze berekening zien voor een aantal verschillende gewassen. Het gaat hier om gegevens van veldproeven in Canada, Zwitserland en Finland, die voor bv. zomertarwe erg met elkaar in overeenstemming zijn. Het resultaat is toch enigszins ontvondend te noemen, in die zin dat bij aanname van de maximale afstand vanaf de wortel waarbinnen fosfaat opgenomen wordt slechts zo'n 12% - 39% van de bodem voor fosfaatopname beschikbaar is. Als de diffusieafstanden voor bodemfosfaat kleiner zijn zoals door de eerste twee van de bovenstaande auteurs wordt beweerd, wordt dit beeld nog extremer (zie berekeningen onder de aanname van 1 mm fosfaatopname vanuit de wortel), en gaat het om maximaal 10 % van het bodemvolume waaruit de plant fosfaat kan opnemen.

Tabel 5. De fractie van de bodem waaruit wortels fosfaat kunnen opnemen, voor verschillende gewassen, bij berekening met 1 en 2 mm als afstand vanuit de wortel waarbinnen fosfaat kan worden opgenomen. Gegevens van Liu et al., 2011, voor veldproeven in Canada onder geïrrigeerde condities, Zomertarwe ook uit Zwitserland (Noulas et al, 2010) en wortel uit Finland (Pietola et al., 1998).

Gewas	RLD cm cm ⁻³	R ₀ mm	Topjes # cm ⁻¹	Fractie bodem voor P opname	
				1 mm vanuit wortel	2 mm vanuit wortel
Koolzaad	2.30	0.28	2.6	0.09	0.39
Vlas	0.64	0.28	1.9	0.02	0.12
Bruine mosterd	1.20	0.28	3.0	0.05	0.24
Kikkererwten	0.79	0.46	3.6	0.03	0.18
Erwten	1.01	0.4	3.0	0.04	0.20
Linzen	0.69	0.41	2.7	0.03	0.14
Zomertarwe	1.78	0.28	2.6	0.07	0.32
Wortel	1.00		2.00	0.04	0.17

Hierbij komt nog het effect van bodemstructuur: immers, niet de gehele bodem is makkelijk doorwortelbaar. Deru & van Eekeren (2010) laten een plaatje uit Duits onderzoek zien van gerst, die compacte stukken in de bodem overbruggt door gebruik te maken van verticale wormengangen (Figuur 3). In de compacte delen van de bodem, die met name te verwachten zijn in kleigronden met een minder goede structuur, kan niet of nauwelijks fosfaat worden opgenomen (Figuur 4).



Figuur 3. Wortels van gerst passeren dichte lagen door verticale gangen van regenwormen. In deze delen zijn er lage wortellengte dichtheden, en wordt waarschijnlijk nauwelijks fosfaat opgenomen. Afkomstig uit: Deru & van Eekeren, 2010.



Figuur 4. Omdat alleen fosfaat uit de directe omgeving van de wortel opgenomen kan worden kan een bodemanalyse die de gehele grond analyseert de fosfaatbeschikbaarheid niet goed beschrijven. Links een intensief bewortelde grond uit de Hoekse Waard en rechts een extensief bewortelde grond uit Flevoland.

Ten slotte speelt het tijdspectief ook nog een rol. De wortelharen, waarmee planten een groot deel van hun fosfaat opnemen, leven slechts kort, met andere woorden het bovenstaande bodemvolume is slechts beperkte tijd (een aantal dagen) beschikbaar voor fosfaatopname door de plant.

4.3 Reactie van de plant op lage fosfaatgehalten

Vanwege de lage oplosbaarheid van fosfaat in de bodemoplossing kan de fosfaatvoorziening van de plant te laag worden. Planten hebben diverse mechanismen die tot een betere fosfaatopname kunnen leiden. Aanpassing van de wortelmorfologie en symbiose met mycorrhiza's zijn voorbeelden. Daarnaast spelen biochemische processen een rol. Enzymen als nuclease en fosfatase worden uitgescheiden evenals stoffen die het fosfaattransport ondersteunen. Ondermeer bij zandraket is hier onderzoek naar gedaan (Chen, et al., 2000) en is aangetoond dat ook fosfaat uit organische fosfaathoudende verbindingen kan worden vrijgemaakt. Het enzym fosfatase draagt bij tarwe en klaver bij aan de omzetting en het beschikbaar maken van organische fosfaatverbindingen (Tarafdar and Jungk, 1987)

4.4 Bodemleven

Voor het bodemleven zijn andere organismen, plantenresten en dieren of resten ervan (organische stof, mest, dode bacteriën) voedingsbronnen. Een deel van de voeding wordt gebruikt voor energie en niet alle fosfaat die deze voedselbronnen bevatten is nodig voor de opbouw van het bodemleven zelf. Fosfaat blijft over en komt vrij. Daarnaast kan het bodemleven ook minerale fosfaten aantasten. Een goed verzorgd bodemleven is belangrijk voor de fosfaatvoorziening, maar over wijze waarop het gestuurd kan worden is nog weinig bekend.

Het beschikbaar maken van fosfaat vindt vooral plaats tijdens het groeiseizoen. Wat vrijgemaakt wordt kan vaak ook direct opgenomen worden en is moeilijk te meten. Het vrijmaken van fosfaat door regenwormen is onder meer duidelijk aangetoond door Sharpley et al. (1977).

4.5 Mycorrhiza

Schimmels die een symbiose aangaan met een landbouwgewas kunnen de fosfaatbeschikbaarheid verbeteren. Het zijn de endotrophe Vesiculaire-Arbusculaire mycorrhiza's (VA). De schimmels vergroten als het ware het worteloppervlak en daarmee de fosfaatopname, maar de fosfaatopname gaat bij deze schimmels ook efficiënter dan bij wortels van landbouwgewassen. Uitscheiding van organische zuren en het enzym fosfatase spelen hierbij een rol. De mate waarin opname van fosfaat plaats vindt is afhankelijk van de omstandigheden:

Het effect van mycorrhiza's is afhankelijk van:

- Fosfaatgehalte van de grond. Lage fosfaatgehalten van de grond stimuleren fosfaatopname door mycorrhiza's (Keltjens, 1999)
- Stikstofgehalte van de grond. De activiteit van mycorrhiza's neemt toe bij lagere stikstofgehalten (Limonard en Ruissen, 1999).
- Grondbewerkingen
- Soort gewas. De mogelijkheid om een symbiose aan te gaan met mycorrhizaschimmels varieert per gewas. Bij zaaiuien liggen de meeste perspectieven vanwege het zwak ontwikkelde wortelstelsel. Ook bij een Pw-getal van boven de 40 kunnen bij zaaiuien op kalkrijke kleigronden in Nederland hoge kolonisatiepercentages optreden (Galván, et al., 2009). Bij aardappelen en tarwe is de symbiose met mycorrhiza beperkt. Bieten en koolgewassen, dus ook groenbemesters als bladrammenas en gele mosterd kunnen geen symbiose met mycorrhiza aangaan.
- Voorvrucht. Uit het onderzoek van van de Werff et al., 1995 bleek dat de voorvrucht een rol kan spelen. Voorvrucht bieten gaf een lagere symbiose dan veldbonen bij gerst. De oorzaak hiervan is niet duidelijk en het is daarom niet mogelijk om dit effect bij andere voorvruchten in te schatten.

4.6 Interactie van fosfaat opname met andere (an)ionen

In de rhizosfeer kunnen verschillende ionen de opname van elkaar beïnvloeden. Dit kan negatief zijn (antagonisme), maar ook positief (faciliatie). Voor fosfaat opname door planten wordt er in de literatuur door diverse auteurs een positieve interactie met stikstof beschreven (Fageria, 2001). Hogere toediening van stikstof leidt hierbij tot hogere stikstof en fosfaat opname. Het mechanisme is onvoldoende bekend, maar voor een deel lijkt het te maken te hebben met verhoogde wortelgroei, een hogere opname en translocatie capaciteit voor fosfaat en een verlaging van pH in de rhizosfeer door opname van NH_4^+ . Er zijn geen aanwijzingen van een negatieve interactie tussen nitraat en fosfaat gevonden. Wel tonen verschillende studies aan dat hoge doses van fosfaat uit mest de beschikbaarheid van zink en ijzer negatief beïnvloeden (Fageria, 2001). Over de onderliggende mechanismen zijn er een aantal theorieën, maar het is niet duidelijk of het hier gaat om een proces dat in de bodem (rhizosfeer) plaatsvindt of juist in de plant zelf. Tot slotte is er een positieve interactie tussen mangaan en fosfaat, en is het de verwachting dat die er ook is met magnesium.

4.7 Stikstofbinding bij lage fosfaatvoorziening

Biologische stikstofbinding is een belangrijke pijler van de biologische landbouw. Stikstofbinding door vlinderbloemigen is sterk afhankelijk van een voldoende kaliumvoorziening. Kan de stikstofbinding in gevaar komen wanneer voor een ander beleid wordt gekozen bij de fosfaatvoorziening? Bij oppervlaktewater is de relatie fosfaat- en stikstofbinding zeer duidelijk. Veel fosfaat geeft een sterke

opbloei van (niet gewenste) stikstofbindende organismen. Of het tegenovergestelde, het werken met lage gehalten aan wateroplosbaar fosfaat in de biologische landbouw, de stikstofbinding juist beperkt is een aandachtspunt, maar voorbeelden waaruit opgemaakt kan worden dat telen bij lage fosfaatkennivau 's de stikstofbinding beperkt zijn niet voorhanden. Bijzonder in dit kader is wel de mengteelt van granen en vlinderbloemigen. Bij deze mengteelt levert de bodem vaak meer fosfaat dan bij een monocultuur het geval is. De reden is nog niet geheel duidelijk. Een rol speelt mogelijk dat de beide gewassen verschillende soorten anorganisch fosfaat aanspreken. Bij de combinatie tarwe en lupine is dit aangetoond. Mogelijk speelt ook de productie van waterstofprotonen bij de stikstofbinding een rol bij de fosfaatvrijmaking (Hinsinger et al., 2011).

5 Conclusies

- Fosfor bevindt zich in anorganische en in organische vorm in de bodem. Beide zijn van belang voor de fosfaatvoorziening van de plant, maar over de verhouding waarin beide bijdragen aan de fosfaatvoorziening bij de akkerbouw en groenteteelt op de Nederlandse kalkhoudende klei- en zavelgronden is nog niet veel bekend. Bij de huidige bodemanalyses wordt vooral anorganisch fosfaat geëxtraheerd.
- Het zijn zowel chemische als biologische processen die fosfaat beschikbaar maken voor de plant.
- Planten zijn erg goed zijn in het (actief) opnemen van fosfaat-anionen, en het is niet de opname zelf die limiterend of te langzaam is. Het is de mineralisatie en het in oplossing komen van fosfaat in het bodemvocht in de rhizosfeer die de opname van fosfaat beperkt.
- De bodemstructuur en beworteling bepalen het deel van de bodem dat toegankelijk is. Dit deel is een fractie van het gehele bodemvolume. De plant zelf kent vele mechanismen om fosfaat op te nemen, maar het speelt zich allemaal heel dicht bij de wortel af en de meeste potentieel beschikbare fosfaat is daarom toch niet effectief beschikbaar.
- Ook recente verbeteringen van de bodemanalyse hebben niet tot gevolg dat de bodemanalyse de fosfaatbeschikbaarheid goed aangeeft. Hierbij wordt nog steeds slechts een gedeelte van het fosfaat (anorganisch fosfaat) gemeten, aan het gehele bodemvolume. Inzicht hierin is van belang om de bodemanalyses van fosfaatbeschikbaarheid te verbeteren.
- Telen bij lage fosfaatkwaliteit gemeten met de huidige extractiemethoden en volgens de geldende normen ($P_w < 20$) is zeer goed mogelijk.
- Voor het telen bij lage P waarden is het van belang dat een gewas P kan opnemen uit een zo groot mogelijk bodemvolume. Factoren die dit vergroten zijn: grote wortellengte, symbiose met mycorrhizas, kruimelige bodemstructuur, actief bodemleven (ontsluiting van organisch fosfaat), en een optimale bemestingsstrategie (geen N-limitatie, maar ook geen overbemesting omdat dit de symbiose met mycorrhizas verkleint).

6 Praktische maatregelen en vervolgonderzoek

Uit de voorliggende studie komt duidelijk naar voren dat voor het telen bij lage fosfaatkonzentraties de bodemontsluiting en de grootte van het contactoppervlak van de wortels met de bodem van groot belang zijn. Dit geldt zowel voor de benutting van anorganisch als voor de benutting van organisch fosfaat.

Maatregelen om een groter deel van de bouwvoor te ontsluiten zijn een goede grondbewerking en het vermijden van bodemcompactie door te vermijden het land op te gaan onder te natte omstandigheden. Er kan hier ook gedacht worden aan bredere banden of rijpadensystemen. Denk ook aan een gevarieerde en ruime rotatie, met daarin een aantal diepwortelende gewassen of groenbemesters, bijvoorbeeld luzerne of koolzaad (diep wortelstelsel), vlinderbloemigen en granen (spreken andere delen van de bodemfosfaat voorraad aan). Voorkom overbemesting met stikstof omdat die mycorrhiza symbiose verkleint.

Uit deze studie komt ook naar voren dat de rol van organisch fosfaat nog onvoldoende kwantitatief onderzocht is. Onderzoek hiernaar zou veel duidelijkheid kunnen scheppen in mogelijke maatregelen voor de akkerbouw in de praktijk. Het gaat dan met name over het kwantificeren van:

- het belang van een hoog bodemorganische stofgehalte bij de fosfaatopname
- inzet van anorganische versus organische meststoffen
- het stimuleren van het bodemleven, bv. door (minimale) grondbewerking (mycorrhizas, wormen), rotaties (gewaskeuze), bemesting

Net zoals er verschillende hoeveelheden anorganisch en organisch fosfaat worden opgebracht bij gebruik van verschillende mestsoorten, zo verschillen ook gewasresten in fosfaathoeveelheid. Om hier een indruk van te geven hebben we uit het NDICEA model de hoeveelheid fosfaat in de gewasresten, in kg per ha, die achter blijft op het land uitgerekend (Tabel 6).

kg/ha	tarwe	vroege aardappels	aardappels	suikerbieten	zaaiuien	winterpeen	snijmais
opbrengst vers	9000	15000	60000	55000	50000	70000	50000
opbrengst droog	7650	2100	12600	11990	6350	7280	14000
gewasrest droog	5100	3806	2363	4518	977	3004	1287
P2O5 product	77	12	74	48	37	50	78
P2O5 gewasrest	10	32	20	20	5	14	5

7 Literatuur

Balemi, T., & M.K. Schenk, 2009. Genotypic variation of potato for phosphorus efficiency and quantification of phosphorus uptake with respect to root characteristics. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172: 669-677.

Bhat, K.K.S. & P.H. Nye, 1973. Diffusion of phosphate to plant roots in soil. I. Quantitative autoradiography of the depletion zone. *Plant and Soil* 38: 161-175.

Bokhorst, J.G., 2010. Bemesting in de biologische akker- en tuinbouw bij bodems met een hoge fosfaattoestand. Louis Bolk Instituut Driebergen.

Bussink, D.W., R.F. Bakker, H. van den Draai, H. & E.J.M. Temminghof, 2010. Naar een advies voor fosfaat bemesting nieuwe leest; deel 2, grasland. Rapport 1246.2 Nutriënten Management Instituut NMI B.V., Wageningen, 54 pp.

Cade-Menun, B.J. 2005. Using phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy to characterize organic phosphorus in environmental samples. In: Turner, B.L., Frossard, E. & Baldwin, D.S. (eds.). *Organic phosphorus in the environment*. CAB International, London, pp. 21-44.

Chang, S.C. and M. L. Jackson, 1958. Soil Phosphorus fractions in some representative soils. *Journal of Soil Science*, 8, p 109-119.

Chen, D.L., C. A. Delatorre, A. Bakker and S., 2000. Conditional identification of phosphate-starvation-response mutants in *Arabidopsis thaliana*. *Planta*, 211, 1, p 13-22.

Dalal, R.C. 1977. Soil organic phosphorus. *Advances in Agronomy* 29: 83-117.

Dekker, P.H.M. en R. Postma, 2008. Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting. PPO-AGV Lelystad, rapport nr 3250061800.

Deru, J., N. van Eekeren, & H. de Boer, 2010. Beworteling van grasland –een literatuurstudie. Nutriëntopname in realtie tot bewortelingsdiepte en –intensiteit. Factoren en potentiële maatregelen die beworteling beïnvloeden. Publicatie nr. 2010-018 LbV, Louis Bolk Instituut, Driebergen, 63 pp.

Diest, A. van, 1971. Bodemvruchtbaarheid I. Laboratorium voor Landbouwscheikunde, Lanbouwhogeschool Wageningen.

Dou, H. and D. Steffens, 1993. Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor aus organischen und anorganischen Formen in der Rhizosphäre von *Lolium Perenne*. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 156: 279-285.

Egner, H., H. Riehm, and W.R. Domingo. 1960. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung. K. Landbrukshogsk. Ann. 26, 199-215.

Ehlert, P.A.I., H.P. Pasterkamp en P.R. Bolhuis, 2004. Effecten van organische bodemverbeterende middelen op de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem op korte en lange termijn. Alterra, Wageningen Rapport 991.

Erp, P.J. van, 2002. The potentials of multi-nutrient soil extraction with 0,01 M CaCl₂ in nutrient management. Thesis Wageningen University.

Fageria, V.D., 2001. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of plant nutrition*, 24: 1269-1290.

Fox, T.R. & N.B.V. Comeford, 1992. Rhizosphere phosphatase activity and phosphatase hydrolysable organic phosphorus in two forested spodosols. *Soil Biology and Biochemistry* 24: 579-583.

Gálvan, G.A., I. Parádi, K. Burger, J. Baar, T.W. Kuyper, O. E. Scholten and C. Kik, 2009. Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in onion roots from organic and conventional farming systems in the Netherlands. *Mycorrhiza* 19 p 317-328.

Harrison, A.F., 1987. *Soil Organic Phosphorus: a Review of World Literature*. CAB International, Wallingford, UK.

Hinsinger, P., E. Betencourt, L. Bernard, A. Brauman, C. Plassard, J. Shen, X. Tang and F. Zhang, 2011. P fort wo, Sharing a Scarce Resource: Soil Phosphorus Acquisition in the Rhizosphere of Intercropped Species. *Plant Physiology*, 156 p 1078-1086.

Keltjens, W.G., 1999. Verhoogde fosfaatvoeding van planten op P-arme gronden als gevolg van mycorrhiza. *Meststoffen*, p 49-56.

Lewis, D.G. & J.P. Quirk, 1967. Phosphate diffusion in soil and uptake by plants. *Plant and Soil* 26: 454-468.

Limonard, T. en M.A. Ruissen, 1989. The significance of VA-Mycorrhiza to future arable farming in the Netherlands. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 194, supplement 1 p 129-135..

Noulas, C., M. Liedgens, P. Stamp, L. Alexiou, 2010. Subsoil root growth of field grown spring wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) differing in nitrogen use efficiency parameters. *Journal of Plant Nutrition* 33: 1887-1903.

Oehl, F., A. Oberson, S. Sinaj, & E. Frossard, 2001. Organic phosphorus mineralization studies using isotopic dilution techniques. *Soil Science Society of America Journal* 65: 780-787.

Read, D.B., A.G. Bengough, P.J. Gregory, J.W. Crawford, D. Robinson, C.M. Scrimgeour, I.M. Young, K. Zhang & X. Zhang, X., 2003. Plant roots release phospholipid surfactants that modify the physical and chemical properties of the soil. *New Phytologist* 157: 315-326.

Richardson, A.E., T.S. George, T.S. Hens and R.J. Simpson, 2005. Utilisation of organic phosphorus by higher plants. *Organic Phosphorus in the Environment* (eds B.L. Turner, Frossard, E and Baldwin, D.S.) pp. 165-184. CAB International, Wallingford, UK.

Rotterdam-Los, D. van, 2010. The potential of soils to supply phosphorus and potassium; processes and predictions. Thesis Wageningen University.

Russchen, H.J., J. Wander en J.T. Malda, 2011. Benutting van fosfaat in landbouwgronden. Productschap akkerbouw, Den Haag.

Ryan, M.H., D.R. Small and J.E. Ash, 2000. Phosphorus controls the level of colonisation by arbuscular mycorrhizal fungi in conventional and biodynamic irrigated dairy pastures. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 40, 663-670.

Richardson, A.E., T.S. George, M. Hens, R.J. Simpson, 2005. Utilization of soil organic phosphorus by higher plants. In: Turner, B.L., Frossard, E. & Baldwin, D.S. (eds.). *Organic phosphorus in the environment*. CAB International, London, pp. 165-184.

Rotterdam-Los, A.M.D. van , 2010. The potential of soils to supply phosphorus and potassium, processes and predictions. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, ISBN 978-90-8585-602-3, 144 pp.

Schachtman, D.P., R J. Reid and S.M. Ayling. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell *Plant Physiology* February 1998 vol. 116 no. 2 p. 447-453.

Sharpley, A.N. and J.K. Syers, 1977. Seasonal variation in casting activity and in the amounts and release to solution of phosphorus forms in earthworm casts *Soil Biology and Biochemistry* Volume 9, Issue 4, Pages 227-231.

Schoumans, O., 2007. Trends in de fosfaattoestand van landbouwgronden in Nederland inde periode 1998-2003. WUR Alterra Wageningen, rapport 1537.

Steffens, D., T. Leppin, N. Luschin-Ebengreuth, Z. Min Yang, and S. Schubert, 2010. Organic soil phosphorus considerable contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil/testing methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173: 765-771.

Tarafdar, J.C. and A. Jungk, 1987. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. *Biology and Fertility of Soils*, 3 nr 4, p. 199-204.

Turner, B.L., 2008. Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. *Journal of Ecology* 96, 698-702.

Vance, C.P., C. Uhde-Stone, & D.L. Allen, 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a non renewable resource. *New Phytologist* 157: 433-447.

Werff, P.A. van der, P.A.M. van Amersfoort, J.C.Y Marinissen and 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.

Willigen, P. de en M. van Noordwijk, M. 1987. Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.