



# Fosfaatvoorziening aardappel

Relatie tussen mestbeleid, fosfaattoestand van de bodem en  
voorziening van het gewas

D. van Rotterdam (NMI)

W. Vervuurt (WUR)

W. van Geel (WUR)

D.W. Bussink (NMI)

H. Brinks (Delphy)

J. de Haan (WUR)

## Referaat

Van Rotterdam, D, W. Vervuurt, W. van Geel, D.W. Bussink, H. Brinks, J. de Haan (2021) Fosfaatvoorziening aardappel; relatie tussen mestbeleid, fosfaattoestand van de bodem en voorziening van het gewas, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1777.N.20, pp 57

## Rapport in het kort

Veel akkerbouwers maken zich zorgen over het effect van de fosfaatgebruiksnormen op het rendement van de aardappelteelt. Door een relatief zwakke beworteling kan aardappel het in de bodem aanwezige fosfaat niet gemakkelijk opnemen en stelt daardoor hoge eisen aan de fosfaatvoorziening. De fosfaattoestand van de bodem is belangrijker voor de fosfaatvoorziening van het gewas dan de actuele mestgift. Daarom wordt in Nederland een landbouwkundig streeftoestand geadviseerd van Pw 25 op kleigronden en Pw 30 op de overige gronden. In het mestbeleid worden de klassen Hoog, Ruim, Neutraal, Laag en Arm onderscheiden. De classificatie van de fosfaattoestand Neutraal voor de gebruiksnorm is hoger dan de landbouwkundige streeftoestand. In de klassen Ruim en Hoog is met een kleine startgift, ook in recente en veeljarige proeven, geen aanwijzing voor opbrengstderving. De gebruiksnormen zijn in de klassen Ruim en Hoog hoger dan nodig om aardappelen van voldoende fosfaat te voorzien. In de klassen Ruim en Hoog is de fosfaatbodembalans netto negatief waardoor de fosfaattoestand van de bodem langzaam zal dalen. De snelheid waarmee het beschikbaar bodemfosfaat (gemeten als Pw of P-AI) verandert is afhankelijk van het netto fosfaatbodemoverschot en is direct afhankelijk van de initiële Pw of P-AI; hoe hoger Pw of P-AI des te sneller daalt deze. Over de tijd vlakkt de verandering af. Op basis van de huidige gebruiksnormen (2021) stabiliseert het beschikbaar bodemfosfaat (ruim) binnen het landbouwkundige streeftraject (Pw 25/30 tot 45). De huidige gebruiksnormen zijn geen belemmering voor een voldoende hoge aanvoer van fosfaat voor aardappelen. De huidige gebruiksnormen zijn ook geen belemmering voor een voldoende hoge aanvoer van organische stof, ook niet op gronden met een hoge fosfaattoestand. Managementkeuzes en mestsoortkeuze zijn van groter belang dan de gebruiksnorm voor de organische stofbalans.

---

© 2021 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

## Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

---



Verspreiding  
BO Akkerbouw



Ministerie van Landbouw,  
Natuur en Voedselkwaliteit



digitaal

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting en conclusies</b>	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1 Aanleiding	8
1.2 Doelstelling	8
1.3 Aanpak	9
1.4 Leeswijzer	10
<b>2 Theoretisch kader</b>	<b>12</b>
2.1 Fosfaattoestand van de bodem	12
2.2 Fosfaattoestand meten	14
2.3 Fosfaatbemestingsadvies aardappel	15
2.4 Gebruiksnormen	20
2.5 P-Al en P-CaCl <sub>2</sub> als basis voor de gebruiksnormen	22
<b>3 Mestbeleid en fosfaatvoorziening</b>	<b>24</b>
3.1 Fosfaattoestand en fosfaatvoorziening in Nederland	24
3.2 Verandering van de fosfaattoestand in Nederland	25
3.3 Verandering organisch stofgehalte in Nederland	28
3.4 Verandering fosfaattoestand in relatie tot het fosfaatoverschot	28
<b>4 Fosfaat- en organische stofbalansen voor 'standaard' bouwplannen</b>	<b>34</b>
4.1 Fosfaatbalans voor 20 voorbeeldbedrijven	34
4.2 Organische stofbalans voor 20 voorbeeldbedrijven	38
<b>5 Fosfaatbenutting verbeteren</b>	<b>41</b>
5.1 Relatie tussen fosfaatbenutting en beworteling	41
5.2 Maatregelen voor een optimale benutting	42
<b>6 Conclusies</b>	<b>45</b>
<b>Referenties</b>	<b>47</b>
<b>Bijlage I Voorbeeldbedrijven</b>	<b>50</b>
<b>Bijlage II Kengetallen organische stof</b>	<b>52</b>
<b>Bijlage III Fosfaatbalansen</b>	<b>53</b>
<b>Bijlage IV Organische stofbalansen</b>	<b>55</b>
<b>Bijlage V Fosfaatgehalten gewas</b>	<b>57</b>

# Samenvatting en conclusies

## Aanleiding en doel

Veel akkerbouwers maken zich zorgen over het effect van de fosfaatgebruiksnormen op het rendement van de aardappelteelt. Door een relatief zwakke beworteling kan aardappel het in de bodem aanwezige fosfaat niet gemakkelijk opnemen en stelt daardoor hoge eisen aan de fosfaatvoorziening. De akkerbouwer heeft te maken met een beperking van de totale fosfaatgift door de wettelijke fosfaatgebruiksnormen. Deze zijn gebaseerd op de fosfaattoestand van de bodem. WUR, NMI en Delphy hebben in opdracht van BO Akkerbouw onderzocht wat het effect is van de huidige fosfaatgebruiksnormen op de fosfaatvoorziening in de aardappelteelt. De vraag luidt wat het effect is van deze normen op zowel de fosfaattoestand als het organische stofgehalte van de bodem en wat die verandering (verwachte verlaging) voor gevolgen heeft op de productie van aardappelen.

## Aanpak

Het onderzoek maakt gebruik van de bestaande kennis, in het verleden uitgevoerd onderzoek en van oude en recente lange-termijnproeven. Daarnaast zijn, voor 20 voorbeeldbedrijven (variërend in de combinatie grondsoort, rotatie, opbrengsten, fosfaattoestand van de bodem en bemesting) representatief voor de Nederlandse akkerbouwgebieden, fosfaat- en organische-stofbalansen doorgerekend. Bepaald is wat het effect zal zijn op de fosfaattoestand van de bodem en gewasrespons.

## Beschikbaarheid van fosfaat in de bodem voor het gewas

De potentie van een bodem om fosfaat te leveren aan een groeiend gewas is een functie van de directe fosfaatbeschikbaarheid ( $P\text{-CaCl}_2$ ) en van de snel reagerende fosfaatfracties ( $P\text{-Al}$  en  $P_w$ ) die zorgen voor nalevering wanneer de wortel fosfaat onttrekt aan de bodem. Landbouwkundig wordt de fosfaattoestand gedefinieerd op basis van de fosfaatfracties  $P_w$  of  $P\text{-Al}$  en  $P\text{-CaCl}_2$ . De snel reagerende fosfaatfracties maken maar een klein deel uit van de totale hoeveelheid fosfaat in de bodem. Langzaam reagerende fracties en fosfaat in diepere bodemlagen kunnen zorgen voor extra fosfaatlevering. Anderzijds kan fosfaat in de snel reagerende fracties ook worden omgezet in langzaam reagerende fracties, of uitspoelen naar diepere bodemlagen of naar het watersysteem – het onvermijdbaar verlies.

## Bemestingsadvies en gebruiksnormen

De fosfaattoestand van de bodem is belangrijker voor de fosfaatvoorziening van het gewas dan de actuele mestgift: een hoge fosfaatgift kan een lage fosfaattoestand niet compenseren. Daarom wordt in Nederland een landbouwkundig streefstoestand geadviseerd van  $P_w$  25 op kleigronden en  $P_w$  30 op de overige gronden. Om een voldoende hoge fosfaatvoorziening te waarborgen én de fosfaattoestand te handhaven wordt in het traject van  $P_w$  25/30 tot  $P_w$  45 geadviseerd de fosfaattoestand van de bodem te handhaven en wel door een fosfaatgift die gelijk is aan de onttrekking door het gewas plus het onvermijdbare verlies. Het landbouwkundige streeftraject en de bemestingsadviezen zijn in Nederland vergelijkbaar met België en hoger dan Duitsland. De klassenindeling van de fosfaattoestand van de bodem voor de gebruiksnorm is ruim vergeleken met het landbouwkundige streeftraject. In de klassen Ruim en Hoog is met een kleine startgift, ook in recente en veeljarige proeven, geen aanwijzing voor opbrengstderiving. De gebruiksnormen zijn in de klassen Ruim en Hoog ruimschoots hoger dan nodig om aardappelen van voldoende fosfaat te voorzien. De toegestane giften zijn bedoeld om de fosfaattoestand van de bodem op een voldoende hoog – maar niet te hoog – niveau te krijgen.

## Relatie mestbeleid en fosfaattoestand van de bodem

In Nederland zijn over de afgelopen decennia de fosfaatgiften en de netto fosfaatoverschotten gedaald als gevolg van de aanscherping van de gebruiksnormen. Dit heeft geleid tot een dalende trend in de

directe fosfaatbeschikbaarheid in de bodem zoals gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>. De beschikbare fosfaatreserves (P-Al) zijn echter gelijk gebleven of namen toe omdat sprake was van een netto overschot. De dalende fosfaatgiften hebben ook niet geleid tot een dalend organische stofgehalte.

De snelheid waarmee de fosfaattoestand van de bodem (Pw en P-Al) verandert is afhankelijk van het netto fosfaatbodemoverschot en is lineair gerelateerd aan de initiële fosfaattoestand van de bodem. Hoe hoger de fosfaattoestand en het overschot of tekort des te sneller verandert de fosfaattoestand. Grondsoort lijkt geen effect te hebben op de snelheid waarmee de fosfaattoestand verandert, maar tijd wel. Bij het handhaven van het nieuwe fosfaatoverschot (verlaging dan wel verhoging) ontstaat na verloop van ongeveer 10 jaar een nieuw evenwicht tussen fosfaatoverschot en fosfaattoestand.

De hoeveelheid extra fosfaat die nodig is om een bepaalde fosfaattoestand te handhaven – het onvermijdbare verlies – is afhankelijk van de bindingscapaciteit en de fosfaattoestand van de bodem. Bij een hogere fosfaattoestand en/ of een hogere bindingscapaciteit zijn de onvermijdbare verliezen groter en is meer fosfaat nodig om de fosfaattoestand te handhaven. Bij de gebruiksnorm klasse Neutraal zijn 10 à 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha indicatieve waarden voor de onvermijdbare verliezen.

### **Relatie mestbeleid en fosfaattoestand in de praktijk**

Een studie met 20 voorbeeldbedrijven representatief voor de Nederlandse akkerbouw laat zien dat de fosfaatbalans (verschil tussen aanvoer min afvoer) op rotatieniveau sterk gekoppeld is aan de fosfaattoestand van de bodem. De huidige gebruiksnormen zijn geen belemmering voor een voldoende hoge fosfaataanvoer. De fosfaatvoorziening van aardappelen is in alle fosfaatklassen van de gebruiksnormen voldoende.

- De klassen Laag en Neutraal komen overeen met de landbouwkundige streeftoestand. In deze klassen leidt de toegestane fosfaatgift tot fosfaatbodemoverschotten die variëren tussen 9 en 26 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Deze overschotten compenseren de eventuele onvermijdbare verliezen. Bij de klasse Laag en Neutraal zal de fosfaattoestand van de bodem naar verwachting niet veranderen. De gebruiksnorm is in deze klasse voldoende voor de fosfaatvoorziening van aardappelen.
- Evenwichtsbemesting (verschil tussen aanvoer en afvoer van minder dan 4 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha op de balans) wordt bereikt in de klasse Ruim, bij een fosfaattoestand rond Pw rond 50. Dit is een beduidend hogere fosfaattoestand dan het landbouwkundige streeftraject van Pw 25/30 tot 45. De verwachting is dat de fosfaattoestand langzaam daalt. Wanneer een lagere fosfaatklasse wordt bereikt is fosfaatbalans weer positief en zal de fosfaattoestand niet of nauwelijks verder dalen en stabiliseren binnen het landbouwkundige streeftraject (Pw 25/30 tot 45).
- Bij de klasse Hoog hebben bedrijven op rotatieniveau een negatieve fosfaatbalans. Dit leidt tot een daling van de fosfaattoestand. Hoe hoger de initiële toestand en hoe lager de bindingscapaciteit van de bodem des te sneller zal de fosfaattoestand kunnen dalen. Het zal echter gemiddeld één tot enkele decennia duren voordat de fosfaattoestand een klasse daalt. De fosfaatvoorziening is in de klasse Hoog meer dan voldoende voor de fosfaatvoorziening van aardappelen.

### **Relatie mestbeleid en organische stof aanvoer in de praktijk**

De huidige gebruiksnormen zijn geen belemmering voor een voldoende hoge aanvoer van organische stof, ook niet op gronden met een hoge fosfaattoestand. Deze conclusie is in overeenstemming met eerdere studies. Met het achterlaten van gewasresten, het telen van groenbemesters en het aanwenden van een combinatie van mestmixen en rundveedrijfmest kan voldoende organische stof worden aangevoerd om het organische stofgehalte in de bodem (minimaal) te handhaven, mits er voldoende rundveedrijfmest beschikbaar is en blijft in de toekomst. De mestsoortkeuze is van groter belang dan de gebruiksnorm voor de organische stofbalans. Het (deels) vervangen van varkensdrijfmest door rundveedrijfmest eventueel in combinatie met vaste mest en/of compost (bevat veel EOS per kg fosfaat en heeft een fosfaatvrije voet van 50%) draagt bij aan een positieve organische stofbalans. Daarnaast

dragen groenbemesters en granen in de rotatie bij aan een positieve organische stofbalans, hoewel de opname van meer granen in het bouwplan ten koste gaat van het bedrijfseconomisch rendement.

### **Verbeteren fosfaatbenutting**

Ondanks dat voldoende fosfaat beschikbaar is, kan door vochtgebrek en beperkte wortelontwikkeling door onder andere een slechte bodemstructuur, de fosfaatvoorziening worden belemmerd. Ook een suboptimale zuurgraad van de bodem beperkt de fosfaatbeschikbaarheid. De fosfaatbenutting van bodem en bemesting is te verbeteren door ervoor te zorgen dat zuurgraad, bodemstructuur en vochtvoorziening op orde zijn en door de fosfaatgift te verdelen ten gunste van percelen met een lage(re) fosfaattoestand en gewassen met een hogere fosfaatbehoefte. Met name onder omstandigheden waarbij de directe fosfaatbeschikbaarheid beperkt is kan het effectief zijn om de mestgift geconcentreerd bij de wortels te plaatsen.

### **Conclusies**

Uit deze studie kan geconcludeerd worden dat:

- De huidige gebruiksnormen (2021) voldoende hoog zijn ten opzichte van de landbouwkundige streeftoestand van de bodem en ten opzichte van de bemestingsadviezen voor aardappel, op basis van Pw én op basis van de combinatie P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al.
- In geen van de fosfaatklassen de fosfaattoestand van de bodem in combinatie met de toegestane fosfaatgift een belemmering zal zijn voor de fosfaatvoorziening van aardappelen.
- De fosfaattoestand van de bodem in Nederland is gemiddeld ruim voldoende tot (zeer) hoog.
- Dalende gebruiksnormen hebben ertoe geleid dat de directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) is gedaald maar dat door de netto positieve balans de fosfaatreserves in de bodem (P-Al) gelijk zijn gebleven of gestegen.
- Een daling van de directe fosfaatbeschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) is geen probleem voor de fosfaatvoorziening van aardappelen zolang de fosfaattoestand in de landbouwkundige streeftoestand van de bodem blijft. Een (sterke) daling van P-CaCl<sub>2</sub> wordt vaak waargenomen op gronden die in het (recente) verleden sterk zijn opgeladen met fosfaat.
- In de klasse Hoog is de fosfaatbalans negatief. Dit zal met name tot uitdrukking komen in een daling van de directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>). Conform het beoogde beleid, is dit positief voor de verliezen naar het watersysteem. De verwachting is dat ook de snel reagerende fosfaatfractie (P-Al en Pw) daalt. De snelheid waarmee de fosfaattoestand daalt is afhankelijk van de initiële fosfaattoestand en het negatieve fosfaatoverschot en neemt af in de tijd.
- Als de fosfaattoestand daalt tot de klasse Ruim, is de bemesting in evenwicht met de fosfaatonttrekking en zal de daling van de fosfaattoestand van de bodem nog langzamer gaan.
- In de fosfaatklassen Laag en Neutraal is de fosfaattoestand in overeenstemming met de landbouwkundige streefwaarde. De fosfaatbalans is positief en voldoende hoog om te compenseren voor de fosfaatonttrekking door het gewas en eventuele onvermijdbare verliezen.
- De onvermijdbare verliezen zijn hoger bij hogere fosfaattoestand en een hogere bindingscapaciteit.
- Oude en recente veldproeven tonen aan dat bij de fosfaatklasse Hoog, ondanks een netto negatief fosfaatoverschot, de fosfaattoestand van de bodem in combinatie met de toegestane mestgift (meer dan) voldoende hoog zijn om aardappels van voldoende fosfaat te voorzien.
- De benutting van fosfaat uit bodem en bemesting is te verbeteren door op bedrijfsniveau de fosfaatgift toe te delen aan gewassen met een hogere fosfaatbehoefte, aan percelen met een lage(re) fosfaattoestand en zorg te dragen voor een goede bodemstructuur (zodat de beworteling niet wordt belemmerd) en zuurgraad (pH) van de bodem in overeenstemming met het landbouwkundig advies.
- De huidige gebruiksnormen hoeven geen belemmering te zijn voor een voldoende hoge aanvoer van organische stof, ook niet op gronden met een hoge fosfaattoestand.

- De keuze in het soort mest is van groter belang voor de organische stofbalans dan de hoogte van de gebruiksnorm: (deels) vervangen van varkensdrijfmest door rundveedrijfmest eventueel in combinatie met vaste mest en/of compost (omdat compost relatief veel effectief organische stof bevat per kg fosfaat en een fosfaatvrije voet van 50% heeft) zorgt voor voldoende EOS-aanvoer.
- De organische stofbalans wordt positief beïnvloed door het telen van groenbemesters, het onderwerken van gewasresten en het aandeel granen in de rotatie.

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Veel akkerbouwers maken zich zorgen over het effect van de fosfaatgebruiksnormen op het rendement van de aardappelteelt. Door een relatief zwakke beworteling kan aardappel het in de bodem aanwezige fosfaat niet gemakkelijk opnemen en stelt daardoor hoge eisen aan de fosfaatvoorziening. Onvoldoende beschikbaarheid van fosfaat leidt tot een tragere opkomst en beginontwikkeling, een lagere knolzetting en daardoor grovere sortering, en opbrengstderving.

De akkerbouwer heeft te maken met een beperking van de totale fosfaatgift door de wettelijke fosfaatgebruiksnormen. Deze zijn gebaseerd op de fosfaattoestand van de bodem. Het is aan de akkerbouwer hoe deze totale fosfaatgift wordt verdeeld over de verschillende gewassen in zijn bouwplan. Het bemestingsadvies (handboek bodem en bemesting) biedt daarvoor een leidraad. Het bemestingsadvies onderscheidt een gewasgericht advies voor het behalen van een economisch optimale opbrengst en een bodemgericht advies voor het, op rotatieniveau, handhaven van de streeftoestand van de bodem en eventuele reparatie daarvan. Het gewasgerichte advies maakt onderscheid tussen gewasgroepen op basis van hun fosfaatbehoefte, aardappel is hierin een fosfaatbehoefstig gewas. Het bodemgericht advies onderscheidt een streeftraject van Pw tussen 25 en 45 op zeelei en zeezand en Pw van 30 – 45 op dekzand, dalgrond, rivierklei, löss. Opmerkelijk is dat dit streeftraject in het bodemgericht bemestingsadvies deels overlapt met een Pw traject tussen 25 en 35 dat in de gebruiksnorm als Laag wordt geclassificeerd.

De fosfaattoestand werd van oudsher gemeten met Pw. De mestwetgeving zal binnenkort aansluiten bij de gangbare praktijk waarin de fosfaattoestand wordt gemeten op basis van een combinatie van P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>. Ook de fosfaatbemestingsadviezen zijn aangepast naar de systematiek waarin de fosfaattoestand wordt gemeten op basis van twee kengetallen (P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al) in plaats van één (Pw).

WUR, NMI en Delphy hebben in opdracht van BO Akkerbouw onderzoek gedaan naar het effect van de fosfaatgebruiksnormen op de fosfaatvoorziening in de aardappelteelt. De vraag luidt wat het effect is van deze normen op de fosfaattoestand van de bodem. De lagere fosfaatgebruiksnormen bij gronden in de hogere fosfaatklassen hebben tot gevolg dat er minder plaatsingsruimte is voor organische mest. Een zorg in de praktijk is dat dit leidt tot onvoldoende aanvoer van organische stof om de organische-stoftoestand van de bodem en de bodemvruchtbaarheid te handhaven. De vraag is daarom of de gebruiksnormen direct gevolgen heeft op de kwaliteit en de productie van aardappelen door een daling van de fosfaattoestand en/ of indirect door een daling van de bodemvruchtbaarheid.

Over mogelijke verschillen in fosfaatbehoefte tussen verschillende aardappelrassen, als gevolg van verschillen in beworteling, is weinig bekend en maakt geen onderdeel uit van deze studie.

## 1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om te bepalen wat het effect is van de fosfaatgebruiksnormen op de fosfaattoestand en het organische stofgehalte van de bodem en daarmee direct of indirect op de



opbrengst/ kwaliteit van het gewas. Als de fosfaattoestand als gevolg van een negatief fosfaatoverschot daalt is de vraag tot welk (nieuw evenwichts-) niveau deze dan zal dalen en wat het gevolg is voor de aardappelopbrengst en kwaliteit op de lange termijn. Dit wordt onderzocht op basis van de volgende bouwstenen:

- 1 de relatie tussen fosfaatbehoefte en de beschikbaarheid van fosfaat uit bodem en -bemesting;
- 2 het effect van het mestbeleid c.q. fosfaatgebruiksnormen op de fosfaattoestand van de bodem;
- 3 inzicht in hoeverre er met de gangbare rotatie en bemesting voldoende fosfaat en organische stof wordt aangevoerd, en of het aanvoeren van voldoende fosfaat en organische stof mogelijk is binnen de huidige gebruiksnormen op basis van fosfaat-organische-stofbalans van 20 representatieve akkerbouwbedrijven;
- 4 vertaling van de fosfaatbalans naar een verwachte verandering in fosfaattoestand van de bodem en beschikbaarheid voor aardappelen;
- 5 maatregelen die men kan nemen om de kans op fosfaatgebrek te minimaliseren en de fosfaatbenutting te optimaliseren.

De fosfaattoestand wordt geduïd op basis van zowel de voor de akkerbouw bekende kengetal Pw als de combinatie van twee kengetallen (P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al) die voor de gebruiksnormen en bemestingsadviezen recent is geïntroduceerd.

Het onderzoek moet de akkerbouwer inzicht geven in het effect van de gebruiksnormen op de fosfaattoestand van de bodem en het effect op de aardappelteelt voor zijn eigen bedrijfssituatie en het moet hem handvaten bieden om maatregelen te treffen om het rendement van de teelt op peil te houden.

### 1.3 Aanpak

Het onderzoek zal voortbouwen op de bestaande kennis van in het verleden uitgevoerd onderzoek waarin veel informatie beschikbaar is over de fosfaatbehoefte en -voorziening van aardappel. Daarnaast worden, voor voorbeeldbedrijven die representatief zijn voor de akkerbouwgebieden in Nederland, fosfaat- en organische-stofbalansen doorgerekend en bepaald wat het effect zal zijn op de fosfaattoestand van de bodem en gewasrespons.

1. De relatie tussen fosfaatbehoefte en de beschikbaarheid van fosfaat uit bodem en -bemesting is onderzocht op basis van oude- en recente lange termijn proeven. De streeftoestand en bemestingsadviezen in Nederland worden vergeleken met de adviezen en streeftoestand van de bodem in omliggende landen.

2. De verandering van de fosfaattoestand van de bodem als gevolg van de fosfaatonttrekking en fosfaatbemesting is onderzocht op basis van literatuur. Daarin is onderscheid gemaakt tussen de verandering in de fosfaattoestand over de tijd in Nederland en de verandering op perceelniveau op een aantal locaties met lange-termijnproeven.

3. In hoeverre er met de gangbare rotatie en bemesting voldoende fosfaat en organische stof wordt aangevoerd, en of het aanvoeren van voldoende fosfaat en organische stof mogelijk is binnen de huidige gebruiksnormen is onderzocht door van 20 voorbeeldbedrijven de fosfaat-organische-stofbalans op te stellen. De voorbeeldbedrijven zijn representatief voor de akkerbouwgebieden in Nederland en variëren in rotatie, grondsoort, fosfaattoestand en in de praktijk gebruikelijke bemesting (dosis en type). Deze voorbeeldbedrijven zijn gebaseerd op de voorbeeldbedrijven zoals omschreven door Van Dijk et al. (2012), en die door Delphy zijn aangevuld op basis van praktijkkennis. De 20 voorbeeldbedrijven en de gebruikte uitgangspunten staan beschreven in Bijlage I.

De fosfaatbalans is op bouwplanniveau opgesteld en bestaat uit de aanvoer via (kunst)mest en de afvoer via gewassen. Zie vergelijking 1. De aanvoer via (kunst) mest is gebaseerd op de praktijkkennis

van Delphy. De afvoer via de gewassen is het product van de gewasopbrengst en het fosfaatgehalte in het oogstproduct. De gewasopbrengsten zijn gebaseerd op de praktijkkennis van Delphy. Het fosfaatgehalte in het oogstproduct is afhankelijk van de grondsoort, de fosfaattoestand en de opbrengst, en wordt bepaald door middel van de formule zoals opgesteld door de Ruijter et al. (2020).

$$\text{Fosfaatbalans (kg P2O5 ha}^{-1}\text{)} = \text{aanvoer} - \text{afvoer} \quad \text{Vergelijking 1}$$

$$\text{Aanvoer (kg P2O5 ha}^{-1}\text{)} = (\text{Gift a} * R a) + (\text{Gift sb} * R sb) + (\text{Gift wt} * R wt) + (\text{Gift zg} * R zg) + (\text{Gift gz} * R gz) + (\text{Gift sm} * R sm) + (\text{Gift wt} * R wt) + (\text{Gift u} * R u) + (\text{Gift pe} * R pe) + (\text{Gift bn} * R bn) + (\text{Gift gb} * R gb)$$

Waarbij gift staat voor de fosfaatgift in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha, R voor het percentage van het gewas in de rotatie, a voor aardappels, sb voor suikerbiet, wt voor wintertarwe, zg voor zomergerst, gz voor graszaad, sm voor snijmais, wt voor witlof, u voor ui, pe voor peen, bn voor bonen en gb voor groenbemester. De fosfaatgift en het percentage van het gewas in de rotatie staat voor elk voorbeeldbedrijf gegeven in Bijlage III.

$$\text{Afvoer (kg P2O5 ha}^{-1}\text{)} = (\text{PO a} * 2,29 * R a) + (\text{PO sb} * 2,29 * R sb) + (\text{PO wt} * 2,29 * R wt) + (\text{PO zg} * 2,29 * R zg) + (\text{PO gz} * 2,29 * R gz) + (\text{PO sm} * 2,29 * R sm) + (\text{PO wt} * 2,29 * R wt) + (\text{PO u} * 2,29 * R u) + (\text{PO pe} * 2,29 * R pe) + (\text{PO bn} * 2,29 * R bn)$$

Waarbij PO staat voor praktijkopbrengst in kg ha<sup>-1</sup>, R voor het percentage van het gewas in de rotatie, P voor het fosforgehalte in percentage, a voor aardappels, sb voor suikerbiet, wt voor wintertarwe, zg voor zomergerst, gz voor graszaad, sm voor snijmais, wt voor witlof, u voor ui, pe voor peen en bn voor bonen.

Het P-gehalte is gebaseerd op de formule van de Ruijter (2020):

$$P - \text{gehalte (\%)} = c + (h * PO) \quad \text{Vergelijking 2}$$

Waarbij c en h per gewas en fosfaattoestand beschikbaar zijn in het rapport van de Ruijter (2020), en PO staat voor de praktijkopbrengst.

De organische stof balans is op bouwplanniveau opgesteld volgens de methodiek omschreven in het handboek bodem en bemesting. De balans bestaat enerzijds uit de aanvoer van organische mest, gewasresten en groenbemesters, en anderzijds uit de afbraak van bodem organische stof. Voor de aanvoer van effectieve organische stof (EOS) is uitgegaan van de kengetallen uit het handboek bodem en bemesting (zie Bijlage II). De afbraak is gebaseerd op de online organische stof rekentool van NMI (<https://os-balans.nl>).

4. De verandering van de fosfaattoestand als gevolg van de berekende fosfaatbalansen voor de 20 voorbeeldbedrijven is afgeleid op basis van literatuur en vergelijking 3 (Amery et al., 2021).

$$\Delta \text{PAI} / \Delta t = 0.7 + 0.15 \times \text{BAL}_p / \Delta t - 0.018 \times \text{PAI} \quad \text{Vergelijking 3}$$

Waarin de verandering in P-AI (mg P/kg) per jaar een functie is van de P-balans (kg P/ha/jaar) en het P-AI getal (mg P/kg).

5. De maatregelen die men kan nemen om de kans op fosfaatgebrek te minimaliseren en de fosfaatbenutting te optimaliseren zijn onderzocht op basis van bestaande literatuur en praktijkkennis.

## 1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het theoretische kader neergezet. De fosfaattoestand van de bodem wordt besproken en hoe dit voor de bemestingsadviezen en gebruiksnormen wordt gemeten. In dit hoofdstuk wordt ook inzicht gegeven in de totstandkoming van de bemestingsadviezen en de gebruiksnormen. Het effect van de verandering naar een systematiek waarin de fosfaattoestand wordt geduid op basis van twee kengetallen (P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL) in plaats van één (P<sub>w</sub>) wordt ook besproken. In hoofdstuk 3

wordt op basis van een literatuuronderzoek beschreven hoe de fosfaattoestand van de bodem verandert als gevolg van het mestbeleid en de P-bodemoverschotten. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de fosfaat- en organische-stofbalans voor 20 voorbeeldbedrijven beschreven. Hoofdstuk 5 geeft inzicht in hoe de fosfaatbenutting geoptimaliseerd kan worden door managementmaatregelen. De conclusies uit deze studie staan beschreven in hoofdstuk 6.

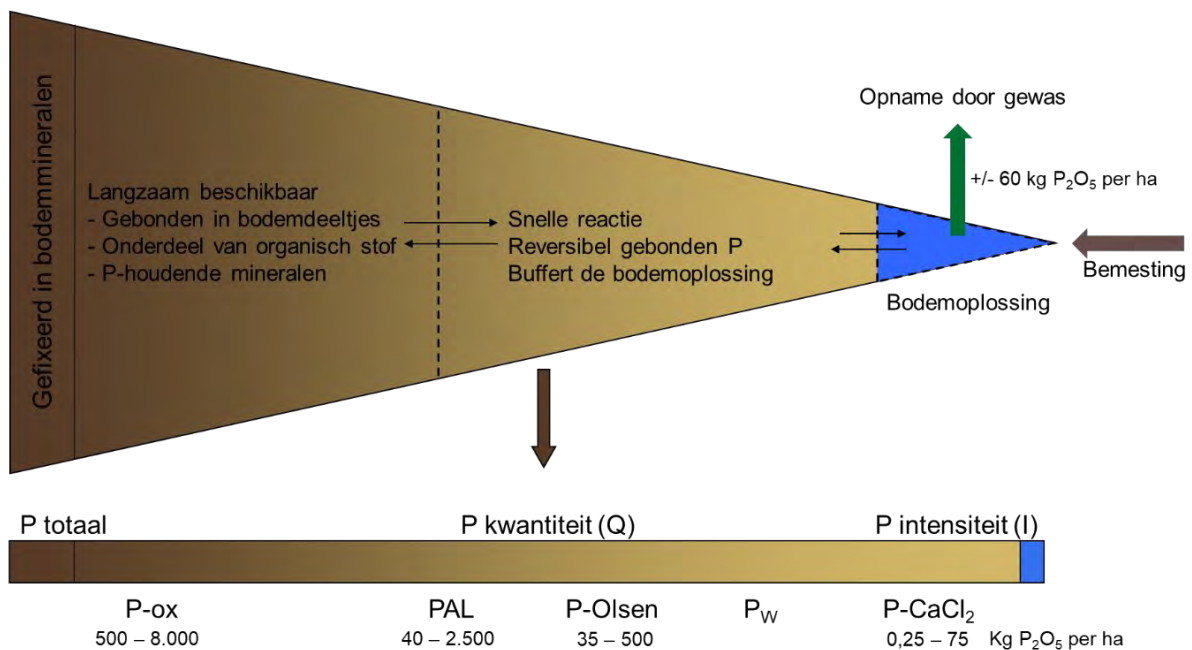
## 2 Theoretisch kader

### 2.1 Fosfaattoestand van de bodem

Het gedrag van fosfaat in de bodem is complex doordat het beïnvloed wordt door verschillende processen. Bij een landbouwkundig optimale zuurgraad van de bodem, tussen ruwweg pH 5 en 7, is de binding van fosfaat aan het oppervlak van ijzer- en aluminium(hydr)oxiden het dominante proces dat bepalend is voor de beschikbaarheid. Dit blijkt voor zowel kalkarme en kalkloze zand en klei als voor veengronden het geval te zijn (Schouwmans et al., 2015, van der Zee et al., 1988). Bij zeer lage pH (pH<4) van de bodem is de fosfaatbeschikbaarheid laag omdat deze wordt beperkt door de lage oplosbaarheid van ijzer- en aluminiumfosfaten. Bij kalkrijke gronden met een hoge pH (>7) is de beschikbaarheid laag omdat deze wordt beperkt door de lage oplosbaarheid van calciumfosfaten.

Fosfaat maakt ook deel uit van organische stof. In een veenbodem en bodems met een hoog organische stofgehalte komt door mineralisatie fosfaat vrij. Bij mineralisatie verdwijnt de koolstof naar de atmosfeer en blijven geoxideerde mineralen, zoals ijzer en aluminium als (hydr)oxide, in de toplaag van de bodem achter (Smolders et al., 2012). Het vrijgekomen fosfaat blijft ook achter in de toplaag van de bodem door de binding aan deze aluminium- en ijzer(hydr)oxides.

De plantenwortel neemt fosfaat op uit de bodemoplossing en het aan de bodemdeeltjes gebonden fosfaat vult de bodemoplossing aan. Dit wordt buffering genoemd. De beschikbaarheid van de totale hoeveelheid fosfaat in de bodem wordt vaak beschreven met 2 tot 4 reactieve fracties. In de simpelste variant met 2 reactieve bodemfracties is er één snel reagerende fractie en één langzaam reagerende fractie (Figuur 2-1). In dit model is een deel van het fosfaat niet reactief en gefixeerd in bodemmineralen.



Figuur 2-1 Schematische weergave van fosfaat in de bodem.

De snel reagerende bodemfracties bufferen de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing wanneer fosfaat wordt onttrokken door het gewas en wanneer het wordt toegediend met bemesting. De langzaam reagerende fosfaatfractie buffert de snelle fosfaatfractie weer. Bij een geoptimaliseerd management – bemesting volgens advies voor een optimale gewasopbrengst en fosfaattoestand – is met name de directe fosfaatbeschikbaarheid in de bodemoplossing en de snel reagerende bodemfractie van belang. Dit betekent niet dat de interactie met het langzaam beschikbaar komende fosfaat niet van belang is. Ook die reacties kunnen een rol spelen en zijn op een grotere tijdschaal (jaren tot decennium) bepalend of de snel reagerende fosfaatfracties al dan niet veranderen in relatie tot het netto P-bodemoverschot.

De snel reagerende fosfaatfractie is geassocieerd met de hoeveelheid reversibel gebonden fosfaat in de bodem. Dit wordt aangeduid door P-kwantiteit (Q). De beschikbaarheid van fosfaat in deze fractie hangt af van de mate waarin het oppervlak van de bodembestanddelen waar fosfaat specifiek aan bindt (de bindingscapaciteit) is bedekt met fosfaat. Hoe groter deze bedekkingsgraad, ook de verzadigingsgraad genoemd, des te makkelijker komt fosfaat vrij. Als de verzadigingsgraad laag is, is de bindingssterkte van het oppervlak voor fosfaat groot waardoor de fosfaatbeschikbaarheid van de bodem laag is. Een lage fosfaatverzadigingsgraad kan voorkomen op gronden met een grote capaciteit om fosfaat te binden en/ of op gronden die in het verleden niet of nauwelijks zijn bemest. De fosfaatbeschikbaarheid is groot wanneer de verzadigingsgraad hoog is. Dit kan voorkomen op gronden met een beperkte bindingscapaciteit en/of op gronden die gedurende lange periode (decennia) ruim zijn bemest (structureel P-overschot).

P-AI is een maat voor de snel reagerende fosfaatfractie en is gerelateerd aan de fosfaatverzadigingsgraad. P-AI kan dus hoog zijn omdat enerzijds de bodem sterk is opgeladen met fosfaat door een langdurig en structureel P-overschot en/ of omdat de bodem een lage bindingscapaciteit heeft. Veel zandgronden hebben bijvoorbeeld een hoog P-AI getal door een lage bindingscapaciteit en een hoog netto P-overschot.

Plantenwortels nemen fosfaat (en alle andere nutriënten) op uit de bodemoplossing. De directe beschikbaarheid van fosfaat voor de plantenwortels wordt bepaald door de fosfaatconcentratie in het bodemvocht. Dit wordt aangeduid door P-intensiteit (I). In een landbouwbodem wordt de relatie tussen de fosfaatconcentratie in het bodemvocht (I) en de reversibel gebonden fosfaatreserves in de bodem (Q) bepaald door een bodemspecifieke sorptie-isotherm. De bindingscapaciteit en bindingssterkte zijn hierin de belangrijkste parameters om de isotherm te beschrijven. De bindingscapaciteit van de bodem is de som van de ijzer- en aluminium (hydr)oxiden en deze wordt bepaald in een oxalaat extractie (Fe-ox en Al-ox). De belangrijkste factoren die de adsorptie-isotherm kunnen beïnvloeden zijn zuurgraad van de bodem, de aanwezigheid van calciumionen en organische moleculen (Weng, et al., 2012). Planten kunnen in de directe omgeving van hun wortels zuren uitscheiden om de zuurgraad zo aan te passen dat de fosfaatbeschikbaarheid wordt verhoogd.

Voor het duiden van de fosfaattoestand van de bodem in relatie tot de beschikbaarheid voor het gewas en het bemestingsadvies zijn een aantal aspecten van belang, dit zijn:

- De fosfaattoestand van de bodem is belangrijker voor de fosfaatvoorziening van het gewas dan de actuele mestgift – een hoge fosfaatgift kan een lage fosfaattoestand niet compenseren (o.a. Henkens 1984).
- Van de mestgift wordt in het eerste jaar na toediening slechts een beperkt deel direct opgenomen door het gewas, de rest draagt bij aan de fosfaattoestand van de bodem of spoelt uit naar diepere bodemlagen of naar het watersysteem.
- Fosfaat bindt relatief sterk aan de bodem waardoor de directe beschikbaarheid van fosfaat in het bodemvocht aan het worteloppervlak zeer beperkt is en er nalevering moet plaatsvinden vanuit de fosfaatreserves in de bodem naar het bodemvocht.
- Voor de fosfaatreserves en de snelheid waarmee deze vrijkomen, wordt vaak onderscheid gemaakt tussen bodemfracties die snel reageren en fracties die langzaam reageren.

- De beschikbaarheid van deze snelle fosfaatfracties is afhankelijk van de bindingscapaciteit van de bodem en van de (historische) bemesting. Bij een zeer hoge bindingscapaciteit spreekt men van fosfaatfixerende gronden;
- Het grootste deel van het in de bodem aanwezig fosfaat is niet direct beschikbaar voor het gewas maar reageert langzaam omdat dit (sterk) is gebonden in en aan bodembestanddelen of onderdeel uitmaakt van de minerale- en stabiele organische fase.
- Het wortelstelsel van gewassen en de fosfaatbehoefte over de tijd zijn bepalend of er een risico is voor een (tijdelijk) fosfaatgebrek. Dit mogelijke gebrek treedt op wanneer de behoefte per worteloppervlak groter is dan de bodem op dat moment kan naleveren (Nawara et al., 2019).
- De ruimtelijke variatie in de fosfaattoestand is groot: binnen een gebied kunnen percelen sterk verschillen in fosfaattoestand (De Vries en Dechering, 1960; Van Rotterdam et al., 2019);
- Als gevolg van de natuurlijke vruchtbaarheid en/ of rijkelijke historische bemesting is fosfaat over het algemeen ruim aanwezig in de bodem. Dit blijkt onder andere uit het feit dat in veld- en monitoringsproeven geen respons in de opbrengst van aardappelen op fosfaatbemesting werd aangetoond (o.a. Bussink et al, 2014).

## 2.2 Fosfaattoestand meten

Toen specifieke extractiemethodes voor fosfaat eerst werden ontwikkeld was al bekend dat de fosfaatbeschikbaarheid een functie was van intensiteit (I), kwantiteit (Q) en buffercapaciteit (BP, Van der Paauw et al., 1971). Op basis van deze kennis werd de fosfaattoestand bepaald door middel van een combinatie van een maat voor I en een maat voor Q (De Vries et al., 1937, zoals beschreven in Van der Paauw et al., 1971). Q werd benaderd met behulp van een extractie met een zwak zuur (citroenzuur) en I werd benaderd met behulp van een extractie met water. Deze systematiek hield geen stand. Op basis van uitgebreide pot- en veldproeven die rond 1930 – 1940 waren uitgevoerd werd om economische redenen besloten om een maat voor Q te gebruiken voor grasland en een maat die sterker gerelateerd was aan I voor bouwland.

Voor grasland was de methode aanvankelijk een citroenzuurextractie. Deze methode werd om analytische en technische redenen in 1958 vervangen door een extractie met zuur ammoniumlactaat (P-Al). Het bemestingsadvies gebaseerd op P-Al in plaats van citroenzuur was niet gebaseerd op een herijking op basis van veldexperimenten, maar de vertaling was gebaseerd op de grafische relaties tussen P-citroenzuur en P-Al waarbij rekening werd gehouden met organische stof- en kalkgehalte (Ehlert en Van Wijk 1998). In 1968 werd voor veen-en zandgronden de P-Al methode vervangen door een extractie met water (Pw).

In 1970 werd de Pw-methode ingevoerd voor alle bouwlandgronden. Voor bouwland werd Pw geïntroduceerd omdat de relatie tussen Pw-waarden en gewasrespons beter was in vergelijking met P-Al (Paauw et al. 1971). Pw is deels een intensiteitsparameter maar wordt ook beïnvloed door de buffercapaciteit (Van Der Paauw, et al., 1971). Daarnaast bleek Pw onafhankelijk te zijn van andere bodemkenmerken zoals organische stof- en kalkgehalte, fosfaat fixerend vermogen, textuur klasse, pH, en de geografische herkomst. Voor bodems rijk aan ijzer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 10\%$ ) was de relatie minder uitgesproken (Henkens, 1973 in Paauw et al., 1971).

Door de ontwikkeling van kennis over de relatie tussen de beschikbaarheid van nutriënten in de bodem en behoefte van gewassen, zijn over de tijd voor elk nutriënt verschillende meetmethodes ontwikkeld. Door de hoge kosten, arbeid en gebruik van chemicaliën is aan het begin van de eeuwwisseling de keuze gemaakt om in te zetten op methodes waarmee meerdere nutriënten tegelijk gemeten kunnen worden. 0.01M  $\text{CaCl}_2$  werd als perspectiefvol gezien als een maat voor de hoeveelheid die direct beschikbaar is voor een plantenwortel (intensiteit, (Houba, et al., 2000). Onderzoek wees uit dat een combinatie van P- $\text{CaCl}_2$  (als maat voor I) én een methode die een maat is voor de P-kwantiteit nodig is om een goede inschatting te kunnen maken van de fosfaattoestand van de bodem (Van Rotterdam et al., 2012).

## 2.3 Fosfaatbemestingsadvies aardappel

### 2.3.1 Totstandkoming bemestingsadvies

In 1930 is in Nederland een begin gemaakt met het meten van de fosfaattoestand van de bodem en de ontwikkeling van het bemestingsadvies voor fosfaat op zandgronden en kort daarna ook voor klei- en zavelgronden (De Vries en Dechering, 1960).

Voor bouwland is het bemestingsadvies afhankelijk van de fosfaattoestand van de bodem en de gewasbehoefte. Het bemestingsadvies onderscheidt een gewasgericht advies voor het behalen van een economisch optimale opbrengst en een bodemgericht advies voor het, op rotatieniveau, handhaven van de streeftoestand van de bodem en eventuele reparatie daarvan. Voor het gewasgerichte advies worden gewassen afhankelijk van de fosfaatbehoefte ingedeeld in vijf gewasgroepen. Aardappel zit in klasse 1 omdat het een relatief hoge fosfaatbehoefte heeft. De streeftoestand van de bodem is ook afgeleid op basis van fosfaatbehoefte gewassen zoals aardappel.

De twee adviezen leiden doorgaans tot verschillende uitkomsten. Het beste is als voldaan wordt aan beide adviezen. Het gewasadvies geldt voor het specifieke gewas dat op dat moment wordt geteeld. Bij het bodemadvies gaat het erom dat er op rotatieniveau aan wordt voldaan. De (organische) mestgift wordt verdeeld over de gewassen in de rotatie afhankelijk van de fosfaatbehoefte en economisch rendement. Op rotatieniveau wordt dan zo veel mogelijk voldaan aan het bodemadvies. Voor de fosfaatbehoefte gewassen is het gewasadvies leidend. Omgekeerd zal in een bouwplan met weinig fosfaatbehoefte gewassen het bodemadvies vaak de bemesting bepalen. Er wordt dan meer gegeven dan het gewasadvies. Zie ook [www.handboekbodemenbemesting.nl](http://www.handboekbodemenbemesting.nl) voor een concreet rekenvoorbeeld.

### 2.3.2 Gewasgericht bemestingsadvies

Het gewasgerichte advies maakt onderscheid tussen gewasgroepen op basis van hun P-behoefte (zie [www.handboekbodemenbemesting.nl](http://www.handboekbodemenbemesting.nl)). Aardappel is hierin geclassificeerd als een P-behoefte gewas (gewasgroep 1). De reden hiervoor is dat het wortelstelsel slechts een beperkte dichtheid heeft en daardoor in contact is met een gering deel van het bodemvolume én dat de P-behoefte relatief groot is. De fosfaattoestand van de bodem moet daarom hoger zijn dan voor een gewas met een veel extensiever wortelstelsel.

De basis van het gewasgerichte advies is goed gegrond en redelijk oud. Zoals beschreven in Ehlert en Oenema (2017) wordt voor de verantwoording van het gewasgerichte bemestingsadvies verwezen naar Bakker (1968), Paauw en Sissingh (1968) en Bakker en Ris (1971). Aanvullingen daarop worden gegeven in cyclo 7906 van het Rijkslandbouwconsulentenschap Bodem en Bemesting uit 1971 (in samenspraak met Rijkslandbouwproefstation TNO/Instituut voor Bodemvruchtbaarheid). De waardering van de fosfaatklassen op (akker)bouwland wordt verantwoord door Bakker (1968), Paauw en Sissingh (1968) en Bakker en Ris (1971). Aanvullingen daarop worden gegeven in cyclo 7906 van het Rijkslandbouwconsulentenschap Bodem en Bemesting uit 1971 (in samenspraak met Rijkslandbouwproefstation TNO/Instituut voor Bodemvruchtbaarheid). Dit betreft de duiding van de waardering van het gewasgerichte bemestingsadvies zoals dat in 1968 (zand- en dalgrond) en 1970 (overige grondsoorten) werd ingevoerd.

### 2.3.3 Streeftoestand en bodemgericht advies

De aanleiding voor de invoering van het bodemgericht advies was de conclusie dat op gronden met een lage fosfaattoestand ook bij zware bemestingen bij aardappelen en bieten niet dezelfde opbrengsten konden worden behaald als op gronden met een ruime fosfaattoestand mogelijk geweest zou zijn (Henkens, 1984). Sinds 1984 wordt daarom geadviseerd om, naast het gewasgerichte advies, een bodemgerichte bemesting toe te passen. Het bodemgericht advies heeft als doel een te lage

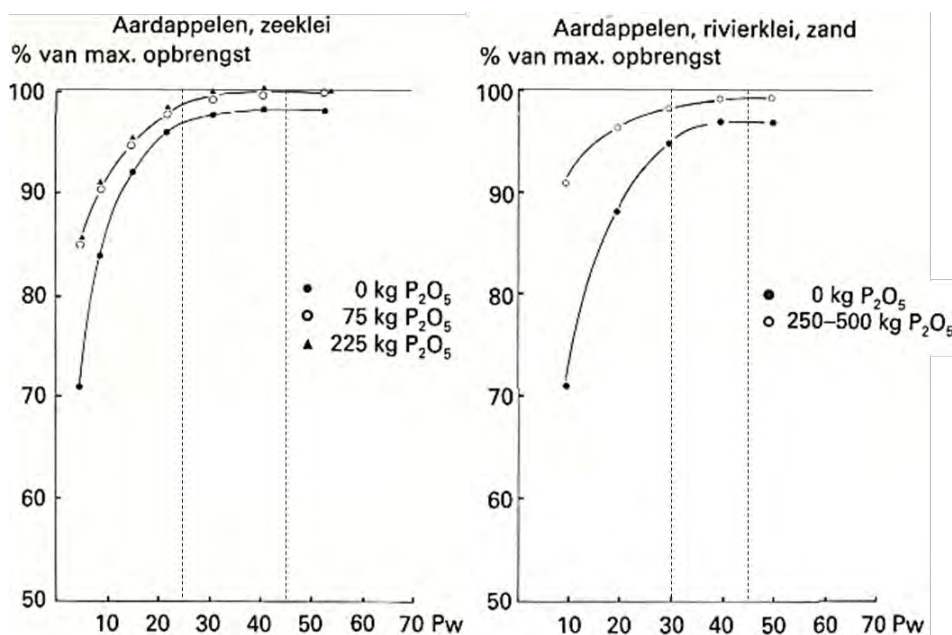
fosfaattoestand van de bodem te verhogen en de gewenste toestand te handhaven bij bouwplannen met fosfaatbehoefte gewassen (Henkens, 1984). Daarnaast was het doel om bij een goede voedingstoestand van de bodem minder afhankelijk te zijn van de werking van de verse bemesting, zodat het oogstrisico geringer is.

Op basis van proeven bij het Instituut voor Bodemvruchtbaarheid (IB) in Haren is de relatie tussen fosfaattoestand, zoals gemeten met Pw, en gewasopbrengst van aardappelen bij verschillende fosfaatgiften vastgesteld. Zie Figuur 2-2 voor de originele data waar het bodemgericht advies van is afgeleid.

Uitgangspunt bij het afleiden van de streefwaarden in het bodemgericht advies was dat er nog 1% opbrengstderving ten opzichte van de maximaal haalbare opbrengst geleden zou mogen worden (Henkens, 1984). Uit het proefmateriaal bleek dat op zeeleigonden voor aardappelen de maximale opbrengst bij een wat lagere fosfaattoestand werd bereikt dan op de overige gronden (Figuur 2-2). Als streefgetal voor de fosfaattoestand is voor zeeleigonden Pw-getal 25 aangehouden en voor de overige gronden een Pw-getal 30.

Omdat bij het streefgetal nog enige (1%) opbrengstderving werd geleden, was het advies om daar waar de fosfaattoestand boven het streefgetal ligt, de toestand te handhaven op dit hogere niveau tot een maximum Pw-getal van 45. Het maximum van Pw 45 werd gesteld omdat daarboven geen positief effect was waar te nemen van een hogere fosfaattoestand. Zelfs bij het achterwege blijven van een fosfaatgift was geen opbrengstderving waar te nemen bij een Pw-getal hoger dan 45.

Om de fosfaattoestand te handhaven was het advies om minimaal de hoeveelheid fosfaat te geven, die door het gewas wordt onttrokken plus het onvermijdbare verlies. Voor de akkerbouw bedraagt de fosfaatafvoer bij gemiddelde praktijkopbrengsten en afhankelijk van het bouwplan tussen de 45 en 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar (Schröder & Van Dijk, 2017). In hoofdstuk 4 is dit nader uitgewerkt voor 20 representatieve voorbeeldbedrijven. Voor vollegrondsgroentebedrijven varieert dit van 20 tot 55 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar, afhankelijk van het bouwplan. De hoogte van het onvermijdbare verlies hangt af van de fosfaattoestand van de bodem. Het is meer naarmate de toestand hoger is. In het Handboek Bodem en Bemesting ([handboekbodembemesting.nl](http://handboekbodembemesting.nl)) wordt een range aangegeven van 5 tot 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar voor handhaving van een Pw-getal van 25/30 respectievelijk 45. In paragraaf 3.4 wordt hier nader op in gegaan.



Figuur 2-2 Gemiddelde relatieve opbrengst van de proeven met aardappelen op zeelei met een gift van 0, 75 en 225 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (links) en rivierklei en zand met een gift van 0 of 250 – 500 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (rechts). De verticale stippellijnen zijn de streefwaardes die op basis van deze data zijn afgeleid voor het bodemgerichte advies. (Henkens, 1984)



### 2.3.4 Bemestingsadviezen op basis van P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>

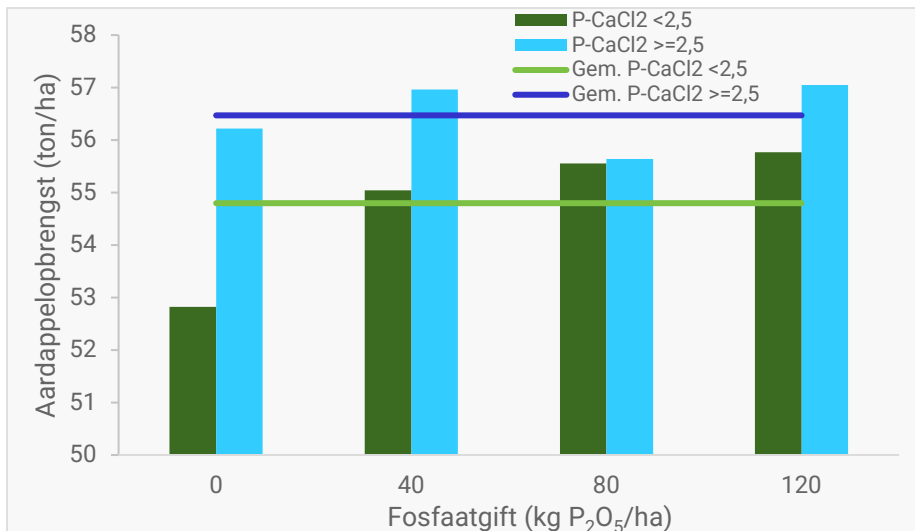
Een nauwkeurige bepaling van de fosfaattoestand van een grond is belangrijk omdat deze niet snel is te veranderen, de bodem belangrijker is voor de fosfaatvoorziening van het gewas dan de bemesting en onnodige belasting van het watersysteem voorkomen moet worden. Zoals al in het eerste deel van de vorige eeuw bekend was, doet de systematiek om de fosfaattoestand te bepalen op basis van twee parameters, een maat voor de intensiteit en kwantiteit, recht aan de manier waarop de bodem fosfaat levert aan een gewas (Van Rotterdam- Los, 2010). P-CaCl<sub>2</sub> is een maat voor de hoeveelheid die direct beschikbaar is voor een plantenwortel (P-intensiteit, (Houba, et al., 2000). P-Al is een maat voor de beschikbare reserves die nodig zijn om fosfaat gedurende het groeiseizoen te blijven leveren (P-kwantiteit). Naast dat P-CaCl<sub>2</sub> een belangrijke maat is voor de fosfaatconcentratie in het bodemvocht en direct beschikbaar is voor een plantenwortel, heeft het ook een relatie met de hoeveelheid die kan uitspoelen naar het watersysteem (Koopmans, et al., 2006). Een bemestingsadvies op basis van de combinatie P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> geeft dus niet alleen handvatten om het landbouwkundige advies te verbeteren maar ook om in de toekomst nog scherper te kunnen sturen op milieukundige randvoorwaarden.

Begin van deze eeuw is gestart met het testen van het twee indicatorenstelsel op basis van P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> als basis voor de bemestingsadviezen. De basis is gelegd met literatuuronderzoek, mechanistisch onderzoek in het laboratorium, en potproeven in de kas (Van Rotterdam-Los, 2010). Vervolgens is gestart met het valideren van dit systeem en het afleiden van nieuwe bemestingsadviezen via veldproeven en (her)analyse van bestaande datasets. De Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen (CBGV) nam de vernieuwde bemestingsadviezen voor grasland (2012) en maïs (2013) stapsgewijs over (Bussink et al., 2011a en b). Voor akker- en tuinbouw volgde nog gericht onderzoek bij aardappelen (Bussink et al., 2014). Een verdere validatie van het concept vond plaats na heranalyse van 179 veldexperimenten uitgevoerd tussen 1958 – 2008 uit het TAGA-bestand van Wageningen Universiteit. Uit deze proeven zijn bodemgerichte en gewasgerichte fosfaatadviezen afgeleid voor 5 gewasgroepen waarbij, net als bij de oudere adviezen, het meeste onderzoek naar aardappelen (gewasgroep 1) heeft plaatsgevonden en de andere adviezen daar in ieder geval ten dele van zijn afgeleid (Reijneveld en Brolsma 2020, notitie CBAV).

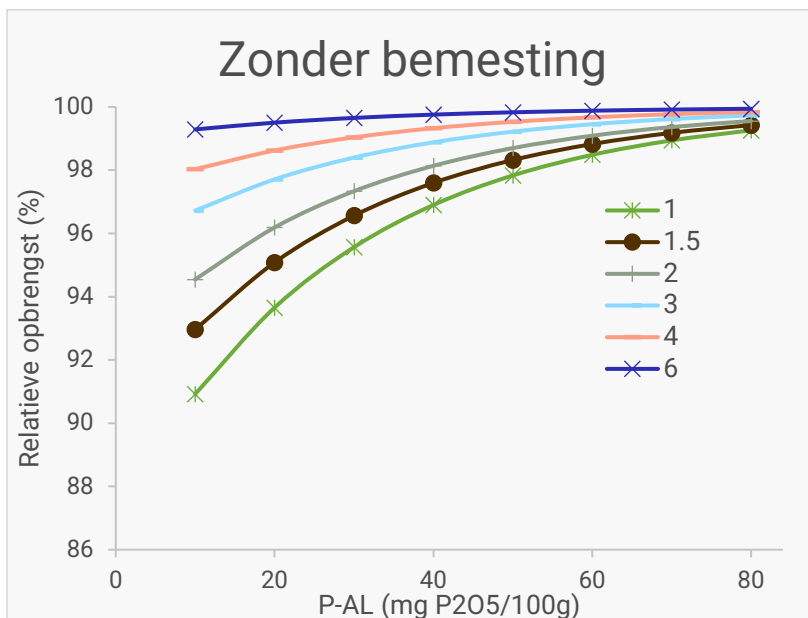
Op basis van proefgegevens van 1 jaar (2013) met een aanvulling met een PPO-AGV proef uit 2010 is een eerste conceptadvies ontwikkeld voor aardappelen (Bussink et al., 2014). In 2013 zijn op 58 praktijkpercelen op diverse grondsoorten en in diverse regio's met het gewas aardappel eenvoudige fosfaatproeven met 4 P-bemestingsniveaus (0, 40, 80 en 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) in enkelvoud aangelegd op in totaal 22 bedrijven. Er is gestreefd om per bedrijf de proef aan te leggen op 2 tot 3 percelen die duidelijk onderling verschil in Pw-getal in het traject tussen 15 en 50.

De aardappelopbrengsten konden goed (ruim 80% verklarend model) worden verklaard op basis van omgevingsfactoren (verschillen tussen proeflocaties), groeiduur, de stikstofgift, P-CaCl<sub>2</sub> en de ratio P-Al over P-CaCl<sub>2</sub>. Om de opbrengsten te verklaren was de fosfaattoestand belangrijker dan de fosfaatgift. Bij een lage toestand kon ongeacht de P-bemesting niet de opbrengst worden gerealiseerd van die bij een hoge toestand (zie Figuur 2-3). Bij een lage directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub><2,5) had bemesting met 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha een duidelijk opbrengst verhogend effect. Statistisch was er geen verschil in opbrengst tussen 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha en hogere P-giften (80 en 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Bij een hoge directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>>2,5) was de opbrengst gemiddeld hoger dan bij een lage directe P-beschikbaarheid en had bemesting geen effect op de opbrengst. Een P-CaCl<sub>2</sub> van 2,5 komt overeen met een gemiddelde Pw van 45 en een gemiddelde P-AL van 40. Deze proeven bevestigen eerdere resultaten waarin geen meeropbrengst wordt gerealiseerd boven een Pw van 45 (Figuur 2-2, Henkens 1984).

Ook in proeven zonder bemesting is de opbrengst een functie van zowel de directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) als de beschikbare reserves (P-Al, Figuur 2-4). Boven een P-Al van 50 is zelfs bij een zeer lage directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub> =1) en zonder P-bemesting de opbrengstderiving slechts 2%.



Figuur 2-3 Effect van fosfaatgift op de aardappelopbrengst van aardappelen bij een lage directe beschikbaarheid ( $P\text{-CaCl}_2 < 2,5$ ) en een hoge directe beschikbaarheid ( $P\text{-CaCl}_2 \geq 2,5$ ) in 58 monitoringsproeven in het veld (Bussink et al., 2014).  $P\text{-CaCl}_2$  van 2,5 komt overeen met een gemiddelde  $P_w$  van 45 en een  $P\text{-AL}$  van 40. Bij een  $P\text{-CaCl}_2$  groter dan 2,5 was er geen statistisch significant verschil tussen de fosfaatgiften.



Figuur 2-4 Relatie tussen relatieve aardappelopbrengst (%) en  $P\text{-AL}$  bij verschillende waarden voor  $P\text{-CaCl}_2$  zonder fosfaatbemesting (Bussink et al., 2014).

Om de relatie van opbrengst en fosfaattoestand in de bodem om te rekenen naar een fosfaatadviesgift zijn aannames gedaan wat betreft opbrengst en over wanneer de laatste kg fosfaatgift een economisch meeropbrengst per ha aan aardappels oplevert. De door Bussink et al. (2014) berekende fosfaatgiften zijn gebaseerd op recente proeven (proeven in 2013 en proeven tussen 2004 en 2010) en zijn lager dan de fosfaatgiften op basis van  $P_w$ . De  $P_w$  gebaseerde proeven zijn van (vele) decennia geleden. Het is goed mogelijk dat de respons op een fosfaatgift toen hoger was omdat de totale voorraad aan fosfaat in de bodem destijds lager was. Deels werden toen ook andere rassen gebruikt. Het past in een trend die men ook in Duitsland heeft waargenomen dat de gewasrespons op de fosfaattoestand is gedaald de afgelopen decennia bij eenzelfde waarde van het fosfaat-kengetal. Daarom zijn in Duitsland een paar jaar geleden de adviezen voor fosfaatbemesting verlaagd door alle toestandklassen één toestand op te schuiven; voldoende is nu ruim voldoende.

### 2.3.5 Vergelijking met omliggende landen

In Europa wordt P-AI in een aantal landen gebruikt als basis voor het bemestingsadvies, te weten: Zweden, Noorwegen, België- Vlaanderen, Slovenië, Lithuania en Hongarije (Meille et al., 2012).

#### Lange termijn proeven omringende landen

Door Nawara et al. (2017) zijn de bodemmonsters en resultaten van 11 lange termijnproeven die zijn uitgevoerd in België (n=2), Frankrijk (n=3), Verenigd Koninkrijk (n=4), Duitsland, (n=1) en Zweden (n=1) met variërende bodemkenmerken (ph, textuur, bindingscapaciteit), klimaat en bemestingsgeschiedenis, opnieuw geanalyseerd (Nawara et al., 2017). De auteurs werkten met relatieve gewasopbrengsten in relatie tot de fosfaattoestand van de bodem zoals bepaald met verschillende extractiemethoden. Kritische P-waarden werden vastgesteld bij een relatieve opbrengst van 95% wat gelijk staat aan 5% opbrengstderving. Voor alle gewassen, alle proeven en alle jaren samen was de fosfaattoestand waarbij nog 5% opbrengstderving plaatsvond bij P-AI 17 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g en bij een P-CaCl<sub>2</sub> van 1,7 mg P/kg. De bodemtextuur had weinig invloed op deze kritische waarden. Deze kritische waarden zijn laag vergeleken met de streeftoestand van de bodem die in Nederland wordt aangehouden. In Nederland is de streeftoestand echter gebaseerd op slechts 1% opbrengstderving en bepaald op basis van de meest fosfaatbehoefte gewassen, voornamelijk aardappelen. In overeenstemming met de hoge fosfaatbehoefte van aardappel was de kritische waarde van de fosfaattoestand van de bodem in de studie van Nawara et al. (2017) ook hoger voor aardappel dan voor de andere gewassen. De lange-termijnproeven met aardappel in de rotatie waren echter beperkt.

#### België

In navolging van de studie van Nawara et al. (2017) werden 23 nieuwe bemestingsproeven in Vlaanderen uitgevoerd op percelen met de texturen zand, zandleem en leem, voor de gewassen wintertarwe, maïs en aardappelen (Martens et al., 2020). Bij slechts 5 proeven werden significant hogere gewasopbrengsten waargenomen bij toenemende fosfaatgiften. In combinatie met data van historische 16 lange termijnveldproeven (1970-1988) werd voor alle gewassen samen een kritische P-AI van 25 afgeleid waarbij de opbrengstderving 5% was door de relatieve gewasopbrengst (opbrengst van de behandeling zonder fosforbemesting ten opzichte van de opbrengst bij de hoogste bemestingstrap) uit te zetten tegen P-AI. Voor alleen aardappel was de kritische fosfaattoestand bij P-AI 25 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g.

Op een lange termijn fosforveldproef op een leembodem in Ath (België) werden voor aardappelen significante opbrengstderving waargenomen bij een P-AI van 18 mg P/100g op de behandelingen zonder P-bemesting. Voor aardappelen werd vastgesteld dat de kritische P-AI hoger was dan 18 (Vanderdeelen et al., 1985; Vandendriessche et al., 1994).

Tabel 2-1 De kritische testwaarden en streefwaarden voor P-AI (uitgedrukt in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g) op basis van verschillende studies met lange-termijnproeven. P-kritisch is de testwaarden waarbij 5% opbrengstderving optreedt.

			Aardappel	Combi gewassen, proeven, jaren
			P-kritisch	P-kritisch
Nawara et al., 2017 (B, F, UK, D, S)	P-AI	P-kritisch	46*	17 (15-19)
Martens et al., 2020 (Be, proeven '16, '17 & '70-'88)	P-AI	P-kritisch	25	25 (10-27)
Streefwaarde België**	P-AI	P-streef		27 - 41
Kirchmann et al., 2020 (S)	P-AI	P-streef	19	14 - 23
Wiesler et al. 2018 (D)	P-AI	P-streef		14 - 24

\* gebaseerd op slechts 1 proefveld.

\*\* de streeftoestand van de bodem in België is gebaseerd op 0% opbrengstderving van fosfaatbehoefte gewassen

## Zweden

In Zweden zijn de bemestingsadviezen ook gebaseerd op P-AI (Albertsson, 2008). Over het algemeen wordt in Zweden geen opbrengstverhoging bij een P-AI boven 29 mg  $P_2O_5/100g$  vastgesteld. Van oudsher was de streefwaarde van de bodem P-AI 9 – 18 mg  $P_2O_5/100g$ . In recent grootschalig onderzoek in Zweden is voorgesteld deze streefwaarde te verhogen naar P-AI 14 – 23 mg  $P_2O_5/100g$ , in overeenstemming met de hogere opbrengsten (Kirchmann et al., 2020). In datzelfde onderzoek werd voor aardappel een streefwaarde van (slechts) 19 mg  $P_2O_5/100g$  vastgesteld.

Interessant was dat in het veldonderzoek de grenswaardes voor P-AI hoger waren dan de grenswaardes die voor dezelfde gewassen in bemestingsproeven werden vastgesteld. Mogelijk dat in de experimentele setting de variabelen die de grenswaarde beïnvloed zoals bodemstructuur en zuurgraad beter op orde waren dan in het veld.

## Duitsland

In Duitsland kent men 5 waarderingsklassen voor fosfaat; A (zeer laag), B (laag), C (optimaal), D (hoog) en E (zeer hoog). Het Duitse adviessysteem is er op gericht om toestand C te realiseren (vergelijkbaar met (ruim)voldoende bij ons. Bij deze toestand volstaat een fosfaatbemesting die gelijk is aan de gewasonttrekking. De afgelopen decennia was de waardering van de bodemtoestand onderwerp van discussie. Veel proefresultaten van de afgelopen decennia gaven aan dat de fosfaatgehalten in de bodem behorend bij een klasse C te hoog waren. Vaak kon men met beduidend lagere fosfaatgehalten in de bodem een optimale opbrengst realiseren bij bemesting op basis van onttrekking. Halverwege het afgelopen decennium heeft men op basis van alle voorliggende onderzoeken de fosfaatgehalten die horen bij de klassen A tot en met E verlaagd zoals aangegeven in de “Standpunkte des VDLUFA” (Wiesler et al. 2018). De streeftoestand (klasse C) komt nu overeen met 3,1-6,0 mg CAL-P per 100 gram grond. Het bodemextract CAL (Calciumammoniumlactaat) is een iets zwakker extractiemiddel dan AL (ammoniumlactaat). Omgerekend naar P-AI komen de klassegrenzen tot 2015 ongeveer overeen met P-AI 19 - 35 mg  $P_2O_5/100g$  voor alle grondsoorten en daarmee ook ongeveer met een Pw tussen 15 en 25 op basis van Figuur 2-6. De klassegrenzen vanaf 2015 komen voor de streeftoestand C ongeveer overeen met klassengrenzen voor PAI van 14 - 24 mg  $P_2O_5/100g$ . Zoals gezegd volstaat in Duitsland bij deze streeftoestand het bemesten op basis van onttrekking zonder compensatie voor onvermijdbare verliezen.

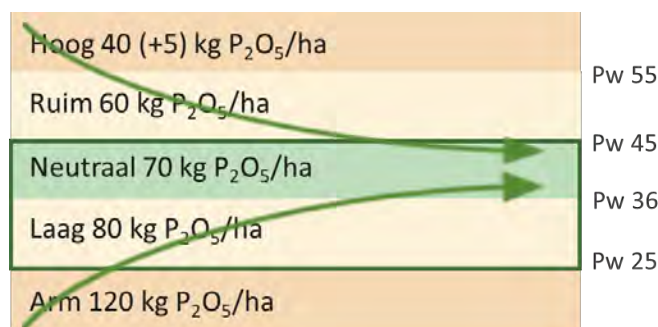
In Duitsland zijn de huidige klassengrenzen voor de streeftoestand ruwweg in lijn met die van Zweden. De streeftoestand in België is vergelijkbaar met die in Nederland en beduidend hoger dan die van Zweden en Duitsland.

## 2.4 Gebruiksnormen

De akkerbouwer heeft te maken met een beperking van de totale fosfaatgift door de wettelijke fosfaatgebruiksnormen. Het doel van deze normen is om uit- en afspoeling van fosfaat naar het grond- en oppervlaktewater te voorkomen. Dit risico neemt toe naarmate de fosfaattoestand van de bodem hoger is. Om ook de gewassen te voorzien van voldoende fosfaat zijn de gebruiksnormen gebaseerd op de fosfaattoestand van de bodem. Om tegemoet te komen aan beide doelstellingen is het streven om de fosfaattoestand in een landbouwbodem in de klasse Neutraal te houden of te krijgen (Figuur 2.5). Over de laatste decennia zijn door de voortdurende aanscherping van de mestwetgeving de P-overschotten sterk gedaald van 116 in 1986 naar gemiddeld nog maar 6 in 2017 (data CBS).

De P-gebruiksnormen anno 2020 zijn voor bouwland met de toestand arm (120 kg  $P_2O_5/ha$ ; laag 80 kg  $P_2O_5/ha$ , neutraal 70 kg  $P_2O_5/ha$ ; ruim 60 kg  $P_2O_5/ha$  en voor hoog 40 kg  $P_2O_5/ha$  per jaar). Zie Tabel 2-2 voor de bijbehorende grenzen voor Pw. In de klasse Hoog mag 5 kg  $P_2O_5/ha$  extra worden toegediend, voor een biologisch bedrijf is dit 10 kg. Voorwaarde is dat minimaal 20 kg  $P_2O_5/ha$  wordt toegediend

als organische-stofrijke mest in de vorm van strolijke vaste mest van rundvee, schapen, geiten of paarden, dikke fractie van mest van rundvee, champost, gft-compost, groencompost. De fosfaataanvoer via compost is voor 50% vrijgesteld. Dit betekent dat slechts de helft van de hoeveelheid fosfaat in compost meetelt voor de gebruiksnorm. In de praktijk zal dit niet tot grote veranderingen leiden omdat aanvoer van varkens- en runderdrijfmest de akkerbouwer geld oplevert. Voor aanlevering van compost moet worden betaald en de beschikbaarheid van compost is relatief beperkt.



*Figuur 2-5 Schematische weergave van de doelstelling van de gebruiksnormen: bij een fosfaattoestand in de klassen Hoog en Ruim is het doel deze te verlagen en in de klassen 'Arm' en Laag is de doelstelling deze te verhogen. In de klasse Neutraal is het doel de fosfaattoestand te handhaven. Het groene kader is het landbouwkundige afgeleide streeftraject voor de fosfaattoestand van de bodem en komt overeen met de klassen Laag en Neutraal zoals gedefinieerd voor de gebruiksnormen.*

*Tabel 2-2 Fosfaatgebruiksnorm anno 2020 (zie tekst voor nadere uitleg).*

Klasse	Pw-waarde	Hoeveel fosfaat (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /per ha)
Hoog	> 55	40 (+5/10)
Ruim	46 t/m 55	60
Neutraal	36 t/m 45	70
Laag	25 t/m 35	80
Arm	< 25	120

De jaarlijkse fosfaatafvoer van akkerbouwbedrijven varieert van 45 tot 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha en hangt sterk af van het bouwplan en de gerealiseerde opbrengsten. Op vollegrondsgroentenbedrijven is de afvoer lager, variërend van 20 tot 55 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha, afhankelijk van het bouwplan. Op de meeste bedrijven is de gebruiksnorm van 60 kg fosfaat per hectare genoeg om de jaarlijkse fosfaatafvoer met oogstproducten (inclusief graanstro) te compenseren (Schröder en Van Dijk, 2017). Toediening van deze hoeveelheid fosfaat in bouwplannen met een lagere afvoer leidt tot een potentiële stijging van de fosfaattoestand en meer verliezen naar de omgeving (water en diepere bodemlagen). Wanneer de fosfaattoestand stijgt, komen deze percelen op den duur in een hogere fosfaatklasse en daalt de wettelijk toegestane fosfaatgift tot een niveau dat gemiddeld lager is dan de onttrekking waardoor de fosfaattoestand van de bodem niet verder stijgt en weer (langzaam) daalt naar een lagere klasse. Alleen in de klasse Hoog is de gebruiksnorm lager dan de onttrekking van een gemiddeld bouwplan. De fosfaattoestand zal daardoor op termijn dalen. Dit gaat echter langzaam door de dikte van de bodemlaag (25 cm), omdat de netto negatieve fosfaatbalans beperkt is en omdat de bodem (veel) meer fosfaat kan naleveren dan wordt gemeten met Pw.

De klassenindeling voor de gebruiksnorm is ruim vergeleken met het landbouwkundige streeftraject. Voor de gebruiksnormen is de fosfaattoestand geclassificeerd als Laag bij een Pw kleiner dan 36. Het landbouwkundig bemestingsadvies hanteert echter een streeftraject van Pw 25/30 tot 45 (Figuur 2-2), wat samenvalt met de gebruiksnormklassen Laag en Neutraal (Figuur 2-5). Voordat de fosfaattoestand van een perceel de ondergrens van het landbouwkundig streeftraject bereikt is de gebruiksnorm met 80

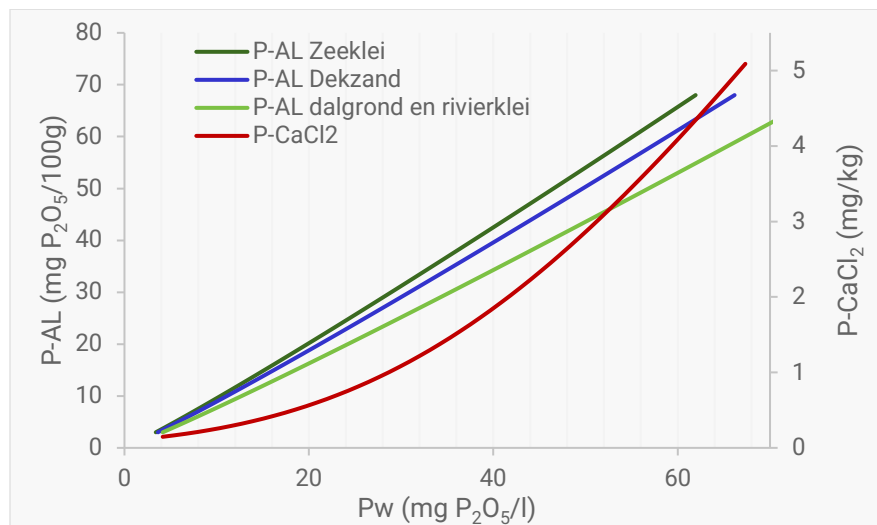
kg  $P_2O_5$ /ha ruim hoger dan de onttrekking. Naar verwachting zal Pw zich stabiliseren aan de bovenkant van het landbouwkundige streeftraject (Pw 45).

## 2.5 P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> als basis voor de gebruiksnormen

Vanaf 1 januari 2021 wordt een nieuwe systematiek geïntroduceerd om de fosfaattoestand te bepalen als basis voor de gebruiksnormen. In deze nieuwe systematiek wordt de fosfaattoestand bepaald op basis van de combinatie P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al voor zowel grasland als bouwland. De mestwetgeving sluit hierbij aan bij de gangbare meetmethodes die in de grote routine bodemlaboratoria worden gebruikt en waarin de fosfaattoestand wordt gemeten op basis van een combinatie van P-Al (Egnèr et al., 1960) en P-CaCl<sub>2</sub> (Houba e.a., 1992). Het Pw-getal wordt sinds 2004 niet meer standaard gemeten.

Er bestaat een nauwe relatie tussen P-Al en Pw wanneer onderscheid wordt gemaakt tussen grondsoorten (Figuur 2-6). Zeer kort door de bocht kan de aanname worden gedaan dat een waarde voor P-Al overeenkomt met Pw. Ook P-CaCl<sub>2</sub> en Pw zijn aan elkaar gerelateerd. Boven een Pw van ongeveer 30 is P-CaCl<sub>2</sub> gemiddeld groter dan 1 mg/kg en neemt sterk toe met toenemende Pw. Sinds 2004 wordt P-CaCl<sub>2</sub> toegevoegd aan de bemestingsuitslagen van het grootste routinematige laboratorium voor landbouwkundig grondonderzoek (Eurofins Agro, EA).

Reijneveld en Brolsma (2020, notitie CBAV) hebben op basis van het onderzoek van Bussink 2014, Bussink et al., 2010 en van Ehlert et al. (verwacht 2021) het gewasgerichte fosfaatadvies voor aardappel gepresenteerd, dat recent is opgenomen in het handboek bodem en bemesting ([www.handboekdbodemenbemesting.nl](http://www.handboekdbodemenbemesting.nl)).



Figuur 2-6 Gemiddelde relatie tussen P-Al en Pw en tussen P-CaCl<sub>2</sub> en Pw. P-CaCl<sub>2</sub> staat op de rechter y-as.

### Bemestingsadviezen in relatie tot gebruiksnormen

Het nieuwe gewasgerichte bemestingsadvies voor de meest fosfaatbehoefte gewassen (gewasgroep 1 met onder andere aardappel), zoals afgeleid op basis van de combinatie P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>, varieert tussen 150 kg  $P_2O_5$ /ha bij zeer lage fosfaattoestand tot nul bij een hoge fosfaattoestand (Tabel 2-3). Dit advies is gebaseerd op wat het gewas nodig heeft. In Tabel 2-3 zijn de fosfaatadviesgiften die lager zijn dan de gebruiksnormen die in 2021 zullen gaan gelden, in rood aangegeven.

De gebruiksnormen zijn afgeleid van de bodemgerichte adviezen om de fosfaattoestand van de bodem op een voldoende hoog peil te houden. Het bodemgerichte advies en de gebruiksnormen zijn bij klassen Neutraal (op een enkel geval na), Ruim en Hoog daarom hoger dan wat een fosfaatgevoelig gewas nodig

heeft (Tabel 2-3). In deze klassen is de doelstelling van de wettelijke gebruiksruimte om de fosfaattoestand in de klasse Neutraal te houden of te krijgen (Figuur 2-5). Bij een klasse hoger dan neutraal wordt daarom gestuurd op een netto negatief fosfaatbodemoverschot (onttrekking>bemesting). Vanuit het perspectief van het gewas zou een veel kleinere gift dan de gebruiksnorm toelaat voldoende zijn om het gewas van voldoende fosfaat te voorzien. Zelfs in het hogere deel van de klasse neutraal is de gebruiksnorm ruim ten opzichte van de gewasbehoefte in gewasgroep 1.

In de klassen 'Arm' en Laag is het gewasgerichte advies voor gewasgroep 1 hoger dan de gebruiksnormen. Voor een enkel geval in klasse Neutraal is het advies iets hoger dan de gebruiksnorm. In deze klassen is het doel van de gebruiksruimte om het gewas van voldoende fosfaat te voorzien en de fosfaattoestand van de bodem op te laden tot klasse Neutraal. De gebruiksnormen gelden echter op rotatieniveau waardoor er op gewasniveau in de akkerbouw voldoende ruimte is voor de fosfaatbehoefte gewassen.

Tabel 2-3 Bemestingsadvies voor gewasgroep 1 (waaronder consumptie- en zetmeel aardappel, en voor industriële verwerking) op basis van fosfaat gemeten met P-CaCl<sub>2</sub> (mg P/kg) en P-Al (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 g, Reijneveld en Krolsma 2020, notitie CBAV). In de onderste tabel staan de gebruiksnormen zoals voorgesteld door het ministerie van LNV. In de bovenste tabel zijn de geadviseerde giften zwart wanneer deze lager is dan de gebruiksnorm en rood wanneer deze hoger is dan de gebruiksnorm. Sommige cellen zijn leeg omdat deze combinatie niet voorkomt.

Gewasgroep 1		P-AL									
		20	21	30	31	45	46	55	56	70	
P-CaCl <sub>2</sub>	0.5	151	149	134	132	107					
	0.8	143	141	125	123	99	97	81			
	1.4	126	124	108	107	82	80	65	63	38	
	1.5	123	121	106	104	79	78	62	60	36	
	2.4	98	96	80	79	54	52	37	35	10	
	2.5	95	93	78	76	51	50	34	32	8	
	3.4	70	68	52	51	26	24	9	7	0	
	3.5		65	50	48	23	22	6	4	0	
	4				34	9	8	0	0	0	

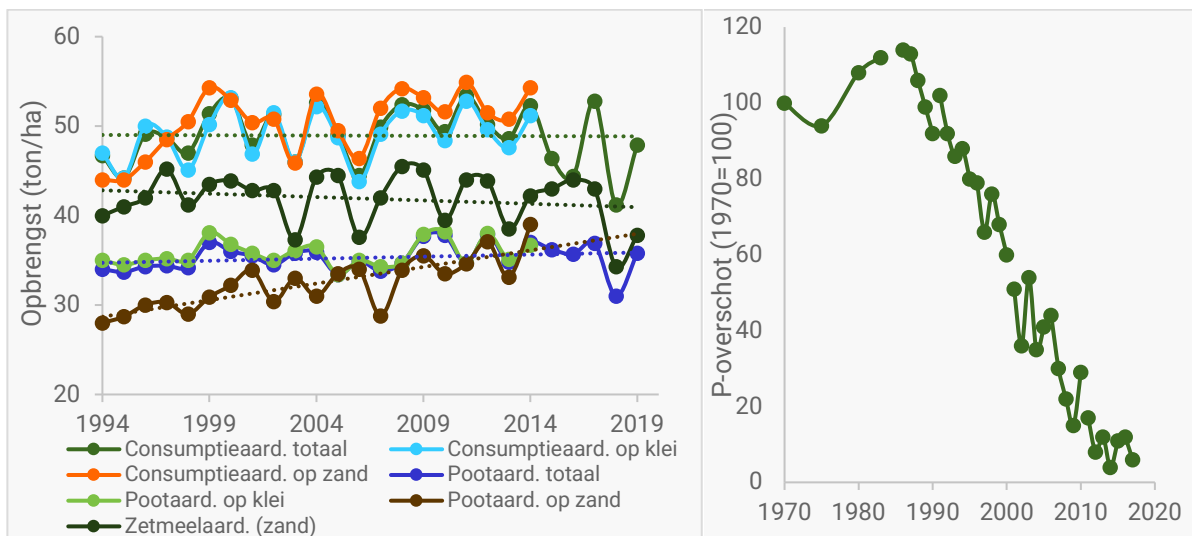
Tabel 2-4 Gebruiksnormen in combinatie met de gecombineerde fosfaatindicator zoals die (naar verwachting) vanaf 1 januari 2022 zal gelden met de fosfaatklasse en tussen haakjes de maximale P-gift.

GN Bouwland	P-AL				
	<20	21 - 30	31 - 45	46 - 55	> 55
P-CaCl <sub>2</sub> <0.8	Arm (120)	Arm (120)	Arm (120)	Laag (80)	Laag (80)
0.8 - 1.4	Arm (120)	Arm (120)	Arm (120)	Laag (80)	Neutraal (70)
1.5 - 2.4	Arm (120)	Arm (120)	Laag (80)	Neutraal (70)	Ruim (60)
2.5 - 3.4	Arm (120)	Laag (80)	Neutraal (70)	Ruim (60)	Hoog (40)
> 3.5	Laag (80)	Laag (80)	Neutraal (70)	Ruim (60)	Hoog (40)

# 3 Mestbeleid en fosfaatvoorziening

## 3.1 Fosfaattoestand en fosfaatvoorziening in Nederland

Om de algemene trends in fosfaatvoorziening en fosfaattoestand van de bodem te kunnen duiden zijn in Figuur 3-1 de variatie in opbrengst tussen 1994 en 2019 getoond en de verandering in de gemiddelde netto fosfaatbodemoverschotten sinds 1970 (beide op basis van data CBS). Sinds 1987 is, als gevolg van wetgeving, het fosfaatoverschot gedaald in Nederland. Voor aardappel zijn de opbrengsten sinds 1994 gelijk gebleven. Alleen pootaardappel op zandgrond laat een duidelijk stijgende lijn in opbrengsten zien. Voor zetmeelaardappel zou zelfs een licht dalende trend zijn waar te nemen. Voor consumptie- en zetmeelaardappelen kunnen opbrengsten sterk variëren afhankelijk van het weerjaar. De relatief stabiele opbrengsten in aardappelen staan in schril contrast met de opbrengstverhoging van ruim 30 ton/ha die bij bieten zijn gerealiseerd in dezelfde periode door verbeterde rassen, ziektebestrijding en teeltaanpassingen (data CBS, niet getoond).

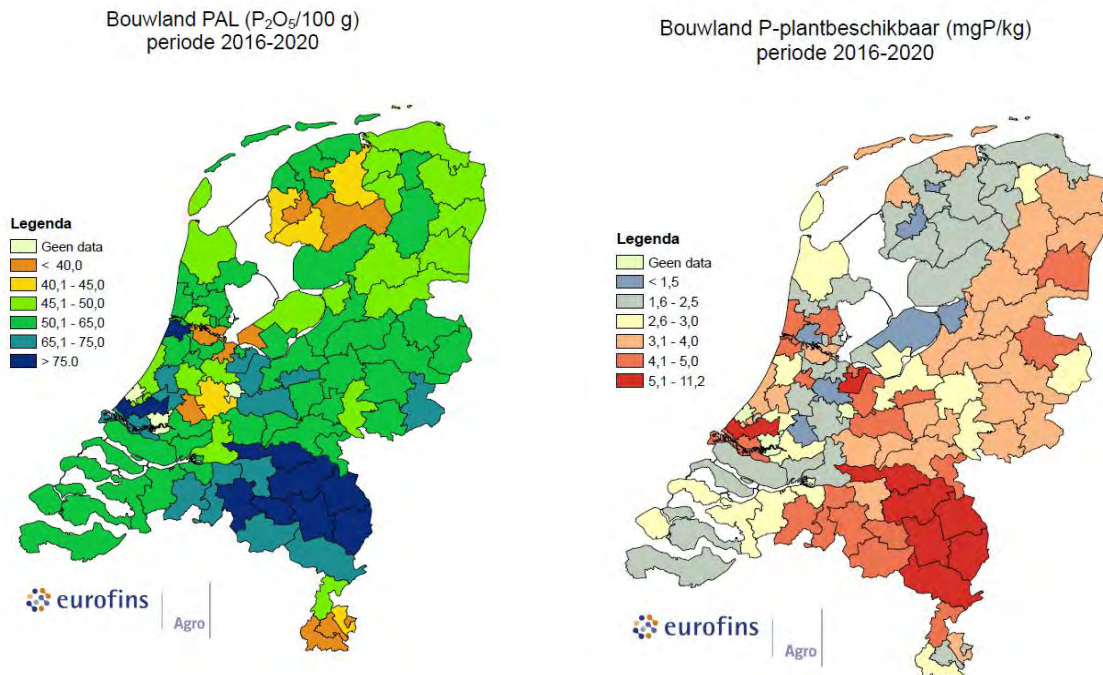


Figuur 3-1 Links: aardappelopbrengsten (ton/ha) gedifferentieerd naar type en grondsoort (data CBS). Rechts: verandering in de P-overschotten in de landbouw tussen 1970 en 2018 (data CBS).

Eurofins-Agro heeft, als grondlaboratorium die (verreweg) de meeste bodemanalyses op landbouwpercelen uitvoert, recent land-dekkende kaarten gepresenteerd met de fosfaattoestand van de bodem dat in gebruik is als bouwland (Figuur 3-2). De data van Eurofins laat zien dat in het grootste deel van Nederland de landbouwkundige fosfaattoestand gemiddeld ruim voldoende tot (zeer) hoog is. In grote delen van Brabant is de fosfaattoestand extreem hoog in vergelijking met de landbouwkundige streeftoestand van de bodem (Pw 25/30 tot 45). Slechts in enkele gebieden valt de fosfaattoestand binnen de landbouwkundige streeftoestand van de bodem. Dit is in de gebieden met veen en zware rivierklei in west Nederland, de lössgronden in Zuid-Limburg en in Friesland de delen met zware klei, veen en zand. Interessant is dat in Friesland alleen op de zware kleigronden de directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) ook lager is (<1,5). Ook op de lichte kleigronden van Flevoland en de zware



rivierklei in West-Nederlands is de directe P-beschikbaarheid relatief laag. De verhouding tussen P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> geeft inzicht in de bindingscapaciteit van de bodem en de mate waarin deze bindingscapaciteit is opgeladen. Door een grotere bindingscapaciteit zal P-CaCl<sub>2</sub> lager zijn bij eenzelfde P-Al waarde. Dit betekent niet dat het gewas ook minder fosfaat kan opnemen. Door een ruimere verhouding tussen P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> zal de directe P-beschikbaarheid worden gebufferd vanuit de beschikbare fosfaat reserves.



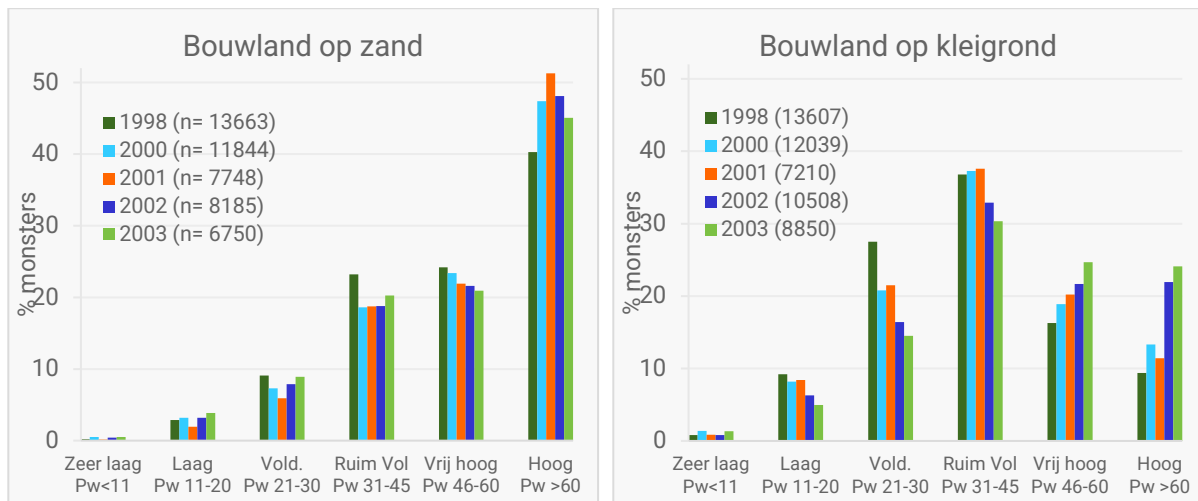
Figuur 3-2 Meest voorkomende P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> toestanden in Nederland van de percelen die in gebruik zijn als bouwland (Eurofins Agro, 2020)

### 3.2 Verandering van de fosfaattoestand in Nederland

Verschillende studies hebben op basis van data van Eurofins-Agro (Voorheen Blgg AgroXpertus) de algemene trends in de verandering van de fosfaattoestand van de bodem in Nederland onderzocht. Hiermee kan een grove indicatie worden verkregen wat betreft het effect van gebruiksnormen op de fosfaattoestand van de bodem. Schoumans (2007) merkt hierbij terecht op dat de monsters niet representatief zijn voor een aselechte steekproef. Het betreft namelijk uitsluitend een door de agrarisch ondernemer vrijwillig aangevraagde bemonstering van landbouwpercelen. De kans bestaat dat percelen met een (zeer) hoge fosfaattoestand niet snel zullen worden geanalyseerd omdat dit vanuit een gebruikruimte perspectief geen voordeel biedt. Zonder analyse worden percelen automatisch al in de categorie Hoog geplaatst. Alleen voor plaatsing in lagere fosfaatklassen moet men door middel van een analyse de actuele (<4 jaar) fosfaattoestand van de bodem kunnen aantonen. Hierdoor worden percelen met juist een lage/onvoldoende fosfaattoestand wellicht regelmatig en frequenter worden geanalyseerd. De mate van onbalans in de beschouwde datasets is niet te kwantificeren. Gelet op het feit dat jaarlijks wel een groot aantal monsters worden geanalyseerd (55.000 tot 70.000) en telers ook bodemonderzoek laten uitvoeren om juist inzicht te krijgen in hun bodemsamenstelling wordt ervan uitgegaan dat mogelijke trends wel inzichtelijk gemaakt kunnen worden.

Schoumans (2007) heeft de data van 5 jaren, tussen 1998 – 2003, geaggregeerd naar combinaties van regio, landgebruik, bodem (zand, klei veen) en waarderingsklasse (van lage fosfaattoestand naar hoge fosfaattoestand). In deze periode nam het gemiddelde fosfaatoverschot af van 75 naar 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.

Voor bouwland neemt in deze periode het procentuele aandeel monsters met een lage fosfaattoestand af en neemt het procentuele aandeel monsters met een hoge fosfaattoestand toe. Dit is grotendeels te wijten aan de verandering van de fosfaattoestand op kleigrond. In deze periode is het geschatte gemiddelde jaarlijkse fosfaatoverschot op klei 35 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Geschat wordt dat met deze overschotten de fosfaattoestand zoals benaderd met Pw één tot enkele eenheden per jaar zou toenemen. Op kleigrond is het grootste deel van de monsters in de klasse Ruim en is er dus ook ruimte om bij een fosfaatoverschot een fosfaatklasse op te schuiven (Figuur 3-3). Voor bouwland op zand is het grootste deel van de monsters al in de klasse Hoog en is er geen ruimte om een klasse op te schuiven, ondanks dat de fosfaattoestand door het netto P-overschot mogelijk wel stijgt.



Figuur 3-3 Classificering van de fosfaattoestand en de verandering in Pw in bouwland op zandgrond (links) en op kleigrond (rechts) voor de jaren 1998 en 2000 tot en met 2003. In de legenda is tussen haakjes het aantal datapunten weergegeven. Data Schoumans (2007).

In het onderzoek dat is uitgevoerd door De Haas et al., (2014) is wel de absolute verandering onderzocht tussen 2000 en 2012 waarbij onderscheid is gemaakt tussen de 14 door het LEI gehanteerde landbouwgebieden (Tabel 3-1). De verandering in de fosfaattoestand is onderzocht aan de hand van zowel P-CaCl<sub>2</sub> als P-Al. In alle gebieden laat de zwakke P-CaCl<sub>2</sub> extractie (intensiteitsparameter) een dalende trend zien. Deze dalende trend is niet significant omdat slechts van 6 jaar data beschikbaar was. In een wat latere studie (Van Grinsven en Bleeker, 2016) is vastgesteld dat tussen 2005 en 2015 P-CaCl<sub>2</sub> wel significant daalt.

Voor de vrij sterke P-Al extractie is de trend dat deze stabiel blijft of dat deze stijgt. Dat P-Al niet daalt is in overeenstemming met de studie van Van Grinsven en Bleeker (2016). Tussen 2000 en 2012 blijft P-Al stabiel in het Utrechts/ Hollands veengebied en in de zandgronden. Uitzondering zijn de zuidelijke zandgronden (zuidelijk veehouderijgebied en zuidwest Brabant) waar P-Al tussen 2000 en 2012 wel stijgt. Ook in de kleigebieden stijgt P-Al in die periode. Dat P-CaCl<sub>2</sub> daalt en P-Al stijgt lijkt met elkaar in tegenspraak maar kan goed worden verklaard uit twee zaken:

1. De direct beschikbare P-fractie daalt in overeenstemming met de dalende trend in de totale P-giften als gevolg van de aanscherping van de gebruiksnormen in de onderzochte periode;
2. De beschikbare P-reserves blijven gelijk of nemen toe omdat in deze jaren sprake is van een netto P-overschot.

Het effect van de verandering in de fosfaattoestand van de bodem op de beschikbaarheid voor het gewas is alleen onderzocht voor het fosfaatgehalte in graskuil (Tabel 3-1). Opvallend is dat voor alle landbouwgebieden en grondsoorten het gemiddelde fosfaatgehalte in het gras hoog is en het verschil in fosfaatgehalte klein; deze fluctueert tussen gemiddeld 4,4 en 4,7 mg P/ kg droge stof, met de hoogste

waarde bij de hoogste fosfaattoestand van de bodem. Het fosfaatgehalte in gras is hoog maar laat in alle 14 gebieden een dalende trend zien die in 9 gebieden significant is. Het fosfaatgehalte in de graskuil daalt significant in die gebieden waar P-Al niet veranderd en P-CaCl<sub>2</sub> wel een dalende trend laat zien. In de 5 gebieden waar het fosfaatgehalte in de graskuil onveranderd blijft, stijgt P-Al. In een aantal gebieden daalt het fosfaatgehalte in het gras ondanks dat P-Al stijgt; de zeekleigronden in westelijk Holland en Waterland en droogmakerijen en de rivierklei in het rivierengebied. Maar ook in de dekzanden in Zuidwest Brabant stijgt de gemiddelde P-Al en daalt het gemiddelde fosfaatgehalte in de graskuil (De Haas et al., 2014).

Tabel 3-1 Classificering van de fosfaattoestand en de verandering van de fosfaattoestand zoals bepaald op basis van P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL tussen 2000 en 2012. Voor P-CaCl<sub>2</sub> was alleen data tussen 2006 en 2012 beschikbaar (\* betekent niet significant). Data van De Haas et al., 2014.

Landbouwgebied	Grond	Klasse	P-CaCl <sub>2</sub> (mg P/kg)			P-AL (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /100g)			P-gehalte gras (mg P/kg ds)		
			Trend	Gem 2006	Afname '06-'12	Trend	Gem 2000	Toename '00-'12	Trend	Gem 2000	Afname '00-'12
C-Veehouderijgebied	zand	H	-*	5,5	-0,9	0	65	5	-	4,7	-0,4
N-Weidegebied	zand	RV	-*	3,1	-1,1	0	36	0	-	4,4	-0,5
O-Veehouderijgebied	zand	RV	-*	3,7	-1,3	0	47	2	-	4,5	-0,4
Veenkoloniën en Oldambt	zand	RV	-*	2,9	-1,1	0	38	3	-	4,5	-0,5
Z-veehouderijgebied	zand	H	-*	4,8	-1,1	+	53	11	0	4,5	-0,2
ZW-Brabant	zand	RV	-*	3,4	-1,1	+	44	7	-	4,4	-0,4
Bouwhoek en Hogeland	klei	RV	-*	3,9	-0,9	+	41	8	0	4,5	-0,2
IJsselmeerpolders	klei	RV	-*	2,3	-1,3	+	39	10	0	4,5	-0,3
Waterland en Droogmakerijen	klei	RV	-*	3,7	-1,6	+	38	13	-	4,7	-0,3
Westelijk Holland	klei	RV	-*	2,6	-0,9	+	39	12	-	4,5	-0,3
ZW-akkerbouwgebied	klei	RV	-*	2,7	-1,0	+	43	12	0	4,4	-0,2
Rivierengebied	rivierklei	V	-*	3,1	-0,9	+	32	13	-	4,5	-0,4
Hollands/Utrechts weidegebied	veen	RV	-*	2,0	-0,8	0	39	2	-	4,4	-0,5
Zuid-Limburg	löss	V	-*	3,3	-1,5	+	28	3	0	4,5	-0,3

In de Achterhoek is ook onderzoek gedaan naar de verandering van de bodemkwaliteit tussen 1995 – 2019, per 4-cijferig postcode en over 5 opvolgende tijdperiodes van vijf jaar (Fujita, 2020). In dit onderzoek is onderscheid gemaakt tussen grondsoort (zand en klei) en landgebruik (grasland, akkerbouw en mais). Op zandgronden is de fosfaattoestand zoals bepaald met P-CaCl<sub>2</sub>, Pw en P-Al hoger dan op kleigronden. Op de akkerbouw op zandgronden neemt de directe fosfaat beschikbaarheid, zoals benaderd met P-CaCl<sub>2</sub> en Pw, gemiddeld gezien af. Dit is in overeenstemming met de lagere P-giften door de aangescherpte gebruiksnormen. P-Al neemt gemiddeld genomen licht toe op de akkerbouw op zandgronden als gevolg van het netto fosfaatoverschot. Op de akkerbouw op kleigronden is gemiddeld geen verandering in de fosfaattoestand waargenomen.

**Samenvattend** kan worden gesteld dat de gebruiksnormen een effect hebben op de fosfaattoestand van de bodem. De maat voor het direct beschikbaar fosfaat in de bodem (P-CaCl<sub>2</sub>) daalt conform de dalende trend in de gebruiksnormen in de periode tussen 2005 en 2015. Dit is naar verwachting positief voor de waterkwaliteit, door de relatie tussen P-CaCl<sub>2</sub> en de P-concentratie die uitspoelt.

Ondanks deze dalende trend in de gebruiksnormen is er in de onderzochte jaren wel een netto fosfaatoverschot. De bodemvoorraad zoals bepaald met P-Al laat geen daling zien tussen 2005 en 2015 maar blijft gelijk. Op de kleigronden is een lichte stijging in de bodemvoorraad (P-Al) waargenomen tussen 2000 en 2012, in overeenstemming met het netto fosfaatoverschot. Per gebied kunnen de veranderingen verschillen. Gemiddeld is de fosfaattoestand op zandgronden hoger dan op kleigronden.

In de gebieden waar het direct beschikbaar fosfaat daalt en P-AI onveranderd blijft is een gebiedsgemiddeld netto afname in het fosfaatgehalte in gras waar te nemen, maar die nog steeds ruim boven de streefwaarde ligt.

### 3.3 Verandering organisch stofgehalte in Nederland

Het gehalte aan organische stof in bodemonsters van Eurofins in de periode 1985 tot 2015 laat gemiddeld over alle grondsoorten een stabiele tot licht stijgende trend zien voor grasland, bouwland (akkerbouw) en maïsland (Velthof et al., 2017). Vergelijkbare trends zijn eerder ook gevonden door Reijneveld et al. (2009) voor de periode 1984-2004. Het organische stofgehalte is stabiel of neemt toe bij akkerbouw op dekzand en rivierklei in de periode 2005-2015. In de andere akkerbouwgebieden blijft het organische stofgehalte stabiel. De 95%-betrouwbaarheidsintervallen laten zien dat de spreiding in trends soms behoorlijk groot is. Dit wordt veroorzaakt door de veranderingen in de populatie percelen die jaarlijks worden geanalyseerd. De studie van Velthof et al. (2017) toont aan dat er geen gewasgroep-grondsoortcombinaties zijn waarin op nationaal niveau sprake is van een daling van het gehalte aan organische stof in de periode 2005-2015. De implementatie van het mestbeleid (MINAS in 1997 en het gebruiksnormenstelsel in 2006) heeft gemiddeld dus niet geleid tot een daling van het gehalte aan organische stof in landbouwgronden.

### 3.4 Verandering fosfaattoestand in relatie tot het fosfaatoverschot

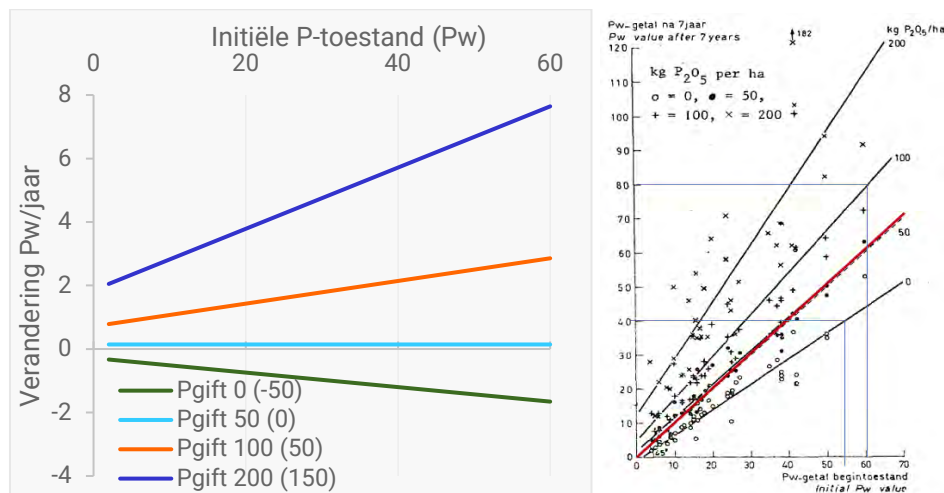
Een verrijking van de fosfaattoestand in de bouwvoor vindt plaats door een netto positief bodemoverschot (bemesting hoger dan onttrekking). Maar ook de mobilisering vanuit minder beschikbare bodemfracties en de aanvoer uit diepere bodemlagen kunnen de beschikbare fosfaatfracties in de bouwvoor vergroten. Een verarming van de fosfaattoestand vindt plaats door een netto negatief bodemoverschot (bemesting lager dan de onttrekking door gewassen), vastlegging in minder beschikbare fosfaatfracties en uitspoeling naar diepere bodemlagen.

Het effect van verschillende langjarige fosfaatbalansen (gift minus onttrekking) op de verandering van de fosfaattoestand is in vrij veel studies onderzocht. De oudste Nederlandse proeven worden door Prummel in 1974 beschreven. Aan de hand van veeljarige proeven op verschillende grondsoorten bij verschillende giften werd het verband tussen boven of onder de gewasonttrekking toegediende fosfaatgiften en de daardoor veroorzaakte verandering van het Pw-getal onderzocht. In deze proeven werden jaarlijks op de afzonderlijke veldjes verschillende hoeveelheden fosfaat (superfosfaat) gegeven met een proefduur van 5 tot 15 jaar, enkele nog langer. De meeste proeven zijn uitgevoerd in de periode in of na de 2<sup>e</sup> wereldoorlog tot omstreeks 1955, enkele tot omstreeks 1966 op zandgrond (n=14), dalgrond (n=2), zeeklei (n=18), rivierklei (n=3) en löss (n=2).

De gemiddelde verandering van het Pw-getal onder invloed van de fosfaatbalans wordt voornamelijk bepaald door de fosfaattoestand van de grond (Figuur 3-4). Bij een lager Pw-getal is meer fosfaat nodig voor een bepaalde stijging dan bij een hoger Pw-getal. Dit kan worden verklaard door een sterker fosfaatvastlegend vermogen van gronden met een lager Pw-getal dan met een hoger Pw-getal. Een fosfaatgift van 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha kwam gemiddeld overeen met evenwichtsbemesting. In deze proeven was er gemiddeld geen verandering in het Pw-getal bij evenwichtsbemesting. Interessant is de waarneming dat de verandering in Pw getal als gevolg van verschillende fosfaat-balansen niet wordt beïnvloed door verschillen in grondsoort.

Figuur 3-4 laat zien dat de snelheid waarmee de fosfaattoestand verandert een functie is van de initiële fosfaattoestand. Bij een initieel lage toestand is (nog) niet duidelijk tot welk niveau de toestand toeneemt, al zijn er aanwijzingen dat een bemesting van 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha onvoldoende is om tot een neutrale toestand te komen (Ehlert et al., 2018). Dit komt omdat de verandering in fosfaattoestand niet

onveranderd doorgaat. Na verloop van 10 jaar stabiliseert de fosfaattoestand afhankelijk van het gehandhaafde fosfaatoverschot – een nieuw evenwicht stelt zich in tussen fosfaatoverschot en fosfaattoestand.



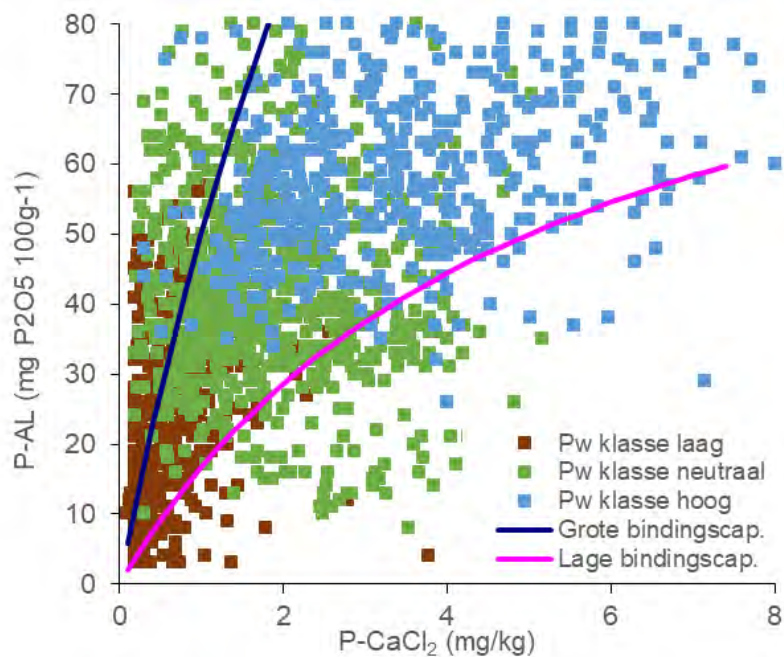
Figuur 3-4 De gemiddelde jaarlijkse verandering van het Pw-getal in proeven van het IB-Haren op zandgrond (n=14), dalgrond (n=2), zeeklei (n=18), rivierklei (n=3) en löss (n=2) onder invloed van de fosfaatgift. Rechts de originele data zoals gepresenteerd door (Prummel, 1974) en links de bewerking van deze data naar de snelheid waarmee de fosfaattoestand veranderd als functie van de initiële fosfaattoestand bij verschillende fosfaatgiften.

Dat de verandering in de fosfaattoestand wordt bepaald door de initiële fosfaattoestand en het fosfaatoverschot is na deze eerste uitgebreide proeven in verschillende studies, bij verschillende fosfaatbodemoverschotten vastgesteld. Naast de gepresenteerde data van Prummel (1974, Figuur 3-4) vonden Johnston en Poulton (2019) een eerste orde afname in P-Olsen voor gronden die geen fosfaatbemesting meer kregen voor 14 jaar. Op percelen met P-Olsen lager dan 10 mg P/kg veranderde deze niet gedurende de 14 jaren van het experiment terwijl het perceel met de hoogste fosfaattoestand daalde van P-Olsen 58 mg/kg naar 22 mg/kg. Bij een uitmijnerperiment in een Drents beekdal werd dit ook aangetoond voor P-AI (Van Rotterdam en Postma, 2018).

In een recente studie hebben Amery et al. (2021) data van 33 lange termijnproeven (3 tot 51 jaar) uit 5 Noord-Europese landen geanalyseerd met in totaal 265 datapunten. Uit hun bevindingen blijkt ook dat de verandering in de fosfaattoestand zoals gemeten met P-AI een functie is van zowel het fosfaatoverschot (bemesting – onttrekking) als van de P-AI-waarde van de bodem. Ook blijkt dat andere bodemparameters niet van invloed zijn op de verandering in P-AI. Een formule is afgeleid waarmee de verandering in P-AI in de tijd als functie van de initiële P-AI waarde en het fosfaatoverschot kan worden berekend (Vergelijking 3, paragraaf 1.3). De formule blijkt van toepassing op zowel positieve (bemesting > onttrekking) als negatieve (bemesting < onttrekking) fosfaatbalansen. Hoe hoger de fosfaattoestand en hoe groter de fosfaatbalans des te sneller veranderd de fosfaattoestand. Van de fosfaatoverschotten wordt slechts gemiddeld een kwart teruggevonden in een verandering van P-AI. De rest 'verdwijnt' naar diepere bodemlagen en naar langzaam reagerende fosfaatfracties. Anderzijds daalt P-AI veel minder dan verwacht mag worden van een negatief overschot door aanvoer uit diepere bodemlagen en uit langzaam reagerende fosfaatfracties.

Wanneer de fosfaattoestand wordt gekarakteriseerd op basis van de combinatie P-AI en P-CaCl<sub>2</sub> in plaats van alleen op basis van Pw, kan onderscheid worden gemaakt tussen gronden met een hoge en een lage bindingscapaciteit. In Figuur 3-5 is getoond dat voor gronden met een lage bindingscapaciteit de afname in de fosfaattoestand vooral tot uiting zal komen in een daling van de directe fosfaatbeschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>). Desorptie-experimenten hebben aangetoond dat de snelheid waarmee fosfaat aan een bodem kan worden onttrokken direct een functie is van P-CaCl<sub>2</sub> (Van Rotterdam et al., 2012). Bij gronden met een hoge P-CaCl<sub>2</sub> als gevolg van een lage bindingscapaciteit

zal de fosfaattoestand daarom sneller dalen dan bij gronden met een lage  $P\text{-CaCl}_2$  als gevolg van een hoge bindingscapaciteit.



Figuur 3-5 Variatie in  $P\text{-Al}$  en  $P\text{-CaCl}_2$  voor verschillende  $Pw$ -klassen. Daarnaast zijn de hypothetische sorptie-isothermen getoond voor een bodem met een grote bindingscapaciteit en voor een bodem met een lage bindingscapaciteit.

### 3.4.1 Evenwichtsbemesting en onvermijdbare verliezen

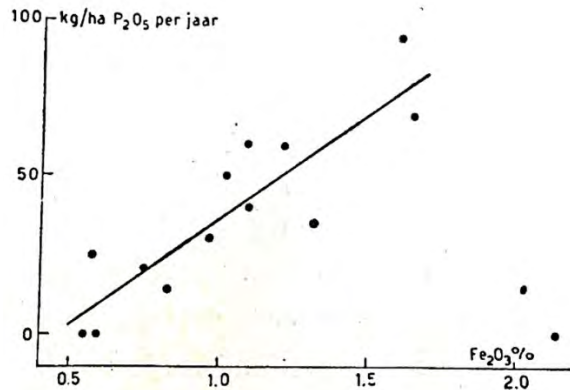
De gebruiksnormen zijn vastgesteld op het principe dat de fosfaattoestand van de bodem binnen het streeftraject wordt gehandhaafd dan wel dat dit streeftraject wordt bereikt. Om het streeftraject te handhaven moet de fosfaatgift dus in ieder geval gelijk zijn aan de fosfaatonttrekking (op rotatie niveau). Onderzoek wijst echter uit dat de fosfaatgift hoger moet zijn dan de fosfaatafvoer om een voldoende fosfaattoestand te handhaven omdat het toegediende fosfaat reacties aangaat met bodembestand-delen, deels in humus omgezet wordt, deels uit- en afspoelt en deels getransporteerd wordt naar diepere bodemlagen. Een deel van het toegediende fosfaat wordt omgezet in fosfaatvormen die niet in oplossing gaan met de methoden van grondonderzoek voor de bemestingsadviesing, zoals  $Pw$  en  $P\text{-Al}$ . Om de streefstoestand te handhaven zou dan een compensatie moeten plaatsvinden voor deze onvermijdbare verliezen.

Eerder gerapporteerde indicatieve waarden voor deze onvermijdbare verliezen zijn 10 à 20 kg  $P_2O_5$ /ha bij klasse Neutraal en 30 kg  $P_2O_5$ /ha bij klasse Ruim voldoende (Ehlert en Dekker, 2009). Op een veeljarige veldproef op een zavelgrond te Lelystad werd bij een fosfaatklasse Neutraal een onvermijdbaar verlies van 11 kg  $P_2O_5$ /ha gevonden. Een fosfaatgift van 70 kg  $P_2O_5$ /ha was voldoende om het gewas van voldoende fosfaat te voorzien en de fosfaattoestand ( $Pw$  42) te handhaven (Ehlert et al., 2018). Het handhaven van een hogere fosfaattoestand resulteert dus in hogere onvermijdbare verliezen dan het handhaven van een lagere fosfaattoestand. Deze auteurs geven echter ook aan dat de onvermijdbare verliezen niet alleen afhankelijk zijn van de fosfaattoestand maar ook van toegediende fosfaatvorm, de transportmechanismen en de chemische eigenschappen van de bodem.

In lange-termijnproeven (10 jaar) met zand- en kleigronden ( $n$ = respectievelijk 7 en 8) met een fosfaattoestand die varieert tussen laag en ruim voldoende/ hoog is aangetoond dat de hoeveelheid  $P_2O_5$  die jaarlijks nodig is om de bestaande fosfaattoestand te handhaven, zoals benaderd met  $P\text{-citroen}$ , sterk wordt bepaald door de bindingscapaciteit van de bodem in de vorm van ijzeroxides ( $Fe_2O_3$ -gehalte). Hoe groter de bindingscapaciteit, des te meer fosfaat is nodig om de toestand te handhaven

(De Vries en Dechering 1960). In de proeven waren twee punten die hiervan afweken. Mogelijk was de fosfaattoestand in de uitgangssituatie daar laag waardoor deze stabiel bleef – ook bij lage fosfaatgiften en ondanks het hoge  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -gehalte.

De **verandering** in Pw-getal als gevolg van verschillende fosfaatbalansen lijkt dus vooral een functie van de initiële fosfaattoestand en niet te worden beïnvloed door grondsoort (o.a. Prummel 1974). Om een bepaalde fosfaattoestand te **handhaven** heeft de bindingscapaciteit van de bodem in de vorm van ijzeroxides daarentegen ook een effect op de hoeveelheid fosfaat die moet worden toegevoegd.



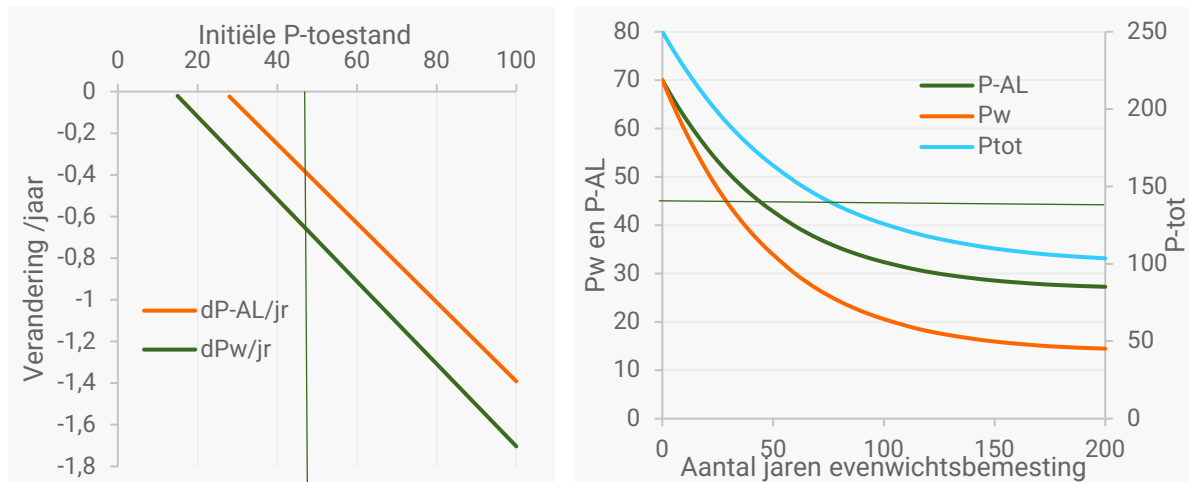
Figuur 3-6 De hoeveelheid  $\text{P}_2\text{O}_5$  dat jaarlijks nodig is om de bestaande fosfaattoestand, zoals benaderd met P-citroen, te handhaven uitgezet tegen het  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -gehalte van de bodem (De Vries en Dechering 1960). De twee afwijkende punten bij hoog  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -gehalte zijn niet meegenomen in de lineaire regressielijn.

Het langetermijneffect van evenwichtsbemesting is in verschillende studies onderzocht. Verloop et al. (2010) onderzochten het effect van evenwichtsbemesting tussen 1989 en 2006 op de fosfaattoestand en beschikbaarheid van de zandgrond op proefboerderij 'De Marke'. Op het schaalniveau van het bedrijf als geheel nam de gemiddelde Pw en P-Al af met respectievelijk 0.69 Pw-eenheid/ jaar en 0.84 P-Al-eenheid/ jaar tussen 1989 en 2006. Dit stond gelijk aan een afname van 26 en 25%, waarbij de fosfaattoestand in 1989 gemiddeld hoog was (Pw=57 en P-Al = 65). Het beeld wordt iets genuanceerder wanneer het eerste meetpunt (1989, 5 jaar voor de jaarlijkse meetreeks) niet wordt meegenomen. Dan is de afname in Pw en P-Al respectievelijk 14 en 19% tussen 1994 en 2006 (0,38 Pw-eenheid/ jaar en 0,65 P-Al-eenheid/ jaar).

Wanneer de individuele percelen apart worden onderzocht, ontstaat een genuanceerder beeld. De afnamesnelheid in Pw en P-Al bij evenwichtsbemesting blijkt een simpele lineaire functie van de initiële Pw dan wel P-Al (Figuur 3-7). Dit betekent dat hoe hoger de initiële fosfaattoestand, des te sneller neemt deze af. De afname gaat echter ook steeds langzamer naarmate de fosfaattoestand daalt waarbij op deze zandgrond een evenwicht ontstaat bij Pw=15, P-Al= 27 en P-totaal van 100. Deze evenwichtsconcentratie is niet zomaar te extrapoleren naar andere gronden. Dit (hypothetische) evenwicht zou echter pas na 200 jaar zijn bereikt. Dit is ook niet realistisch omdat andere studies aantonen dat bij het handhaven van een bepaald fosfaatoverschot na ongeveer 10 jaar een nieuw evenwicht instelt (Ehlert et al., 2018).

Dit voorbeeld op basis van data van Verloop et al. (2010) laat duidelijk zien dat de snelheid waarmee de fosfaattoestand bij evenwichtsbemesting daalt, wordt bepaald door de actuele fosfaattoestand en dat de snelheid waarmee deze daalt steeds kleiner wordt. In de veeljarige proeven van Prummel (1974) bleef het Pw-getal gemiddeld genomen constant bij evenwichtsbemesting voor de verschillende grondsoorten. In een analyse van veeljarige fosfaatveldproeven op bouwland op drie verschillende locaties tonen Ehlert et al. (2018) aan dat zowel Pw als P-Al over de tijd sterk kunnen fluctueren maar dat bij het handhaven van een bepaalde fosfaatgift de fosfaattoestand (Pw-getal) na ca. 10 jaar stabiliseert.

In tegenstelling tot het principe van onvermijdbare verliezen bij evenwichtsbemesting tonen Amery et al., 2019 aan dat het gewas (veel) meer fosfaat ter beschikking heeft dan gemeten wordt door de P-AL methode in de bouwvoor. Hoewel P-AL een relatief sterke extractie is, wordt niet alle fosfor die beschikbaar is op lange termijn voor het gewas, vrijgemaakt. Na 23 jaar nulbemesting in een experiment in Ath (België) werd een daling van P-AL van 16 mg P/100 g naar 8 mg P/100 g geobserveerd (Vandendriessche et al., 1994). Deze verandering komt overeen met het 'verdwijnen' van ongeveer 630 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. De gewassen hebben echter in dezelfde periode bijna het dubbele van deze hoeveelheid afgevoerd. Dit fosfaat kwam deels uit diepere bodemlagen en deels uit langzaam reagerende fosfaatfracties.



Figuur 3-7 Verandering in de fosfaattoestand ( $P_w$ ,  $P\text{-AL}$  en  $P\text{-totaal}$ ) als gevolg van evenwichtsbemesting in een langetermijnproef op zandgrond op proefboerderij 'De Marke' over de jaren 1989, 1994 tot en met 2006. Berekend op basis van de data van Verloop et al., 2010.

### Gewasrespons op evenwichtsbemesting

In een analyse van de veeljarige fosfaatveldproeven op gras- en bouwland tonen Ehlert et al. (2018) aan dat bij een strikte evenwichtsbemesting en een fosfaatklasse Neutraal of Hoog er geen aanwijzingen zijn dat opbrengstderiving plaatsvindt. Bij een klasse Laag werd bij strikte evenwichtsbemesting een opbrengstderiving gevonden van 5 tot 6%, deze was groter op de zandgrond dan op de klei- en zavelgrond. Voor de fosfaatvoorziening van het gewas kunnen bodemlagen onder de bouwvoor ook bijdragen. De bijdrage van fosfaat uit diepere bodemlagen is kleiner op zand dan op zwaardere gronden. Daarnaast beïnvloedt de directe fosfaatbeschikbaarheid (benaderd met  $P\text{-CaCl}_2$ ) een eventuele gewasreactie.

### Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat een verandering van de fosfaattoestand van de bodem afhankelijk is van het netto fosfaatbodemoverschot en de initiële fosfaattoestand van de bodem. Grondsoort lijkt geen effect te hebben op de snelheid van verandering. De verandering is positief gerelateerd aan de fosfaattoestand in de bodem; hoe hoger de fosfaattoestand des te sneller kan deze veranderen bij een verandering van het fosfaatoverschot. De directe fosfaatbeschikbaarheid reageert het snelst op een verandering van het fosfaatoverschot.

Bij het handhaven van een bepaald fosfaatoverschot bereikt  $P_w$  na ca. 10 jaar een evenwichtsniveau (Ehlert et al 2018). In overeenstemming met de adsorptie-isotherm zullen de snel reagerende fosfaatfracties ( $P_w$  en  $P\text{-AL}$ ) dan niet of nauwelijks meer veranderen terwijl de direct beschikbare fosfaat-fractie ( $P\text{-CaCl}_2$ ) nog wel (sterk) kan veranderen. Een positief fosfaatoverschot wordt vastgelegd in langzaam reagerende fosfaatfracties (wat tot uiting komt in een hogere totaalvoorraad in



de bodem) en/of spoelt uit naar diepere bodemlagen. Welk proces dominant is, is afhankelijk van de bindingscapaciteit van de bodem. Het niveau waarop het Pw-evenwicht zich instelt is afhankelijk van het fosfaatoverschot en verschilt sterk voor de afzonderlijke proeven afhankelijk van de bindingscapaciteit van de bodem en de dikte van de bouwvoor.

Bij langdurige evenwichtsbemesting kan bij een fosfaattoestand in de klasse ruim voldoende tot hoog de fosfaattoestand langzaam dalen. De fosfaattoestand daalt zeer langzaam, en wanneer een lagere fosfaatklasse wordt bereikt zijn de toegestane fosfaatoverschotten weer positief en zal de fosfaattoestand niet verder dalen of zelfs licht stijgen.

De gewasreactie op evenwichtsbemesting is afhankelijk van de initiële fosfaattoestand. Is deze ruim voldoende of hoog dan is er geen gewasrespons te verwachten. Bij een fosfaattoestand in de klasse laag is er bij strikte evenwichtsbemesting wel een beperkte gewasderving. Omdat de fosfaattoestand van de bodem belangrijker is dan de actuele mestgift moet de bemestingsstrategie zich dan richten op het verhogen van de fosfaattoestand door een netto fosfaatoverschot die de onvermijdbare verliezen compenseert. Bij een neutrale fosfaattoestand is bij evenwichtsbemesting een gewasreactie niet te verwachten maar kunnen de aanvoer van fosfaat uit diepere bodemlagen en een voldoende hoge directe fosfaatbeschikbaarheid wel een rol spelen bij de fosfaatvoorziening. Wanneer bij de klasse neutraal gecompenseerd wordt voor het onvermijdbaar verlies is geen opbrengstderving en geen verlaging van de fosfaattoestand te verwachten.

# 4 Fosfaat- en organische stofbalansen voor 'standaard' bouwplannen

## 4.1 Fosfaatbalans voor 20 voorbeeldbedrijven

De berekende fosfaatbalans per voorbeeldbedrijf is weergegeven in Bijlage III, een samenvatting is gepresenteerd in Tabel 4-1. De resultaten worden per regio besproken. Belangrijkste conclusie is dat de fosfaatbalansen sterk zijn gekoppeld aan de fosfaattoestand van de bodem; alleen bij een hoge fosfaattoestand is de balans negatief (Figuur 4-1). In de 20 voorbeeldbedrijven komt dit voor op de zuidoostelijke zandgronden en in noordoost Nederland.

Tabel 4-1 Samenvatting van de fosfaatbalans voor de 20 voorbeeldbedrijven die samen representatief zijn voor de akkerbouwpraktijk in Nederland.

Gebied en rotatie	Scenario	Pw-getal	Fosfaatbalans bouwplan niveau		
			Aanvoer	Afvoer	Balans
<b>Zuidoostelijke zandgronden</b>	I.	50	63	61	2
Aardappel, Suikerbiet, Zomergerst, Ui, erwit/Boon, Groenbemester	II.	55	53	61	-8
	III.	60	40	58	-18
	IV.	60	41	58	-17
<b>Noordoost Nederland</b>	V.	30	80	54 (50-57)	26 (30-23)
Aardappel, Suikerbiet, Zomergerst, Groenbemester	VI.	40	70	54 (50-57)	16 (13-20)
	VII.	50	59	54 (49-59)	4 (0-10)
	VIII.	55	49	54 (49-59)	-5 (-10-0)
	IX.	55	49	54 (49-59)	-5 (-10-0)
	X.	60	40	54 (49-59)	-14 (-19--9)
<b>Zuidwestelijke zeeklei</b>	XI.	30	80	57 (51-63)	23 (17-29)
Aardappel, Suikerbiet, Wintertarwe, Graszaad, Ui, Groenbemester	XII.	30	80	57 (51-63)	23 (17-29)
	XIII.	40	69	57 (51-63)	11 (6-17)
	XIV.	40	70	57 (51-63)	13 (7-19)
	XV.	50	60	57 (51-63)	3 (-3-9)
	XVI.	50	60	57 (51-63)	3 (-2-9)
<b>Noordelijke/centrale zeeklei</b>	XVII.	30	80	53 (43-61)	26 (18-36)
Aardappel, Suikerbiet, Wintertarwe, Witlof, Ui, Peen, Groenbemester	XVIII.	40	70	53 (43-61)	17 (9-27)
	XIX.	30	80	61 (50-70)	19 (10-30)
	XX.	40	70	61 (50-70)	9 (0-20)

### **Zuidoostelijke zandgronden**

Voor drie van de vier voorbeeldbedrijven op de Zuidoostelijke zandgronden geldt dat er op bouwplanniveau minder fosfaat wordt aangevoerd dan afgevoerd omdat de fosfaattoestand in de klasse hoog valt. Bij het voorbeeldbedrijf in de fosfaatklasse Ruim ( $P_w = 50$ ) wordt meer fosfaat aangevoerd dan afgevoerd, het overschot is echter slechts 2 kg  $P_2O_5/ha$ . Voor de overige drie voorbeeldbedrijven met een hoge fosfaattoestand varieert de balans tussen -8 en -18 kg  $P_2O_5/ha$ .

### **Noordoost Nederland**

Uitgaande van gemiddelde gewasopbrengsten is de fosfaatbalans positief voor de voorbeeldbedrijven met een fosfaattoestand in de klassen Laag, Neutraal en Ruim en de daarbij horende gebruiksnorm van 60-80 kg  $P_2O_5/ha$ . Bij gemiddelde opbrengsten hebben bedrijven met een hoge fosfaattoestand en de daarbij horende gebruiksnorm van 40 kg  $P_2O_5/ha$  een negatieve balans die varieert tussen -4 en -19 kg  $P_2O_5/ha$ .

### **Zuidwestelijke zeeklei**

Uitgaande van gemiddelde opbrengsten wordt bij elk bedrijf op bouwplanniveau meer fosfaat aangevoerd dan afgevoerd en is de fosfaatbalans positief. De voorbeeldbedrijven met een lage en neutrale fosfaattoestand voeren op bouwplanniveau 70-80 kg  $P_2O_5/ha$  aan en hebben een overschot van 12 tot 24 kg  $P_2O_5/ha$ . De voorbeeldbedrijven met fosfaatklasse Ruim hebben een overschot op de fosfaatbalans van slechts 3 kg  $P_2O_5/ha$ . Ook wanneer wordt uitgegaan van hogere praktijkopbrengsten blijft de fosfaatbalans voor de meeste bedrijven positief. Slechts bij de bedrijven met fosfaatklasse Ruim ontstaat er dan een klein tekort op de balans, dit tekort is op bouwplanniveau slechts -3 kg  $P_2O_5/ha$ .

### **Noordelijke en Centrale zeeklei**

Voor alle vier voorbeeldbedrijven op de Noordelijke en Centrale zeeklei geldt dat meer fosfaat wordt aangevoerd dan afgevoerd. Bij de bedrijven met een lage fosfaattoestand wordt 80 kg  $P_2O_5/ha$  bemest en is het overschot op de balans tussen 19 en 36 kg  $P_2O_5/ha$ . Bij de bedrijven met een neutrale fosfaattoestand is het overschot op de balans tussen 9 en 17 kg  $P_2O_5/ha$ . De balans is minder positief voor bedrijven die consumptieaardappelen telen en bovengemiddelde opbrengsten behalen.

### **Opbrengsten en gehalten**

Het opbrengstniveau heeft consequenties voor de fosfaatbalans (zie voor uitgangspunten opbrengstniveaus Bijlage 1). Het opbrengstniveau heeft direct invloed op de fosfaatafvoer via de marktbaar opbrengst en indirect via het fosfaatgehalte van de marktbaar opbrengst. Een verandering in de gewasopbrengst heeft geen evenredig effect op de fosfaatbalans. Een 10% hogere gewasopbrengst leidt gemiddeld genomen slechts tot een 8,6% hogere fosfaatafvoer. Dat de fosfaatafvoer procentueel niet gelijk stijgt met de opbrengsten komt doordat het fosforgehalte in de gewassen daalt als opbrengsten stijgen door het optreden van verdunning (Schröder & van Dijk, 2017). De relatie tussen het fosfaatgehalte en gewasopbrengst is negatief (behalve bij pootaardappel). Ondanks stijgende opbrengsten zou de fosfaatonttrekking gelijk kunnen blijven omdat het fosfaatgehalte daalt (Ehlert et al., 2006). De Ruijter et al. (2020) geven echter aan dat de fosfaatafvoer altijd toeneemt bij een hogere opbrengst, al wordt het effect gedempt omdat het fosforgehalte daalt bij een hogere opbrengst (de Ruijter et al., 2020).

Veldproeven wijzen uit dat het fosforgehalte in het geoogste gewas toeneemt met een toenemende fosfaattoestand en/of fosfaatgift. Bij hoge bemestingen en hoge fosfaattoestanden is vaak sprake van een luxe-consumptie, met andere woorden het fosforgehalte neemt toe terwijl de opbrengst niet verder toeneemt (Ehlert et al., 2018).

### **Verandering fosfaattoestand van de bodem**

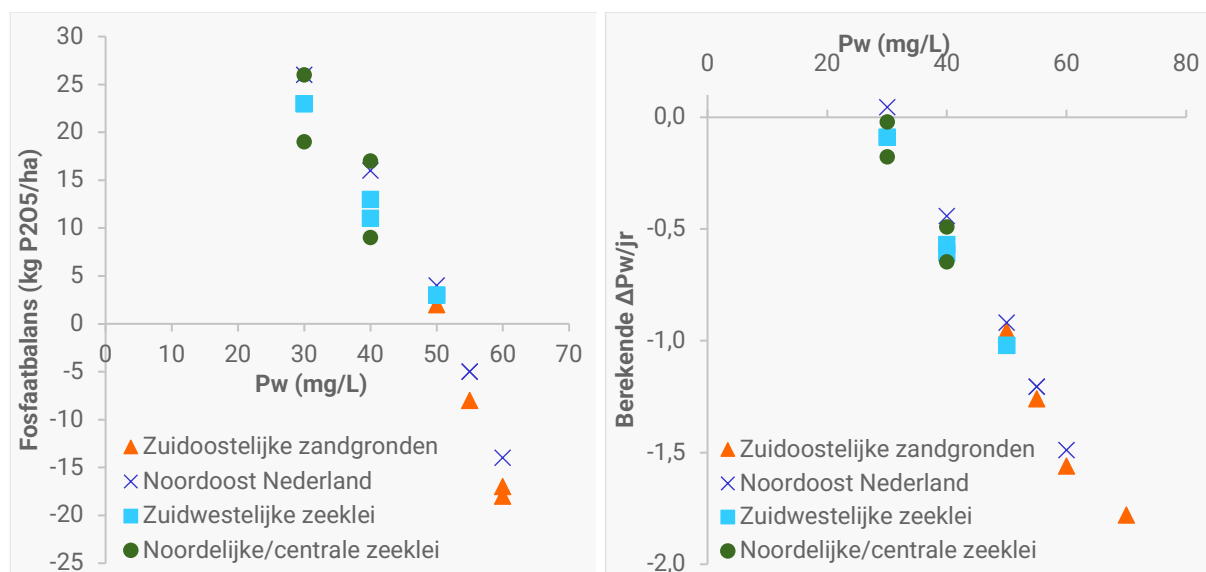
Per voorbeeldbedrijf is uitgegaan van een bepaalde fosfaattoestand van de bodem. Op basis van Eurofins-agro data (Figuur 3-2, Tabel 4-2) is op de Zuidoostelijke zandgronden de combinatie van een

P-CaCl<sub>2</sub> van 5-11 en een P-Al hoger dan 65 het meest voorkomend, dit komt het best overeen met de voorbeeldbedrijven III en IV. In Noordoost Nederland is op basis van Eurofins-agro data de combinatie van een P-CaCl<sub>2</sub> van 3-5 en een P-Al van 45-65 en het meest voorkomend, dit komt overeen met de bedrijven VIII en IX. Op de Zuidwestelijke zeeklei is de combinatie van een P-CaCl<sub>2</sub> van 1,6-3 en een P-Al van 50-65 het meest voorkomend, dit komt overeen met de bedrijven XV en XVI. Op de Noordelijke en centrale zeeklei is de combinatie van een P-CaCl<sub>2</sub> van 1,5-2,5 en een P-Al van 40-65 het meest voorkomend, dit komt overeen met de vier bedrijven XVII, XVIII, XIX en XX. Per gebied zijn ook voorbeeldbedrijven doorgerekend met lagere fosfaattoestand dan in de praktijk veelvoorkomend. Het doel van de gebruiksnormen is het sturen van de fosfaattoestand van de bodem door bij een hoge fosfaattoestand deze te verlagen door een netto fosfaattekort en bij een lage fosfaattoestand deze te verhogen door een netto fosfaatoverschot. Figuur 4-1 toont de resultaten van de berekende fosfaatbalansen voor de 20 voorbeeldbedrijven als functie van het Pw-getal. Hieruit blijkt voor de verschillende gebieden het beeld behoorlijk uniform is en dat bij een Pw van rond 52 de fosfaatgift in balans is met de fosfaatonttrekking op rotatieniveau. Bij een Pw groter dan 52 is de balans negatief en daaronder positief.

Daarnaast is op basis van een recente studie (Amery et al., 2021) een relatie afgeleid tussen de verandering in Pw (omgerekend uit P-Al) en de fosfaatbalans en initiële fosfaattoestand (vergelijking 3 in paragraaf 1.3). Hieruit blijkt dat bij Pw-waardes boven de landbouwkundige streefwaarde van 30 de fosfaattoestand zal dalen. Deze daling neemt toe naarmate P-Al/ Pw-hoger is en fosfaatbalans (verschil tussen bemesting en onttrekking) groter. Met de tijd wordt de verandering kleiner.

Tabel 4-2 Gemiddelde fosfaattoestand van de bodem zoals bepaald door Eurofins-Agro voor de vier gebieden waar de 20 voorbeeldbedrijven liggen.

Gebied	P-CaCl <sub>2</sub>	P-Al	Bedrijven
Zuidoostelijke zandgronden	5 - 11	>65	III en IV
Noordoost Nederland	3 - 5	45-65	XIII en IX
Zuidwestelijke zeeklei	1,6 - 3	50-65	XV en XVI
Noordelijke en centrale zeeklei	1,5 - 2,5	40-65	XVII, XVIII, XIX en XX



Figuur 4-1 Relatie tussen de berekende fosfaatbalans en de fosfaattoestand van de bodem zoals bepaald met Pw (links) en de relatie tussen de berekende verandering in Pw per jaar (vergelijking 3, Amery et al., 2021) en Pw voor 20 voorbeeldbedrijven die samen representatief zijn voor de aardappelteelt in Nederland. De landbouwkundige streefwaarde is Pw 25 voor klei en 30 voor de overige gronden.

### **Fosfaatklasse Laag**

In de noordelijke/ centrale zeelei, zuidwestelijke zeelei en in noordoost Nederland zijn er voorbeeldbedrijven met een lage fosfaattoestand (Pw 25 tot 35) en een positieve fosfaatbalans die varieert tussen 19 en 26 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jaar. De lage fosfaattoestand is voor deze voorbeeldbedrijven gekenmerkt door een Pw van 30. Vanuit een landbouwkundig perspectief is dit voldoende om, bij fosfaatgift die gelijk is aan de som van onttrekking plus onvermijdbare verliezen, het gewas van voldoende fosfaat te voorzien. De fosfaatoverschotten dienen met name om de fosfaattoestand te handhaven dan wel te verhogen. Naar verwachting leiden de berekende fosfaatoverschotten tot een Pw die stabiel blijft rond Pw 30 (Amery et al., 2021). Uit de studie van Ehlert et al. (2018) blijkt dat een bemesting van 70-80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha bij een initieel landbouwkundig geclassificeerde 'lage' fosfaattoestand leidt tot een stijging in de fosfaattoestand. Het is niet duidelijk tot welk niveau de fosfaattoestand toeneemt en er zijn aanwijzingen dat een bemesting van 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha onvoldoende is om in de klasse neutraal te komen. Landbouwkundig blijft de fosfaattoestand binnen de streefstoestand (Pw 25/30 tot 45). Bij een bemesting die voldoende compenseert voor de onvermijdbare verliezen (fosfaatoverschot 19 tot 26 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) is geen negatief effect op fosfaatvoorziening voor aardappelen te verwachten.

Vanuit de gebruiksnormen is de klasse Arm bij de nieuwe klassenindeling op basis van P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> sterk uitgebreid. Dit geeft de mogelijkheid om 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha aan te voeren wat een voldoende hoog fosfaatoverschot is om de fosfaattoestand te doen stijgen.

### **Fosfaatklasse Neutraal**

In de huidige praktijk hebben de percelen met een lage fosfaattoestand (Pw 36 tot 45) een fosfaatoverschot dat varieert tussen 9 en 25 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. De klasse Laag komt overeen met de hogere range binnen het landbouwkundige streeftraject van Pw 25/30 tot 45. Het berekende fosfaatoverschot voor de voorbeeldbedrijven (Pw van 40) komt zeer goed overeen met de indicatieve waarden voor de onvermijdbare verliezen van 10 à 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha bij klasse Neutraal (Ehlert en Dekker, 2009). In de klasse Neutraal zal als gevolg van de gebruiksnormen en bij de gangbare rotatie naar verwachting de fosfaattoestand van de bodem met 0,5 Pw eenheid per jaar licht dalen (Amery et al., 2021). De lichte daling van Pw, is met name te verwachten op gronden met een lage bindingscapaciteit. Een fosfaattoestand binnen streeftraject en een fosfaatgift die voldoende compenseert voor eventuele onvermijdbare verliezen leidt tot een voldoende hoge fosfaatvoorziening van aardappelen.

### **Fosfaatklasse Ruim**

Opvallend is dat evenwichtsbemesting (+/- 4 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) wordt bereikt bij fosfaatklasse Ruim (Pw 46 tot 55). Deze fosfaattoestand is ruim hoger dan het landbouwkundige streeftraject van Pw 25/30 tot 45. In de klasse Ruim, bij een Pw van 50, is de verwachting dat bij evenwichtsbemesting de fosfaattoestand van de bodem met één Pw-eenheid per jaar zal dalen (Amery et al., 2021). De fosfaattoestand daalt zeer langzaam, en wanneer een lagere fosfaatklasse wordt bereikt zijn de toegestane fosfaatoverschotten weer positief en zal de fosfaattoestand niet of nauwelijks verder dalen. In de fosfaatklasse Ruim is de fosfaattoestand van de bodem en de toegestane fosfaatgift voldoende voor de fosfaatvoorziening van aardappelen.

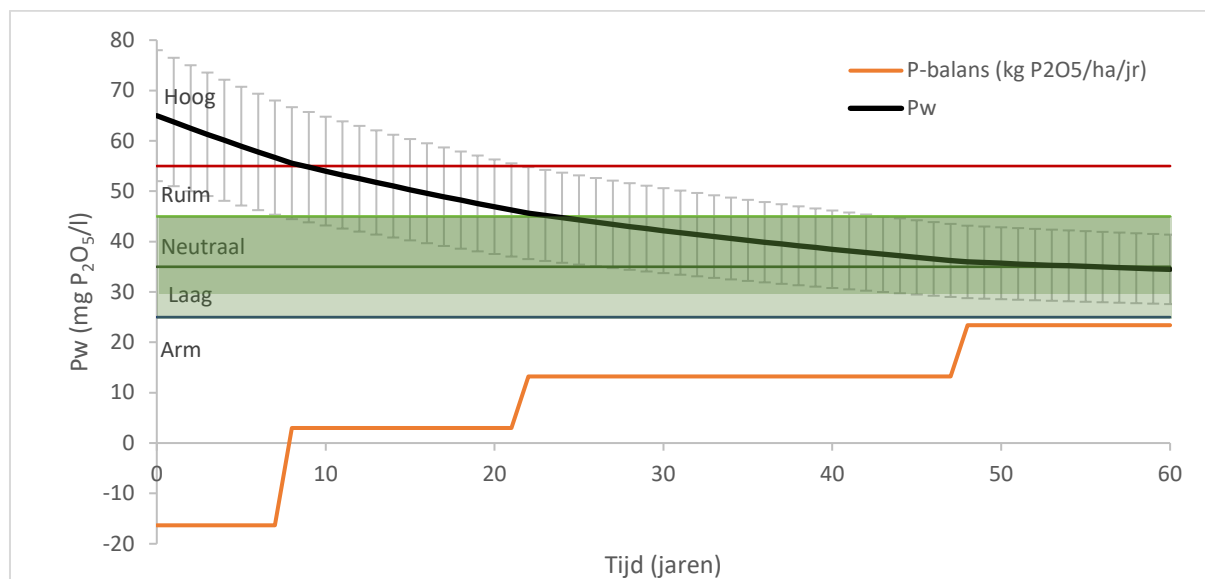
### **Fosfaatklasse Hoog**

Alle doorgerekende bedrijven met een hoge fosfaattoestand hebben een tekort op de fosfaatbalans, variërend van -2 tot -19 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Dit komt voor in een aantal voorbeeldbedrijven in de zuidoostelijke zandgronden en in Noordoost Nederland. Voor de voorbeeldbedrijven III en IV in de zuidoostelijke zandgronden is voor de fosfaatklasse Hoog een Pw van 60 aangehouden. Dit is echter laag vergeleken met de gemiddelde fosfaattoestand in de zuidoostelijke zandgronden waar de combinatie van een P-CaCl<sub>2</sub> van 5 tot 11 en een P-AL hoger dan 65 het meest voorkomt (data Eurofins-agro, Figuur 3-2). De zuidoostelijke zandgronden kenmerken zich door een relatief lage bindingscapaciteit (Figuur 3-5). In de zuidoostelijke zandgronden is de P-balans iets negatiever dan in noordoost Nederland. Dit vertaalt zich ook in een iets grotere verwachte daling van Pw (Amery et al., 2021). In combinatie met een gemiddeld hogere fosfaattoestand en lagere bindingscapaciteit is de verwachting dat met name P-CaCl<sub>2</sub> de

komende jaren zal dalen in de zuidoostelijke zandgronden. Dit zal geen gevolgen hebben voor de fosfaatvoorziening van aardappelen omdat de levering van fosfaat uit bodem en bemesting (meer dan) voldoende hoog is.

Deze resultaten zijn samengevat in Figuur 4-2. Figuur 4-2 laat zien hoe een initiële Pw van 65 over de tijd (60 jaar) verandert op basis van de huidige (2021) gebruiksnormen en de daarbij horende fosfaatbalans zoals berekend voor 20 modelbedrijven. Ter duiding zijn ook de wettelijke klassengrenzen aangegeven (horizontale lijnen) en is in groen het landbouwkundige streeftraject weergegeven waarbinnen het advies is om de fosfaatmestgift gelijk te stellen aan de onttrekking plus eventuele onvermijdbare verliezen. De fosfaattoestand stabiliseert rond een Pw van 35 bij een fosfaatoverschot van ongeveer 23 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jaar. Dit is op de grens tussen de klasse Laag en Neutraal en boven de landbouwkundige streefwaarde van Pw 30.

Dit is een worst-case scenario omdat studies aantonen dat een verandering in fosfaattoestand na ongeveer 10 jaar afvlakt. Daarnaast wordt het fosfaatoverschot bij een positieve balans vastgelegd in langzaam reagerende fracties, diepere bodemlagen en uitspoeling richting het watersysteem. Het opladen van de langzaam reagerende fracties en de diepere bodemlagen heeft een remmende werking op de verandering van de fosfaatbeschikbaarheid (Pw). Het zal naar verwachting daarom nog langer duren voordat een Pw van 65 zoals gemeten in de bovenste 25cm van de bodem, ook daadwerkelijk is gedaald tot rond Pw 35 dan de hier berekende 50 jaar.



Figuur 4-2 Berekende verandering van een initiële Pw van 65 over de tijd (60 jaar) op basis van de huidige (2021) gebruiksnormen en de daarbij horende fosfaatbalans zoals berekend voor 20 modelbedrijven. Ter duiding zijn ook de wettelijke klassengrenzen aangegeven (horizontale lijnen) en is in groen het landbouwkundige streeftraject weergegeven waarbinnen het advies is dat de fosfaatmestgift gelijk is aan de onttrekking plus onvermijdbare verliezen. Dit is een worst-case scenario. Zie tekst voor uitleg. Berekening is gebaseerd op Amery et al., 2021.

## 4.2 Organische stofbalans voor 20 voorbeeldbedrijven

De organische stofbalans is per voorbeeldbedrijf berekend en is weergegeven in Bijlage IV. Uit de resultaten blijkt dat met de huidige bedrijfsvoering elk voorbeeldbedrijf voldoende organische stof aanvoert om de afbraak te compenseren. Hoewel elk bedrijf een overschot op de balans heeft, is de variatie groot. Het overschot op de organische stof balans op bouwplanniveau varieert van 165 tot 1167 kg/ha. Een relatief laag overschot wordt gevonden op bedrijven waar varkensdrijfmest en mestmixen worden aangewend. Een relatief hoog overschot wordt gevonden op bedrijven met een hoog aandeel granen in de rotatie en waarbij compost en geitenmest wordt aangewend. Er is veel variatie in de relatieve bijdrage van gewasresten en organische mest aan de totale organische stof aanvoer. Hoewel

bedrijf III en VIII een vergelijkbare organische stof aanvoer hebben, is de bijdrage van organische mest respectievelijk 63 en 40%. Het aanvoeren van voldoende organische mest is zowel mogelijk via de gewaskeuze in het bouwplan als via organische mest. Ook bij bedrijven waar granen en maïs plaats maken voor aardappels in het bouwplan, is het mogelijk om relatief veel organische stof aan te voeren. Bedrijf III op Zuidoostelijke zandgrond heeft door het ruilen van grond een bouwplan met 50% aardappels. Door het aanwenden van rundveedrijfmest wordt op bouwplanniveau ruim 2600 kg EOS/ha aangevoerd. Ter vergelijking, bij bedrijf II op Zuidoostelijke zandgrond bestaat het bouwplan voor 25% uit aardappels en 13% zomergerst, wordt er bemest met varkensdrijfmest en wordt er op bouwplanniveau ruim 1900 kg EOS/ha aangevoerd.

### **Organische stofbalans en fosfaattoestand**

De verwachting vanuit de praktijk is dat de fosfaatgebruiksnorm bij een hoge fosfaattoestand de mogelijkheden voor de aanvoer van organische stof beperkt, en daarmee leidt tot een lager overschot of zelfs tekort op de organische stofbalans. Bij alle voorbeeldbedrijven met een fosfaattoestand in klasse Hoog is de organische stofbalans echter positief en zijn de gebruiksnormen niet beperkend voor de aanvoer van organische stof. Bij bedrijven op de Zuidwestelijke zeeklei is zichtbaar dat met gelijke mestsoorten de aanvoer van organische stof iets afneemt naarmate de fosfaattoestand hoger is (zie bedrijf XII en XVI in Bijlage IV). Uit de analyse blijkt een negatieve trend tussen organische stofbalans en fosfaattoestand maar andere variabelen zijn belangrijker. Een vergelijking van bedrijf XI met XIV toont aan dat bij eenzelfde bouwplan de organische stofbalans ruim twee keer hoger is door een andere combinatie aan organische mest aan te wenden, ondanks de hogere fosfaattoestand. De keuze in het soort mest is van groter belang dan de gebruiksnorm voor de organische stof balans. Deze bevinding komt overeen met de bevindingen van Ehlert et al. (2018) en van Schröder en van Dijk (2017). Zij concludeerden op basis van drie veldproeven en een literatuuronderzoek dat de fosfaatgebruiksnormen voldoende zijn om de bodemorganische stof op peil te houden, mits de juiste mestsoorten gekozen worden.

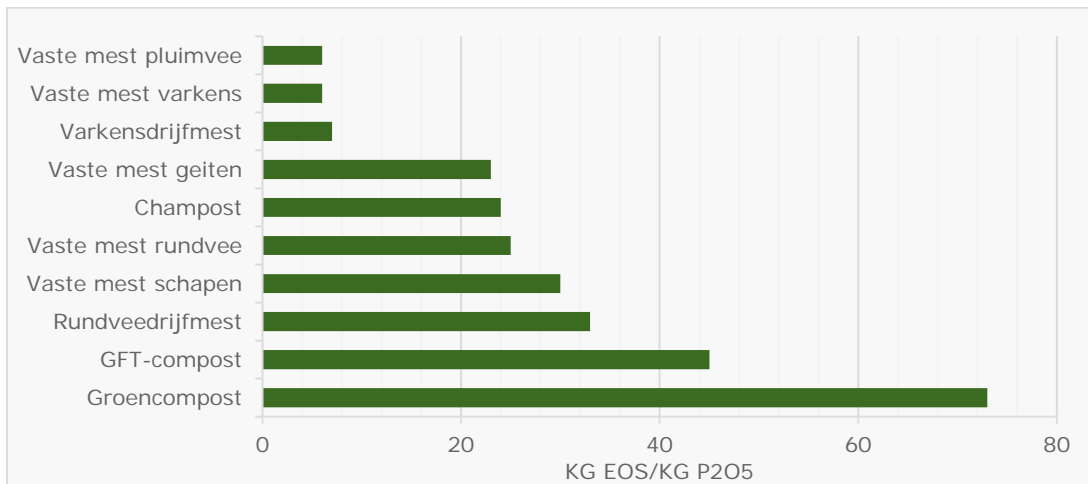
### **Keuze mestsoort**

Bij het kiezen van een mestsoort is de aanvoer van effectief organische stof (EOS) per kilogram fosfaat een nuttig uitgangspunt, een overzicht wordt gegeven in Figuur 4-3. Effectief organische stof is dat deel van de totale organische stof die is toegediend, dat na één jaar nog in de bodem aanwezig is en dus niet is gemineraliseerd. Wanneer bedrijven varkensdrijfmest vervangen door rundveedrijfmest, neemt de aanvoer van EOS per kg fosfaat toe. Voor bedrijf I en II op de Zuidoostelijke zandgronden zou de organische stofaanvoer op bouwplanniveau respectievelijk toenemen van 2055 naar 3305 kg EOS/ha en van 1925 naar 2725 kg EOS/ha als varkensdrijfmest zou worden vervangen door rundveedrijfmest. Dit is een stijging van respectievelijk 61 en 41%.

Een vraag is wel in hoeverre er voldoende organische stof uit andere organische-mestsoorten dan VDM beschikbaar is of blijft voor de akkerbouw, zeker als in de toekomst de rundveestapel inkrimpt.

Het effect van de inzet van rundveedrijfmest in plaats van varkensdrijfmest op de potentiële toename in de aanvoer van EOS is voor bedrijven met een hogere gebruiksnorm groter dan voor bedrijven met een lagere gebruiksnorm. Bedrijven met fosfaatklasse Hoog kunnen echter gebruik maken van de regeling 'meer organisch stofaanvoer bij fosfaatklasse Hoog'. Door deze regeling is het op bouwplanniveau mogelijk om 845 tot 6290 kg EOS meer aan te voeren door het gebruik van vaste rundveemest of groencompost in plaats van varkensdrijfmest. Met groencompost kan een grote hoeveelheid EOS worden aangevoerd, dit komt enerzijds door de hoge verhouding EOS per kilogram fosfaat (Figuur 4-3) en anderzijds doordat er een gedeeltelijke (50%) fosfaatvrijstelling geldt voor compost. Er kan ook gekozen worden om slechts een deel van de varkensdrijfmest te vervangen door compost. Wanneer 10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> uit varkensdrijfmest wordt vervangen door compost, kan er 2120 kg EOS/ha extra worden aangevoerd op bedrijven met fosfaatklasse Hoog. Voor overige fosfaatklasse is dat 1390 kg extra EOS/ha. Naast de aanvoer van EOS is ook de kostenoverweging van belang, zo zijn de kosten van het vervangen van 10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> uit varkensdrijfmest door compost €72/ha. Door regionale

prijsverschillen is dit bedrag indicatief maar toont aan dat de negatieve waarde van organische mest(producten) leidt tot een geringe aanwending van compost.



Figuur 4-3 De aanvoer van EOS per kilogram fosfaat van verschillende soorten mest

### Conclusies fosfaat- en organischestofbalansen

De huidige gebruiksnormen zijn geen belemmering voor een voldoende hoge fosfaataanvoer om aardappelen in hun fosfaatbehoefte te voorzien.

- De klassen Laag en Neutraal komen overeen met de landbouwkundige streeftoestand. In deze klassen leidt de toegestane fosfaatgift tot fosfaatbodemoverschotten die eventuele onvermijdbare verliezen compenseren. De fosfaattoestand van de bodem zal naar verwachting niet veranderen tot (zeer) licht dalen. De gebruiksnorm is voldoende voor de fosfaatvoorziening van aardappelen.
- Bij de klasse Ruim is de aanvoer gemiddeld gelijk aan de afvoer bij een Pw rond 50 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/L. De fosfaattoestand in deze klasse is hoger dan de landbouwkundige streeftoestand. De verwachting is dat de fosfaattoestand langzaam daalt. Wanneer een lagere fosfaatklasse wordt bereikt zijn de toegestane fosfaatoverschotten weer positief en zal de fosfaattoestand niet/ nauwelijks verder dalen.
- Bij de klasse Hoog is er een tekort op de fosfaatbalans. Dit leidt tot een daling van de fosfaattoestand. Hoe hoger de initiële fosfaattoestand en hoe lager de bindingscapaciteit des te sneller zal de fosfaattoestand dalen. Het zal echter gemiddeld decennia duren voordat de fosfaattoestand een klasse daalt. De fosfaatvoorziening is meer dan voldoende voor aardappelen.

De huidige gebruiksnormen hoeven geen belemmering te zijn voor een voldoende hoge aanvoer van organische stof, ook niet op gronden met een hoge fosfaattoestand. Deze conclusie is in overeenstemming met eerdere studies. Met het achterlaten van gewasresten, het telen van groenbemesters en het aanwenden van een combinatie van mestmixen en rundveedrijfmest kan voldoende organische stof worden aangevoerd om het organisch stofgehalte in de bodem (minimaal) te handhaven, mits er voldoende rundveedrijfmest beschikbaar is en blijft in de toekomst.

De keuze in het soort mest is van groter belang dan de gebruiksnorm voor de organische stofbalans. Het vervangen van varkensdrijfmest door rundveedrijfmest eventueel in combinatie met vaste mest en/of compost (omdat compost veel EOS per kg fosfaat bevat en een fosfaatvrije voet van 50% heeft) draagt bij aan een positieve organische stofbalans. Daarnaast dragen groenbemesters en granen in de rotatie bij aan een positieve organische stofbalans, hoewel de opname van meer granen in het bouwplan ten koste gaat van het bedrijfseconomisch rendement.



# 5 Fosfaatbenutting verbeteren

In de praktijk wordt ervaren dat fosfaat beperkend kan zijn voor een optimale opbrengst en kwaliteit bij aardappelen. In dit hoofdstuk worden handvatten gegeven om de fosfaatbenutting uit bodem en bemesting te verbeteren.

Een groeiend gewas neemt nutriënten op met zijn wortels uit de bodemoplossing. Voor een goede fosfaatvoorziening van een groeiend gewas zijn zowel planteigenschappen als bodemeigenschappen van belang. Vanuit de bodem is niet alleen de direct voor de wortels beschikbare fosfaat (intensiteit) en de fosfaat reserves (kwantiteit) van belang maar ook spelen vochtvoorziening, bodemstructuur en zuurgraad een belangrijke rol. Vanuit het gewas zijn de wortelarchitectuur (diepte en wortelintensiteit), de lengte van het groeiseizoen, de snelheid waarmee het gewas groeit en de mogelijkheden van de wortels om hun directe omgeving te beïnvloeden belangrijke factoren voor de fosfaatvoorziening. Aardappelen worden als fosfaatbehoefstig beschouwd vanwege hun ondiepe en niet zo intensieve beworteling.

Verschillende studies hebben echter aangetoond dat wanneer de omstandigheden suboptimaal worden de beschikbaarheid van het aanwezige fosfaat voor het gewas ook verminderd. Om de benutting van fosfaat in bodem en bemesting te optimaliseren zijn verschillende strategieën mogelijk.

## 5.1 Relatie tussen fosfaatbenutting en beworteling

Fosfaat is immobiel in de bodem. De totale hoeveelheid fosfaat in de bodem van landbouwpercelen varieert ruwweg van 2.000 tot 10.000 kg/ha en daarvan is slechts 0,5-1,5 kg opgelost in het bodemvocht. De rest komt in gebonden vorm voor in de bodem (zie paragraaf 2.1). De gebonden, niet in het bodemvocht opgeloste fosforverbindingen, zijn te verdelen in een stabiele en een labiele pool. De stabiele verbindingen zijn over het algemeen slecht oplosbaar en daardoor ook slecht beschikbaar voor het gewas. Het fosfaat in labiele verbindingen kan wel snel in oplossing gaan.

Een gewas kan alleen fosfaat met zijn wortels opnemen uit het bodemvocht. De opgeloste hoeveelheid fosfaat is net voldoende om een landbouwgewas één of enkele dagen van fosfaat te voorzien en in sommige gevallen zelfs minder dan een dag. De dagelijkse fosfaatopname van een groeiend gewas varieert van 0,1-2 kg per hectare (gemiddeld ca. 0,5 kg per dag), afhankelijk van de gewassoort en het groeistadium.

Er is een evenwicht tussen de fosfaatconcentratie in het bodemvocht en de labiele fosfaatpool. Dit evenwicht hangt af van het agrarisch management (bemesting), verschillende bodemeigenschappen en verschilt per grondsoort. Als een gewas fosfaat opneemt uit het bodemvocht, daalt de fosfaatconcentratie in het bodemvocht en gaat er fosfaat uit de labiele pool in oplossing: het evenwicht stelt zich opnieuw in. Als er fosfaat wordt toegevoegd aan de bodem, door bemesting, stijgt de concentratie in het bodemvocht en gaat er vice versa fosfaat naar de labiele pool toe. Door de levering van fosfaat uit de labiele pool naar het bodemvocht kan het gewas gedurende de groeiperiode fosfaat blijven opnemen. Dit proces is ook temperatuurafhankelijk. Bij lagere temperatuur is de

fosfaatbeschikbaarheid in het bodemvocht lager, de wortelgroei en de fosfaatopname trager dan bij hogere temperatuur.

Omdat het fosfaat zich nauwelijks verplaatst in de bodem, moeten de wortels in de directe nabijheid van het fosfaat komen om het te kunnen opnemen. Hoe goed een gewas in staat is om fosfaat te kunnen opnemen, hangt af van de bewortelingsintensiteit c.q. het worteloppervlak dat met de bodem in contact is. Dit wordt bepaald door de wortellengtedichtheid (aantal centimeters wortel per cm<sup>3</sup> grond) en de worteldiameter.

## 5.2 Maatregelen voor een optimale benutting

Maatregelen om de fosfaatbenutting te optimaliseren zijn gericht op het bevorderen van de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem voor gewasopname. Dit omvat het stimuleren van de beworteling, het optimaliseren van bodemfactoren die van invloed zijn om de beschikbaarheid zoals vocht en pH, de plaatsing van de meststof en het moment van toediening. De teler kan dit zelf beïnvloeden door ervoor te zorgen dat de bodemstructuur, vochtvoorziening en pH van de bodem op orde zijn en door de fosfaatgift op het juiste moment en op de juiste plaats toe te dienen.

### **Bodemstructuur**

Een goede bodemstructuur draagt bij aan een ongestoorde wortelgroei en daarmee aan een goede fosfaatbenutting. Hoe intensiever een gewas de bodem doorwortelt, hoe beter het fosfaat uit de bodem kan opnemen. Op gronden met een slechte structuur zal eerder fosfaatgebrek optreden dan op gronden met een goede structuur. Al in 1975 werd door Prummel vastgesteld dat op gronden met een goede bodemstructuur met een lagere fosfaattoestand kan worden volstaan dan op gronden met een slechte bodemstructuur door verdichting om dezelfde opbrengst te realiseren.

Een goede bodemstructuur kan worden bevorderd door een tijdige bekalking en waar mogelijk diepwortelende groenbemesters te telen of extra organische stof via gewasresten achter te laten, bijvoorbeeld door stro onder te werken. Daarnaast kan verdichting worden voorkomen door de grond niet te bewerken onder natte omstandigheden, een lage bandenspanning bij bewerkingen, lichte mechanisatie en vaste rijpaden. Wanneer de ondergrond is verdicht (ploegzool) kan dit worden verholpen door het niet-kerend losmaken van de verdichte laag, gevolgd door een diepwortelende groenbemester te zaaien zoals bijvoorbeeld rogge, bladrammenas, tillage rammenas of een mengsel.

### **Vochtvoorziening**

De vochtvoorziening heeft directe invloed op de gewasproductie, alsook indirect door de invloed op de nutriëntenbenutting. In een droge bodem zijn nutriënten moeilijker opneembaar voor het gewas en dat geldt zeker voor fosfaat. In een droge grond is er minder fosfaat (in kg per ha) in oplossing dan in een vochtige grond. Op tijd irrigeren (indien mogelijk) bevordert de fosfaatopname.

Droge perioden in combinatie met een slechte vochtvoorziening kunnen zorgen voor een tijdelijk fosfaattekort voor het gewas. Gewassen met een middellang tot lang groeiseizoen zijn doorgaans goed in staat om zo'n tijdelijk tekort te compenseren, maar gewassen met een kort groeiseizoen hebben minder vermogen tot compensatie.

### **Zuurgraad van de bodem (pH)**

De zuurgraad van de bodem (uitgedrukt via de pH) heeft invloed op de beschikbaarheid van nutriënten, zo ook op die van fosfaat. Fosfaat is het beste beschikbaar voor het gewas bij een bodem-pH tussen de 5½ en 6½. Als de pH lager is dan 4½ kan er fosfaatfixatie optreden. Er ontstaan dan slecht oplosbare verbindingen van fosfaat met ijzer en aluminium. Dit kan worden voorkomen door op tijd te bekalken. Op kalkrijke gronden daarentegen met een pH groter dan 7, neemt de beschikbaarheid af door de vorming van slecht-oplosbare calciumfosfaatverbindingen.

Recente studies bevestigen dat de zuurgraad van de bodem belangrijk is voor een optimale fosfaatbenutting. In lange-termijnproeven in België vonden Martens et al. (2020) dat de fosfaatbeschikbaarheid significant werd beperkt door een suboptimale zuurgraad van de bodem voor alle onderzochte gewassen, ook aardappelen. Voor aardappelen was de kritische waarde (5% opbrengstderving) voor P-AI het laagst (14 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g) voor bodems met een landbouwkundig optimale pH, terwijl deze voor gronden met een suboptimale pH verdubbelde tot waarden van P-AI 29 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g. Een landbouwkundig optimale bodem pH (volgens advies) leidt dus tot een hogere beschikbaarheid van fosfaat in de bodem voor het groeiend gewas, ook voor aardappelen.

### **Tijdstip van bemesting en verdeling over het bouwplan**

De fosfaatbemesting kan het beste relatief kort voor de teelt worden uitgevoerd (in de winter of het voorjaar) met dierlijke mest of goed oplosbare fosfaatmeststoffen (calcium- en ammoniumfosfaten). Het fosfaat is dan beter beschikbaar dan bij toediening in het najaar. Dit is met name van belang bij gewassen met een hoge fosfaatbehoefte zoals aardappel. Naarmate de periode tussen toediening en opname door het gewas langer is c.q. het fosfaat langer in de grond verblijft, gaat de beschikbaarheid achteruit omdat het fosfaat in de grond wordt omgezet in slechter oplosbare verbindingen.

Verder is het voor de fosfaatwerking het beste als meststoffen vóór de zaai- of pootbedbereiding worden toegediend en op wortelingsdiepte worden ingewerkt (6-8 cm) of goed door de bouwvoor worden gemengd. Bij bemesting vóór ploegen bestaat het risico dat de meststof te diep in de bouwvoor komt, waardoor het gewas er tijdens de begingroei niet over kan beschikken, hetgeen een vertraagde begingroei kan geven of een slechtere knolzetting bij aardappel. Bij uitstrooien over het zaaibed en oppervlakkig inwerken (ondieper dan 4 cm), blijft de meststof in de bovenste toplaag. Deze laag kan snel uitdrogen, waardoor het fosfaat niet kan worden opgenomen. Toediening van de fosfaatmeststof bij aardappel na poten en vóór rugopbouw heeft ook als risico dat het fosfaat bij aanhoudende droogte slechter beschikbaar is.

Bij bouwplanbemesting kan het beschikbare fosfaat op het bedrijf het beste zo veel mogelijk worden toegediend voor de fosfaatbehoefte gewassen en op percelen met een lage fosfaattoestand. Een groot deel van het fosfaat in Nederland wordt via dierlijke mest toegediend. Dierlijke mest wordt ook vaak in wintertarwe toegediend, terwijl dit gewas meestal geen fosfaatgift nodig heeft. Het verdient toch aanbeveling om de mest zo veel mogelijk voorafgaand aan de aardappelen en andere fosfaatbehoefte gewassen toe te dienen.

Slim inzetten van mestscheidingsproducten kan ook bijdragen aan beter maatwerk. Na scheiding komt er relatief meer fosfaat in de dikke fractie terecht en minder in de dunne. De dunne fractie bevat relatief meer stikstof en kali. Voor toepassing in wintertarwe past de dunne fractie beter dan ongescheiden drijfmest vanwege de gunstigere NPK-verhouding. Voor aardappelen kan het fosfaat in de dikke fractie worden benut.

In de huidige praktijk wordt standaard alleen de gemiddelde bodemvruchtbaarheid van de bouwvoor op perceelniveau gemeten om de fosfaatgift te bepalen. Binnen een perceel en ook in diepere bodemlagen kan de fosfaatbeschikbaarheid echter sterk variëren. Daardoor kan op de ene plek met een lagere gift worden volstaan en is op de andere plek een hogere gift nodig. Door de ontwikkeling van snelle diagnostische tools zoals bodemsensoren, wordt het in de nabije toekomst makkelijk en betaalbaar om meer monsters te analyseren. Dan zou ook de variatie binnen een perceel en de potentiële levering van fosfaat uit diepere bodemlagen kunnen worden benut en vervolgens de fosfaatgift hier plaats specifiek op worden afgestemd binnen het perceel.

### **Geconcentreerde plaatsing van het fosfaat**

Onder geconcentreerde plaatsing wordt verstaan: toediening van de meststof vlakbij de wortels van de planten. Dit betreft rijenbemesting, waarbij de meststof een aantal centimeters naast de plantenrij wordt

geplaatst, plantgatbemesting of toediening van meststoffen in de zaai- of pootvoor. Toediening in het zaai- of op plantdiepte is ook een vorm van geconcentreerde plaatsing.

Voor aardappelen is van belang dat vers fosfaat in de pootrug terecht komt, waardoor de wortels van de opkomende planten al snel met het fosfaat in contact komen. De meststof kan in de ruggen worden toegediend tijdens het poten (in één werkgang), maar kan bijvoorbeeld ook na ploegen en kort voor de pootbereiding breedwerpig worden gestrooid of ondiep worden toegediend. Bij de pootbedbereiding met bijvoorbeeld een rotorkoepel wordt de meststof door de bovenste laag van de grond gemengd waarvan de pootruggen worden gevormd, waardoor het fosfaat dicht rondom de pooters komt te zitten.

Doordat het fosfaat vlakbij de wortels wordt gebracht, kunnen de jonge planten het snel opnemen, wat een mogelijk fosfaat tekort voorkomt. Door de geconcentreerde toediening wordt de fosfaatconcentratie in de wortelzone sterk verhoogd en is de diffusie van fosfaat naar de plantenwortel hoger. Bovendien is door de geconcentreerde toediening de kans op vastlegging van het fosfaat in de bodem kleiner, omdat het veel minder met de grond wordt vermengd dan bij breedwerpige toediening.

Van belang is dat de meststof zodanig wordt geplaatst dat deze enerzijds dichtbij de wortels van de planten komt te liggen en de jonge planten er al snel over kunnen beschikken, maar dat anderzijds geen zoutschade optreedt. Bij zaai- of pootvoortoediening is het risico van zoutschade groter, met name bij gebruik van NP-meststoffen.

Plaatsing van fosfaat door rijenbemesting verhoogt bij een aantal fosfaatbehoefte gewassen de benutting door het gewas van het toegediende fosfaat aanmerkelijk. Daardoor kan met een 25-50% lagere fosfaatgift worden volstaan zonder opbrengstderving. Het voordeel van geconcentreerde plaatsing is het grootste in de volgende situaties:

- Bij zwak wortelende gewassen met een hoge fosfaatbehoefte en korte groeiduur. Dit betreft onder andere bladgroenten als sla en andijvie en pootaardappelen. Gewassen met een korte groeiduur kunnen een tijdelijk fosfaattekort in het begin van het groeiseizoen minder goed later tijdens de teelt te compenseren dan gewassen met een lange groeiduur.
- Op gronden met een lage fosfaattoestand en op fosfaatfixerende gronden.
- Bij de teelt van fosfaatbehoefte, zwakwortelende gewassen op ruime rijenafstand ( $\geq 50$  cm), bijvoorbeeld maïs.
- Bij een lage (suboptimale) fosfaatgift.
- Onder groeiomstandigheden waarbij de plant door een slechte wortelgroei het fosfaat moeilijk kan opnemen, zoals een slechte bodemstructuur, een lage bodemtemperatuur bij koude in het voorjaar en droogte.
- Waar een slechte bodemstructuur de beschikbaarheid van het aanwezige fosfaat beperkt, is geconcentreerde plaatsing van een kleine fosfaatgift bij de planten (een startgift) een tijdelijke oplossing. De échte oplossing moet structureel gezocht worden in het realiseren van een goede bodemstructuur.

Plaatsing van ammoniumfosfaat geeft soms een beter effect dan plaatsing van alleen fosfaat. Fosfaat en stikstof bevorderen beide de begingroei van de plant en stimuleren de wortelgroei. Een betere wortelgroei stelt de plant vervolgens in staat om het fosfaat in de bodem beter op te nemen. De combinatie van stikstof en fosfaat kan daarbij versterkend werken ten opzichte van stikstof en fosfaat afzonderlijk. Verder zorgt plaatsing van ammonium in de wortelomgeving voor een lokale verzuring, wat de opneembaarheid van fosfaat kan bevorderen (uitgezonderd op zure gronden). Anderzijds geeft de toediening van ammoniumfosfaten meer risico op een te hoge zoutconcentratie dichtbij de jonge planten dan enkelvoudige fosfaatmeststoffen, wat de wortelgroei en beginontwikkeling juist remt en tot opbrengstderving kan leiden. Dan heeft toediening van ammoniumfosfaat een averechts effect.

# 6 Conclusies en aanbevelingen

## 6.1 Conclusies

Uit deze studie kan geconcludeerd worden dat:

- De huidige gebruiksnormen (2021) vrij ruim zijn ten opzichte van de landbouwkundige streeftoestand van de bodem en ten opzichte van de bemestingsadviezen voor aardappel, op basis van Pw én op basis van de combinatie P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al.
- In geen van de fosfaatklassen de fosfaattoestand van de bodem in combinatie met de toegestane fosfaatgift een belemmering zal zijn voor de fosfaatvoorziening van aardappelen.
- De fosfaattoestand van de bodem in Nederland is gemiddeld ruim voldoende tot (zeer) hoog.
- De sterk dalende gebruiksnormen hebben ertoe geleid dat de directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) is gedaald maar dat door de netto positieve balans de fosfaatreserves in de bodem (P-Al) gelijk zijn gebleven of gestegen.
- Een daling van de directe fosfaatbeschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) is geen probleem voor de fosfaatvoorziening van aardappelen zolang de fosfaattoestand in de landbouwkundige streeftoestand van de bodem blijft. Een (sterke) daling van P-CaCl<sub>2</sub> wordt vaak waargenomen op gronden die in het (recente) verleden sterk zijn opgeladen met fosfaat.
- In de klasse Hoog is de fosfaatbalans negatief. Dit zal met name tot uitdrukking komen in een daling van de directe P-beschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>). Conform het beoogde beleid, is dit positief voor de verliezen naar het watersysteem. De verwachting is dat ook de snel reagerende fosfaatfractie (P-Al en Pw) daalt. De snelheid waarmee de fosfaattoestand daalt is afhankelijk van de initiële fosfaattoestand en het negatieve fosfaatoverschot en neemt af in de tijd.
- Als de fosfaattoestand daalt tot de klasse Ruim, is de bemesting in evenwicht met de fosfaatonttrekking en zal de daling nog langzamer gaan.
- In de fosfaatklassen Laag en Neutraal is de fosfaattoestand in overeenstemming met de landbouwkundige streefwaarde. De fosfaatbalans is positief en voldoende hoog om te compenseren voor de fosfaatonttrekking door het gewas en eventuele onvermijdbare verliezen.
- De onvermijdbare verliezen zijn hoger bij hogere fosfaattoestand en een hogere bindingscapaciteit.
- Oude en recente veldproeven tonen aan dat bij de fosfaatklasse Hoog, ondanks een netto negatief fosfaatoverschot, de fosfaattoestand van de bodem in combinatie met de toegestane mestgift (meer dan) voldoende hoog zijn om aardappels van voldoende fosfaat te voorzien.
- De benutting van fosfaat uit bodem en bemesting kan worden verbeterd door de fosfaatgift op bedrijfsniveau toe te delen aan gewassen met een hogere fosfaatbehoefte en percelen met een lage(re) fosfaattoestand, zorg te dragen voor een goede bodemstructuur (zodat de beworteling niet wordt belemmerd) en te zorgen voor een goede zuurgraad van de bodem in overeenstemming met het landbouwkundig advies.
- De huidige gebruiksnormen hoeven geen belemmering te zijn voor een voldoende hoge aanvoer van organische stof, ook niet op gronden met een hoge fosfaattoestand.
- De keuze in het soort mest is van groter belang voor de organische stofbalans dan de hoogte van de gebruiksnorm: (deels) vervangen van varkensdrijfmest door rundveedrijfmest eventueel in

combinatie met vaste mest en/of compost (omdat compost relatief veel effectief organische stof bevat per kg fosfaat en een fosfaatvrije voet van 50% heeft) zorgt voor voldoende EOS-aanvoer.

- De organische stofbalans wordt positief beïnvloed door het telen van groenbemesters, het onderwerken van gewasresten en het aandeel granen in de rotatie.

## 6.2 Aanbevelingen

Uit dit onderzoek blijken een aantal kennislacunes te bestaan. De belangrijkste zijn:

- Inzicht in de bijdrage van fosfaat uit bodemlagen onder de bouwvoor en uit de langzaam reagerende fosfaatfracties aan de gewasvoorziening.
- Inzicht in de samenstelling van mest en de beschikbaarheid van fosfaat (organisch en mineraal fosfaat), zeker nu ook in de veehouderij sterk gefocust wordt op beperking van de fosfaatexcretie.
- Inzicht in de relatie tussen direct beschikbaar fosfaat en de snel reagerende fosfaatreserves en hoe hier met managementmaatregelen op kan worden ingespeeld zodat een optimale fosfaatvoorziening voor het gewas kan worden gewaarborgd (kalk- en ijzerrijke gronden) en verliezen naar het watersysteem kunnen worden beperkt (kalkarme zandgronden).
- De mate waarin aardappelrassen van elkaar verschillen in de opname van fosfaat is relatief onbekend. (Bij kali is dat bijvoorbeeld wel het geval.)
- De mate waarin vocht- en met name droogte, bodemstructuur, en zuurgraad beperkend zijn voor de P-beschikbaarheid voor een fosfaat gevoelig gewas als aardappel dient nader onderzocht te worden. Dit inzicht geeft (betere) handvatten voor het nemen van de juiste maatregelen.

# Referenties

- Albertsson, B., 2008. New P recommendations in Swedish agriculture. In: Rubaek, G.H. (Ed.), Stockholm.
- Amery F., B. Vandecasteele, T. D' Hose, S. Nawara, A. Elsen, W. Odeurs, H. Vandendriessche, D. Arlotti, S.P. McGrath, M. Cougnon, E. Smolders (2021) Dynamics of soil phosphorus measured by ammonium lactate extraction as a function of the soil phosphorus balance and soil properties. *Geoderma* 385 <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114855>.
- Bussink DW, de Haas MJG, Postma R, 2010. Risico van fosfaatemissie uit landbouwgronden in Drenthe; inventarisatie deel I, sl: sn
- Bussink, W., G. Doppenberg, W. van den Berg en K. van Wijk, 2014. Naar een nieuw fosfaatbemestingsadvies voor de akkerbouw. Nutrient Management Instituut NMI B.V., [http://www.kennisakker.nl/files/Kennisdocument/Eindrapport\\_Naar\\_een\\_nieuw\\_P-bemestingsadvies\\_aardappelen.pdf](http://www.kennisakker.nl/files/Kennisdocument/Eindrapport_Naar_een_nieuw_P-bemestingsadvies_aardappelen.pdf)
- De Ruijter, F.J., van Dijk, W., van Geel, W.C.A., Holshof, G., Postma, R. en Wiling, P. (2020). Actualisatie van stikstof- en fosfaatgehalten van akkerbouwgewassen met een groot areaal. WUR, Rapport WPR-957. Beschikbaar via <https://edepot.wur.nl/520624>
- De Vries, O and FJA Dechering, 1960 Grondonderzoek 4edruk, Bedrijfslaboratorium voor Grond-en Gewasonderzoek Mariëndaal-Oosterbeek
- Dekker, P. H. M. & R. Postma (2008). Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting. PPO nr. 3250061800. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Lelystad, 28 p.Ehlert, P.A.I. en P.H.M. Dekker, 2009. Veeljarige effecten van evenwichtsbemesting. Informatieblad mineralen en milieukwaliteit. BO-05-infoblad-17 Cluster BO-05 Mineralen en Milieukwaliteit Gefinancierd door ministerie LNV <http://www.kennisonline.wur.nl/BO/BO-05> april 2008. <http://edepot.wur.nl/23263>.
- Ehlert, P.A.I. & P. de Willigen (1999). Relatie fosfaatbehoefte vollegrondsgroenten en fosfaattoestand in de bodem. In: Dekker, P.H.M. Naar maatwerk in bemesting. Themaboekje nr. 22. Praktijkonderzoek voor de Akkerbouw en de Vollegrondsgroenteteelt, Lelystad, p. 32-45.
- Ehlert, P.A.I. en van Dijk, W. (2011). Onderbouwing Wet- en Regelgeving. Beschikbaar via <https://edepot.wur.nl/210964>
- Ehlert, P.A.I., Dekker, P.H.M., van der Schoot, J.R., Visschers, R. van Middelkoop, J.C., van der Maas, M.P., Pronk, A.A., en van Dam, A.M. (2009). Fosforgehalten en fosfaatafvoercijfers van landbouwgewassen. Alterra, Rapport 1773. Beschikbaar via <https://edepot.wur.nl/6099>
- Ehlert, P.A.I. en P.H.M. Dekker, (2009) Veeljarige effecten van evenwichtsbemesting. Informatieblad mineralen en milieukwaliteit. BO-05-infoblad-17 Cluster BO-05 Mineralen en Milieukwaliteit Gefinancierd door ministerie LNV <http://www.kennisonline.wur.nl/BO/BO-05> april 2008. <http://edepot.wur.nl/23263>.
- Ehlert, P.A.I., van Middelkoop, J., van Geel, W.C.A., de Haan, J. en Regelink, I. (2018). Veeljarige fosfaatveldproeven op gras- en bouwland; Syntheserapport. WUR, Rapport 2906. Beschikbaar via <https://edepot.wur.nl/460816>
- Ehlert, P.A.I., van Wijk, C.A.Ph. en Dekker, P.H.M. (2003). Fosfaatbalansen op perceelsniveau. PPO Rapport 305. Beschikbaar via <https://edepot.wur.nl/354124>
- Eurofins Agro (2020). Nieuwe fosfaatwetgeving gebaseerd op twee fosfaatmetingen. Beschikbaar via <https://www.eurofins-agro.com/nl-nl/nieuwe-fosfaatwetgeving-gebaseerd-op-twee-fosfaatmetingen>
- Handboek Boden en Bemesting: <https://www.handboekbodemenbemesting.nl>
- Henkens, P., 1984. Bemestingsadvies voor het verkrijgen of behouden van de gewenste fosfaat- en kalitoestand van de bodem.
- Houba, V., Temminghoff, E., Gaikhorst, G. & van Vark, W., 2000. Soil analysis procedures using 0.01 calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Volume 31.

- Jordan-Meille, L., G.H. Rubæk, P.A.I. Ehlert, V. Genot, G. Hofman, K. Goulding, J. Recknagel, G. Provolò & P. Barraclough, 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management*, 28 (4) 419-435; doi:10.1111/j.1475-2743.2012.00453.x.
- Johnston, A. E. & Poulton, P. R., 2019. Phosphorus in Agriculture: A Review of Results from 175 Years of Research at Rothamsted, UK. *Journal of Environmental Quality*, 9, 48(5), pp. 1133-1144.
- Johnston, A. E., Poulton, P. R., Fixen, P. E. & Curtin, D., 2014. Phosphorus. Its Efficient Use in Agriculture.. *Advances in Agronomy*, Volume 123, pp. 177-228.
- Kirchmann, H. et al., 2020. Soil properties currently limiting crop yields in Swedish agriculture - An analysis of 90 yield survey districts and 10 long-term field experiments. *European Journal of Agronomy*, 10. Volume 120.
- Koopmans, G., Chardon, W., Dekker, P. & Schoumans, O., 2006. Comparing different extraction methods for estimating phosphorus solubility in various soil types. *Soil Science*, Volume 171.
- Mulder, C. & J. Prummel (1975). Fosfaatbemesting voor aardappelen en suikerbieten op klei- en zavelgrond in het najaar of in het voorjaar? *Bedrijfsontwikkeling* 6, 9, p. 737-739.
- Martens S, et al., 2020. Critical Soil Phosphorus Values for Yield Reduction in Intensive Agricultural Systems. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 4.10(2).
- Nawara S., T. Van Dael, R. Merckx, F. Amery, A. Elsen, W. Odeurs, H. Vandendriessche, S. Mcgrath, C. Roisin, C. Jouany, S. Pellerin, P. Denoroy, B. Eichler-Löbermann, G. Börjesson, P. Goos, W. Akkermans, E. Smolders (2017) A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe. *European Journal of Soil Science* <https://doi.org/10.1111/ejss.12486>
- Oenema, O., J.P. Mol, J.C.H. Voogd, P.A.I. Ehlert & G.L. Velthof, 2016. Klasseindelingen voor de fosfaattoestand van de bodem, ten behoeve van de afleiding van fosfaatgebruiksnormen. Alterra, Wageningen UR rapport 2743. ISSN 1566-7197. <http://edepot.wur.nl/390048>
- Paauw, F. van der & H.A. Sissingh, 1968. Het Pw-getal, een nieuwe maat voor de beschikbaarheid van fosfaat in de grond. *Landbouwvoorlichting* 25 (9): 348-359.
- Prummel, J., (1974) Veranderingen in het Pw-getal in de loop van de tijd en onder invloed van de bemesting. Instituut voor bodemvruchtbaarheid rapport 9-74.
- Prummel, J. (1975). Effect of soil structure on phosphate nutrition of crop plants. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 23, p. 62-68.
- Reijneveld, A. en brolsma, K. (n.d.). Fosfaatadvies gebaseerd op 2 P-indicatoren, in voorbereiding.
- Russchen, H. J., J. Wander & J.T. Malda (2011). Benutting van fosfaat in landbouwgronden. 433643. Dronten, DLV Plant BV.
- Schoumans, O. F., 2015. Phosphorus leaching from soils: process description, risk assessment and mitigation. pp. undefined-261.
- Schoumans, O.F., 2007. Trends in de fosfaattoestand van landbouwgronden in Nederland in de periode 1998-2003. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 1537. 38 blz.; 4 fig.; 5 tab.; 6 bijl.; 17 ref.
- Schoumans, O., J. Willems & G. van Duinhoven (2008). 30 Vragen en antwoorden over fosfaat in relatie tot landbouw en milieu. Alterra, Wageningen, 53 p.
- Schröder, J.J. & W. van Dijk, 2017. Actualisatie van stikstof-, fosfaat en organische stof balansen van akkerbouw- en vollegrondsgroentenbedrijven; Onderzoek naar de aanpassing van gebruiksnormen in het kader van equivalente maatregelen. Wageningen Research, Rapport WPR-683. 20 blz.; 0 fig.; 6 tab.; 15 ref.
- Smolders, A., Loermans, J., & Lamers, L. (2012). Effecten van flexibel peilbeheer op bodemprocessen en waterkwaliteit. Onderzoekscentrum B-Ware.
- Van Der Paauw, F., Sissingh, H. A. & Ris, J., 1971. Een verbeterde methode van fosfaatextractie van grond met water: het Pw-getal, sl: sn
- Van Der Zee, S. & Van Riemsdijk, W., 1988. Model for Long-term Phosphate Reaction Kinetics in Soil.



- Van Dijk, W. (2003). Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen. PPO, Rapport 307. Beschikbaar via <https://edepot.wur.nl/119911>
- van Dijk, W., Spruijt, J., Runia, W. en van Geel, W.C.A. (2012). Verruiming vruchtwisseling in relatie tot mineralenbenutting, bodemkwaliteit en bedrijfseconomie op akkerbouwbedrijven. Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, publicatie nr. 527
- Van Geel, W., de Haan, J., Hanegraaf, M. en Postma, R. (2019). Doorontwikkeling classificatieschema organische-stofrijke meststoffen. WUR, Rapport 3750384500. Beschikbaar via [www.wur.nl/plant-research](http://www.wur.nl/plant-research)
- Van Grinsven en Bleeker, PBL (2017), Evaluatie Meststoffenwet 2016: Syntheserapport, Den Haag: PBL
- Van Rotterdam, AMD, D.W. Bussink, E.J.M. Temminghoff, W.H. van Riemsdijk 2012 Predicting the potential of soils to supply phosphorus by integrating soil chemical processes and standard soil tests. *Geoderma* 189-190 (2012) 617-626
- Van Rotterdam-Los A.M.D., (2010) The potential of soils to supply phosphorus and potassium; processes and predictions. Ph.D. thesis Wageningen University, Wageningen. 144 p.
- Van Rotterdam D & Postma R (2018) Natuurontwikkeling op voormalige landbouwgrond in Drenthe; effect van acht jaar uitmijnen en verschralen op de fosfaattoestand van de bodem. NMI-rapport 1712.N.17
- Van Rotterdam, D., Pijlman, J., Honkoop, W. & Van den Eertwegh, G., 2019. Verbeteren benutting fosfaat in veenweiden. *VFocus*, Volume 19, pp. 16-19.
- Velthof, G.L., T. Koeijer, J.J. Schröder, M. Timmerman, A. Hooijboer, J. Rozemeijer, C. van Bruggen en P. Groenendijk, 2017. Effecten van het mestbeleid op landbouw en milieu; Beantwoording van de expostvragen in het kader van de evaluatie van de Meststoffenwet. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2782. 140 blz.; 43 fig.; 49 tab.; 112 ref.
- Verloop, J. et al., 2010. P-equilibrium fertilization in an intensive dairy farming system: Effects on soil-P status, crop yield and P leaching. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 87(3), pp. 369-382.
- Wiesler A. (2018) Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Standpunkt, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA)
- Weng, L., Van Riemsdijk, W. H. & Hiemstra, T., 2012. Factors Controlling Phosphate Interaction with Iron Oxides. *Journal of Environment Quality*.

# Bijlage I Voorbeeldbedrijven

- I. Een gemengd bedrijf met 40 ha akkerbouw en varkens op de zuidoostelijke zandgrond, waarbij eigen mest wordt toegepast en goede opbrengsten worden bereikt door berekening. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (25%), suikerbieten (25%), snijmais (25%), zomergerst (13%) en erwten/bonen (13%). De fosfaatklasse is ruim voldoende (Pw=50; P-AL=50; P-CaCl<sub>2</sub>=3,0) en de gebruiksnorm is 60kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- II. Een gemengd bedrijf met 40 ha akkerbouw en varkens op de zuidoostelijke zandgrond, waarbij eigen mest wordt toegepast en goede opbrengsten worden bereikt door berekening. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (25%), suikerbieten (25%), snijmais (25%), zomergerst (13%) en erwten/bonen (13%). De fosfaatklasse is ruim voldoende op de ene helft van de percelen en hoog op de andere helft, gemiddeld genomen is de gebruiksnorm 50kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (Pw=55; P-AL=60; P-CaCl<sub>2</sub>=3,0).
- III. Een bedrijf op de zuidoostelijke zandgrond van ca. 80 hectare waarvan een deel grond is geruild voor aardappelen, de totale bemesting wordt ingevuld met rundveedrijfmest. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (50%), suikerbieten (25%), snijmais (15%) en ui (10%). De fosfaatklasse is hoog (Pw=60; P-AL=70; P-CaCl<sub>2</sub>=4,0), en de gebruiksnorm is 40kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- IV. Een bedrijf op de zuidoostelijke zandgrond van ca. 80 hectare, er wordt bemest met rundveedrijfmest en mineralenconcentraat. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (50%), suikerbieten (25%), snijmais (15%) en ui (10%). De fosfaatklasse is hoog (Pw=60; P-AL=70; P-CaCl<sub>2</sub>=4,0), en de gebruiksnorm is 40kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- V. Er zijn maar enkele bedrijven in noordoost Nederland waarvan de fosfaatklasse laag is. De bemesting wordt zoveel mogelijk ingevuld met dierlijke mest. Omdat stikstof uit dierlijke mest de limiterende factor is, wordt de overige fosfaatruimte ingevuld met kunstmest. Het bouwplan bestaat uit zetmeelaardappelen (50%), suikerbiet (17%) en zomergerst (33%). Bij een lage fosfaatklasse (Pw=30; PAL=40; P-CaCl<sub>2</sub>=1,5) is de gebruiksnorm 80kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- VI. Een bedrijf in noordoost Nederland waarvan de fosfaatklasse neutraal is. Ook hier wordt maximaal mest aangevoerd. Door het aanbod van verschillende soorten mest kan er per gewas een mestsoort gekozen worden. Indien het bedrijf over een mestsilos beschikt, wordt er een bedrijfs- of bodemspecifieke mestmix gemaakt. Het bouwplan bestaat uit zetmeelaardappelen (50%), suikerbiet (17%) en zomergerst (33%). Bij een neutrale fosfaatklasse (Pw=40; P-AL=50; P-CaCl<sub>2</sub>=2,0) is de gebruiksnorm 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- VII. Een akkerbouwbedrijf van 80 hectare in noordoost Nederland. Er wordt een combinatie van een mestmix en rundveedrijfmest toegepast. Het bouwplan bestaat uit zetmeelaardappelen (50%), suikerbiet (17%) en zomergerst (33%). De fosfaattoestand is ruim voldoende (Pw=50; P-AL=50, P-CaCl<sub>2</sub>=3,0), de gebruiksnorm is 60kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- VIII. Een veelvoorkomend bedrijfstype in noordoost Nederland is een akkerbouwbedrijf van 80 hectare, waarvan een deel van de percelen fosfaatklasse ruim voldoende heeft en het andere deel hoog. Er wordt een combinatie van een mestmix en rundveedrijfmest toegepast. Het bouwplan bestaat uit zetmeelaardappelen (50%), suikerbiet (17%) en zomergerst (33%). Gemiddeld genomen is de gebruiksnorm 50kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (Pw=55; P-AL=60; P-CaCl<sub>2</sub>=3,0).
- IX. Een akkerbouwbedrijf van 100 hectare in noordoost Nederland. De fosfaatklasse is ruim voldoende op de ene helft van de percelen en hoog op de andere helft. In deze variant wordt een mestmix gebruikt met een lager fosfaat gehalte. Het bouwplan bestaat uit zetmeelaardappelen (50%), suikerbiet (17%) en zomergerst (33%). Gemiddeld genomen is de gebruiksnorm 50kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (Pw=55; P-AL=60; P-CaCl<sub>2</sub>=3,0).
- X. Een akkerbouwbedrijf van 100 hectare in noordoost Nederland, ook hier wordt een mestmix toegepast. Het bouwplan bestaat uit zetmeelaardappelen (50%), suikerbiet (17%) en zomergerst (33%). De fosfaatklasse is hoog (Pw=60; P-AL= 70 en P-CaCl<sub>2</sub>=4,0) en de gebruiksnorm is 40kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XI. Een akkerbouwbedrijf op de Zuidwestelijke zeeklei. Er worden verschillende soorten mest aangewend, zoals compost, varkensdrijfmest en kunstmest. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (20%), suikerbiet (15%), wintertarwe (40%), graszaad (10%) en ui (15%). De fosfaattoestand is laag (Pw=30; P-AL=40; P-CaCl<sub>2</sub>=1,5) en de gebruiksnorm is 80kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XII. Een akkerbouwbedrijf op de Zuidwestelijke zeeklei. Er worden verschillende soorten mest aangewend, zoals compost, geitenmest, rundveedrijfmest, bewerkte drijfmest en kunstmest. Suikerbieten krijgen geen fosfaat, en ui krijgt een P-startmeststof. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (20%), suikerbiet (15%), wintertarwe (40%), graszaad (10%) en ui (15%). De fosfaattoestand is laag (Pw=30; P-AL=40; P-CaCl<sub>2</sub>=1,5) en de gebruiksnorm is 80kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XIII. Een akkerbouwbedrijf op de Zuidwestelijke zeeklei. Er worden verschillende soorten mest aangewend, zoals compost, varkensdrijfmest en kunstmest. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (20%), suikerbiet (15%), wintertarwe (40%), graszaad (10%) en ui (15%). De fosfaatklasse is neutraal (Pw=40; P-AL=50; P-CaCl<sub>2</sub>=2,0) en de gebruiksnorm is 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XIV. Een akkerbouwbedrijf op de Zuidwestelijke zeeklei. Er worden verschillende soorten mest aangewend, zoals compost, geitenmest, rundveedrijfmest, bewerkte drijfmest en kunstmest. Het bouwplan bestaat uit

- consumptieaardappelen (20%), suikerbiet (15%), wintertarwe (40%), graszaad (10%) en ui (15%). De fosfaatklasse is neutraal (Pw=40; P-AL=50; P-CaCl<sub>2</sub>=2,0) en de gebruiksnorm is 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XV. Een akkerbouwbedrijf op de Zuidwestelijke zeeklei. Er worden verschillende soorten mest aangewend, zoals compost, varkensdrijfmest en kunstmest. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (20%), suikerbiet (15%), wintertarwe (40%), graszaad (10%) en ui (15%). De fosfaatklasse is ruim voldoende (Pw=50; P-AL=50; P-CaCl<sub>2</sub>=3,0) en de gebruiksnorm is 60kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XVI. Een akkerbouwbedrijf op de Zuidwestelijke zeeklei. Er worden verschillende soorten mest aangewend, zoals compost, geitenmest, rundveedrijfmest, bewerkte drijfmest en kunstmest. Het bouwplan bestaat uit consumptieaardappelen (20%), suikerbiet (15%), wintertarwe (40%), graszaad (10%) en ui (15%). De fosfaatklasse is ruim voldoende (Pw=50; P-AL=50; P-CaCl<sub>2</sub>=3,0) en de gebruiksnorm is 60kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XVII. Een akkerbouwbedrijf op Noordelijke/centrale zeeklei. Het bouwplan bestaat uit pootaardappels (33%), suikerbieten (17%), wintertarwe (17%), witlof (8%), ui (17%) en peen (8%). Na vroege pootaardappels wordt een groenbemester geteeld, na ui is dit meestal niet mogelijk. Aardappels worden bemest met kunstmest, wintertarwe met rundveedrijfmest, ui met kunstmest en GFT-compost. De fosfaatruimte wordt met geitenmest opgevuld bij de groenbemesters, ten behoeve van de volgende teelt. De fosfaatklasse is laag (Pw=30; P-AL=40; P-CaCl<sub>2</sub>=1,5) en de gebruiksnorm is 80kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XVIII. Een akkerbouwbedrijf op Noordelijke/centrale zeeklei. Het bouwplan bestaat uit pootaardappels (33%), suikerbieten (17%), wintertarwe (17%), witlof (8%), ui (17%) en peen (8%). Na vroege pootaardappels wordt een groenbemester geteeld, na ui is dit meestal niet mogelijk. Aardappels worden bemest met kunstmest, wintertarwe met rundveedrijfmest, ui met kunstmest en champost. De fosfaatruimte wordt met geitenmest opgevuld bij de groenbemesters, ten behoeve van de volgende teelt. De fosfaatklasse is neutraal (Pw=40; P-AL=50; P-CaCl<sub>2</sub>=2,0) en de gebruiksnorm is 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XIX. Een akkerbouwbedrijf op Noordelijke/centrale zeeklei. Het bouwplan bestaat uit consumptie aardappels (25%), suikerbieten (20%), wintertarwe (25%), witlof (6%), ui (18%) en peen (6%). Groenbemesters worden geteeld na ui en wintertarwe. Aardappels worden bemest met een startmeststof en rundveedrijfmest en wintertarwe met rundveedrijfmest. De fosfaatruimte wordt met geitenmest opgevuld bij de groenbemesters, ten behoeve van de volgende teelt. De fosfaatklasse is laag (Pw=30; P-AL=40; P-CaCl<sub>2</sub>=1,5) en de gebruiksnorm is 80kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.
- XX. Een akkerbouwbedrijf op Noordelijke/centrale zeeklei. Het bouwplan bestaat uit consumptie aardappels (25%), suikerbieten (20%), wintertarwe (25%), witlof (6%), ui (18%) en peen (6%). Groenbemesters worden geteeld na ui en wintertarwe. Aardappels worden bemest met een startmeststof en rundveedrijfmest en wintertarwe met rundveedrijfmest. De fosfaatruimte wordt met rundveedrijfmest opgevuld bij de groenbemesters, ten behoeve van de volgende teelt. De fosfaatklasse is neutraal (Pw=40; P-AL=50; P-CaCl<sub>2</sub>=2,0) en de gebruiksnorm is 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.

Tabel 1. Praktijkopbrengsten per voorbeeldbedrijf die zijn gebruikt voor de balansen.

Gebied	Rotatie	Praktijkopbrengst (t/ha)		
		Laag	Gemiddeld	Hoog
Zuidoostelijke Zandgrond	Consumptieaardappel		65	
	Suikerbiet		90	
	Zomergerst		7	
	Snijmais		48	
	Ui		55	
	Bonen		15	
	Erwten		8,5	
Noord Oost Nederland	Zetmeelaardappel	40	44	48
	Suikerbiet	80	85	90
	Zomergerst	6	6,75	7,5
Zuid Westelijke zeeklei	Consumptieaardappel	45	50	60
	Suikerbiet	85	95	105
	Wintertarwe	9	10	11
	Graszaad	1,2	1,55	2
	Ui	45	50	60
Noordelijke zeeklei	Pootaardappel	30	42,5	55
	Consumptieaardappel	45	60	75
	Suikerbiet	90	100	120
	Wintertarwe	8	10	11
	Witlof	26,2	27,6	29
	Ui	40	65	90
	Peen	77	82,25	87,5

## Bijlage II Kengetallen organische stof

Tabel 3 – Kengetallen effectieve organische stof in mest

Mestsoort	EOS (kg/kg mest)	Bron
Varkensmest	0,05	Handboek Bodem en Bemesting
Runderstalmest	0,109	Handboek Bodem en Bemesting
Varkensdrijfmest	0,026	Handboek Bodem en Bemesting
Rundveedrijfmest	0,05	Handboek Bodem en Bemesting
GFT Compost	0,218	Handboek Bodem en Bemesting
Groen Compost	0,161	Handboek Bodem en Bemesting
Geitenmest	0,122	Handboek Bodem en Bemesting
Champost	0,106	Handboek Bodem en Bemesting
Digestaat	0,024	van Geel et al. (2019)
Mestmix	0,038	Handboek Bodem en Bemesting

\* Een mestmix bestaat uit verschillende verhoudingen aan rundveedrijfmest, varkensdrijfmest en digestaat. Omdat de verhoudingen niet bekend zijn, is er uitgegaan van een gemiddelde.

Tabel 4 – Kengetallen effectieve organische stof van gewasresten en groenbemester

Gewasrest	EOS (kg/ha)	Bron
Aardappel	875	Handboek Bodem en Bemesting
Ui	300	Handboek Bodem en Bemesting
Suikerbiet	1275	Handboek Bodem en Bemesting
Wintertarwe	2630*	Handboek Bodem en Bemesting
Zomertarwe	2590*	Handboek Bodem en Bemesting
Snijmais	675	Handboek Bodem en Bemesting
Zomergerst	1940*	Handboek Bodem en Bemesting
Stamslaboon	650	Handboek Bodem en Bemesting
Wintergerst	2350*	Handboek Bodem en Bemesting
Graszaad	1750	Handboek Bodem en Bemesting
Witlof	600	Handboek Bodem en Bemesting
Peen	700	Handboek Bodem en Bemesting
Groenbemester	850**	Handboek Bodem en Bemesting

\* Indien stro achtergelaten. \*\* Groenbemesters zijn niet gespecificeerd, er is uitgegaan van een gemiddelde van verschillende groenbemesters.

# Bijlage III Fosfaatbalansen

Tabel 5 – Fosfaatbalans Zuidoostelijke zandgronden

		Op gewasniveau																								Op bouwplan niveau							
		Aardappel (25%*)						Suikerbiet (25%)				Zomergerst (13%**)				Uj (10%***)				Erwt/boon (13%**)				Snijmais (25%****)				Gbm					
		An	Af					An	Af					An	Af					An	Af					An	Af			An	An	Af	Overschot
	Pw	P-CaCl2	P-AL	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift					
I.	50	3	50	80	65	1,00	65	60	90	0,65	58	0	7	7,55	53					60	8,5/15	1,13/2,7	50	60	48	1,43	69	20	63	61	2		
II.	55	3	60	70	65	1,00	65	50	90	0,65	58	0	7	7,55	53					40	8,5/15	1,13/2,7	50	50	48	1,43	69	20	53	61	-8		
III.	60	4	70	40	60	0,98	59	40	85	0,66	56					40	55	0,93	51					40	45	1,44	65	1	40	58	-18		
IV.	60	4	70	60	60	0,98	59	5	85	0,66	56					40	55	0,93	51					40	45	1,44	65	0	41	58	-17		

An staat voor aanvoer (kg P2O5 ha), Af voor afvoer (kg P2O5 ha), Op voor opbrengst (ton ha), G voor P-gehalte (kg P2O5 ton product), Gift voor de fosfaatbemesting (kg P2O5 ha), gbm voor groenbemester. \* 50% bij scenario III en IV. \*\* 0% bij scenario III en IV. \*\*\* 0% bij scenario I en II. \*\*\*\* 15% bij scenario III en IV.

Tabel 6 – Fosfaatbalans Noordoost Nederland

		Op gewasniveau																Op bouwplan niveau				
		Aardappel (50%)						Suikerbiet (17%)				Zomergerst (33%)				Gbm						
		Aanvoer		Afvoer				Aanvoer		Afvoer		Aanvoer		Afvoer		Aanvoer		Aanvoer		Afvoer		Overschot
	Op niveau	Pw	P-CaCl2	P-AL	Gift	Opbrengst	P-gehalte	Op*G	Gift	Opbrengst	P-gehalte	Op*G	Gift	Opbrengst	P-gehalte	Op*G						
V.	Laag	30	2	40	100	40	1,23	49	70	80	0,68	54	25	6,00	7,79	47	30	80	49	31		
	Middel					44	1,26	55		85	0,66	56		6,75	7,61	51			54	26		
	Hoog					48	1,29	62		90	0,66	59		7,50	7,43	56			59	21		
VI.	Laag	40	2	50	80	40	1,23	49	60	80	0,68	54	30	6,00	7,79	47	30	70	49	21		
	Middel					44	1,26	55		85	0,66	56		6,75	7,61	51			54	16		
	Hoog					48	1,29	62		90	0,66	59		7,50	7,43	56			59	11		
VII.	Laag	50	3	50	64	40	1,23	49	60	80	0,68	54	0	6,00	7,79	47	50	59	49	9		
	Middel					44	1,26	55		85	0,66	56		6,75	7,61	51			54	4		
	Hoog					48	1,29	62		90	0,66	59		7,50	7,43	56			59	0		
VIII.	Laag	55	3	60	64	40	1,23	49	50	80	0,68	54	0	6,00	7,79	47	25	49	49	-1		
	Middel					44	1,26	55		85	0,66	56		6,75	7,61	51			54	-5		
	Hoog					48	1,29	62		90	0,66	59		7,50	7,43	56			59	-10		
IX.	Laag	55	3	60	64	40	1,23	49	50	80	0,68	54	0	6,00	7,79	47	27	49	49	0		
	Middel					44	1,26	55		85	0,66	56		6,75	7,61	51			54	-5		
	Hoog					48	1,29	62		90	0,66	59		7,50	7,43	56			59	-10		
X.	Laag	60	4	70	40	40	1,23	49	41	80	0,68	54	0	6,00	7,79	47	40	40	49	-9		
	Middel					44	1,26	55		85	0,66	56		6,75	7,61	51			54	-14		
	Hoog					48	1,29	62		90	0,66	59		7,50	7,43	56			59	-19		

An staat voor aanvoer in kg P2O5 ha, afvoer in kg P2O5 ha, Op staat voor opbrengst (ton ha), G voor P-gehalte (kg P2O5 ton product), Gift voor de fosfaatbemesting (kg P2O5 ha), Gbm voor groenbemester.

Tabel 7 – Fosfaatbalans Zuidwestelijke zeekelei

		Op gewasniveau																			Op bouwplan niveau							
		Aardappel (20%)				Suikerbiet (15%)				Wintertarwe (40%)				Graszaad (10%)				Ui (15%)			Gbm							
		An	Af			An	Af			An	Af			An	Af			An	Af				Aanvoer	Aanvoer	Afvoer	Overschot		
Op niv	Pw	P-CaCl2	P-AL	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G					
XI.	Laag	30	1,5	40	100	45	0,93	42	0	85	0,75	64	105	9	7,04	63	105	1,20	10,05	12	50	45	1,00	45	0	80	51	29
	Middel					50	0,94	47		95	0,71	67		10	6,92	69		1,55	10,05	16		50	0,97	48,5			56	24
	Hoog					60	0,98	59		105	0,68	71		11	6,88	76		2,00	10,05	20		60	0,90	54			63	17
XII.	Laag	30	1,5	40	210	45	0,93	42	0	85	0,75	64	50	9	7,04	63	105	1,20	10,05	12	50	45	1,00	45	0	80	51	29
	Middel					50	0,94	47		95	0,71	67		10	6,92	69		1,55	10,05	16		50	0,97	48,5			56	24
	Hoog					60	0,98	59		105	0,68	71		11	6,88	76		2,00	10,05	20		60	0,90	54			63	17
XIII.	Laag	40	2,0	50	100	45	0,93	42	0	85	0,75	64	80	9	7,04	63	105	1,20	10,05	12	40	45	1,00	45	0	69	51	17
	Middel					50	0,94	47		95	0,71	67		10	6,92	69		1,55	10,05	16		50	0,97	48,5			56	12
	Hoog					60	0,98	59		105	0,68	71		11	6,88	76		2,00	10,05	20		60	0,90	54			63	6
XIV.	Laag	40	2,0	50	210	45	0,93	42	0	85	0,75	64	40	9	7,04	63	105	1,20	10,05	12	10	45	1,00	45	0	70	51	19
	Middel					50	0,94	47		95	0,71	67		10	6,92	69		1,55	10,05	16		50	0,97	48,5			56	14
	Hoog					60	0,98	59		105	0,68	71		11	6,88	76		2,00	10,05	20		60	0,90	54			63	7
XV.	Laag	50	3,0	50	80	45	0,93	42	0	85	0,75	64	80	9	7,04	63	105	1,20	10,05	12	10	45	1,00	45	0	60	51	9
	Middel					50	0,94	47		95	0,71	67		10	6,92	69		1,55	10,05	16		50	0,97	48,5			56	4
	Hoog					60	0,98	59		105	0,68	71		11	6,88	76		2,00	10,05	20		60	0,90	54			63	-3
XVI.	Laag	50	3,0	50	170	45	0,93	42	0	85	0,75	64	36	9	7,04	63	105	1,20	10,05	12	10	45	1,00	45	0	60	51	9
	Middel					50	0,94	47		95	0,71	67		10	6,92	69		1,55	10,05	16		50	0,97	48,5			56	4
	Hoog					60	0,98	59		105	0,68	71		11	6,88	76		2,00	10,05	20		60	0,90	54			63	-2

An staat voor aanvoer (kg P2O5 ha), Af voor afvoer (kg P2O5 ha), Op voor opbrengst (ton ha), G voor P-gehalte (kg P2O5 ton product), Gift voor de fosfaatbemesting (kg P2O5 ha), gbm voor groenbemester, Op niv voor opbrengstniveau.

Tabel 8 – Fosfaatbalans op Noordelijke/centrale zeekelei

		Op gewasniveau																			Op bouwplan niveau											
		Aardappel (33%*25%**)				Suikerbiet (17%*20%**)				Wintertarwe (17%*25%**)				Witlof (8%*6%**)				Ui (17%*18%**)			Peen (8%*6%**)			Gbm								
		An	Af			An	Af			An	Af			An	Af			An	Af			An	Af				An	An	Af	Overschot		
Op niv	Pw	P-CaCl2	P-AL	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G	Gift	Op	G	Op*G					
XVII.	Laag	30	1,5	40	55	30	0,87	26	0	90	0,73	66	53	8	7,16	57	0	26,2	1,20	31	150	40	1,03	41	0	77,00	0,64	49	82	80	43	36
	Middel					43	0,92	39		100	0,70	70		10	6,92	69		27,6	1,20	33		65	0,87	57		82,25	0,65	53			53	26
	Hoog					55	0,96	53		120	0,63	76		11	6,80	75		29,0	1,20	35		90	0,71	64		87,50	0,65	57			61	18
XVIII.	Laag	40	2,0	50	55	30	0,87	26	0	90	0,73	66	53	8	7,16	57	0	26,2	1,20	31	101	40	1,03	41	0	77,00	0,64	49	80	70	43	27
	Middel					43	0,92	39		100	0,70	70		10	6,92	69		27,6	1,20	33		65	0,87	57		82,25	0,65	53			53	17
	Hoog					55	0,96	53		120	0,63	76		11	6,80	75		29,0	1,20	35		90	0,71	64		87,50	0,65	57			61	9
XIX.	Laag	30	1,5	40	68	45	0,93	42	0	90	0,73	66	53	8	7,16	57	0	26,2	1,20	31	0	40	1,03	41	0	77,00	0,64	49	117	80	50	30
	Middel					60	0,98	59		100	0,70	70		10	6,92	69		27,6	1,20	33		65	0,87	57		82,25	0,65	53			61	19
	Hoog					75	1,03	77		120	0,63	76		11	6,80	75		29,0	1,20	35		90	0,71	64		87,50	0,65	57			70	10

XX.	Laag	40	2,0	50	68	45	0,93	42	0	90	0,73	66	53	8	7,16	57	0	26,2	1,20	31	0	40	1,03	41	0	77,00	0,64	49	93	70	50	20
	Middel					60	0,98	59		100	0,70	70		10	6,92	69		27,6	1,20	33		65	0,87	57		82,25	0,65	53			61	9
	Hoog					75	1,03	77		120	0,63	76		11	6,80	75		29,0	1,20	35		90	0,71	64		87,50	0,65	57			70	0

An staat voor aanvoer (kg P205 ha), Af voor afvoer (kg P205 ha), Op voor opbrengst (ton ha), G voor P-gehalte (kg P205 ton product), Gift voor de fosfaatbemesting (kg P205 ha), gbm voor groenbemester, Op niv voor opbrengstniveau. \* Bij scenario XVII en XVIII. \*\* Bij scenario XIX en XX.

## Bijlage IV Organische stofbalansen

Tabel 9 – Organische stofbalans Zuidoostelijke zandgronden

	Op gewasniveau																											Op bouwplan niveau																	
	Aardappel (25%*)						Suikerbiet (25%)						Zomergerst (13%)**						Ui (10%***)						Erwt/boon (13%)**						Snijmais (25%****)						Groenbemester						Aanvoer	Afbraak	Balans
	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest	GR	Tot.														
Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	OS	OS														
I.	VDM	1040	875	1915	VDM	780	1275	2055			1940	1940				VDM	780	650	1430	VDM	780	675	1455	VDM	260	850	1110	2055	1760	295															
II.	VDM	910	875	1785	VDM	650	1275	1925			1940	1940				VDM	520	650	1170	VDM	650	675	1325	VDM	260	850	1110	1925	1760	165															
III.	RDM	1666	875	2542	RDM	1667	1275	2942					RDM	1667	300	1967				RDM	1667	675	2342	RDM	42	850	892	2643	1760	883															
IV.	RDM	2500	875	3375	MC	92	1275	1367							300	300										850	850	2246	1760	486															

EOS staat voor effectieve organische stof in kg ha, GR voor gewasrest, RDM voor rundveedrijfmest, VDM voor varkensdrijfmest, MC voor mineralenconcentraat.

Tabel 10 – Organische stofbalans Noordoost Nederland

	Op gewasniveau																Op bouwplan niveau												
	Aardappel (50%)						Suikerbiet (17%)						Zomergerst (33%)						Groenbemester						Aanvoer	Afbraak	Balans		
	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest		GR	Tot.	Mest	GR	Tot.						
Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	EOS	OS	OS				
V.	MM+KU		1520	815		2335	MM		1750		1275		3025	RDM		625		1940						850	850	2809	2120	689	
VI.	MM		1520	815		2335	RDM		1500		1275		2775					1940						850	850	2560	2120	440	
VII.	MM		1216	815		2031	RDM		1500		1275		2775					1940						1250	850	2100	2820	2120	700
VIII.	MM		1216	815		2031	RDM		1650		1275		2925					1940						480	850	1330	2592	2120	472
IX.	MM		1520	815		2335	MM		1254		1275		2529					1940						432	850	1282	2661	2120	541
X.	MM		950	815		1765	RDM		1350		1275		2625					1940						950	850	1800	2563	2120	443

EOS staat voor effectieve organische stof in kg ha, GR voor gewasrest, KU voor kunstmest, RDM voor rundveedrijfmest, MM voor mestmix en DG voor digestaat.

Tabel 11 – Organische stofbalans Zuidwestelijke zeekelei

Op gewasniveau																								Op bouwplan niveau											
Aardappel (20%)						Suikerbiet (15%)						Wintertarwe (40%)						Graszaad (10%)						Ui (15%)						Groenbemester					
Mest			GR	Tot.	Mest			GR	Tot.	Mest			GR	Tot.	Mest			GR	Tot.	Mest			GR	Tot.	Mest	GR	Tot.	Aanvoer	Afbraak	Balans					
Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	OS	OS						
XI.	C+KU	1210	875	2085			1275	1275	VDM	936	2630	3566	VDM	936	1750	2686			300	300			850	850	2688	2170	518								
XII.	GM+C+RDM+KU	5753	875	6628			1275	1275	BDM	520	2630	3150			1750	1750			300	300			850	850	3337	2170	1167								
XIII.	C+KU	1210	875	2085			1275	1275	VDM	936	2630	3566	VDM	936	1750	2686			300	300			850	850	2688	2170	518								
XIV.	GM+C+RDM+KU	5753	875	6628			1275	1275	BDM	416	2630	3046			1750	1750			300	300			850	850	3295	2170	1125								
XV.	C+KU	1210	875	2085			1275	1275	VDM	936	2630	3566	VDM	936	1750	2686			300	300			850	850	2688	2170	518								
XVI.	GM+C+RDM+KU	5753	875	6628			1275	1275	BDM	374,4	2630	3004			1750	1750			300	300			850	850	3279	2170	1109								

EOS staat voor effectieve organische stof in kg ha, GR voor gewasrest, KU voor kunstmest, RDM voor rundveedrijfmest, GM voor geitenmest, C voor compost, BDM voor bewerkte drijfmest, VDM voor varkensdrijfmest.

Tabel 12 – Organische stofbalans Noordelijke/centrale zeekelei

Op gewasniveau																								Op bouwplan niveau																	
Aardappel (33%* 25%**)						Suikerbiet (17%* 20%**)						Wintertarwe (17%* 25%**)						Witlof (8%* 6%**)						Ui (17%* 18%**)						Peen (8%* 6%**)						Groenbemester					
Mest			GR	Tot.	Mest			GR	Tot.	Mest			GR	Tot.	Mest			GR	Tot.	Mest			GR	Tot.	Mest	GR	Tot.	Aanvoer	Afbraak	Balans											
Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	Soort	EOS	EOS	EOS	OS	OS												
XVII.	KU	955	955			1275	1275	RDM	1759	2630	4389			600	600	KU		300	300			700	700	GM	1879	850	2729	2809	2170	920											
XVIII.	KU	955	955			1275	1275	RDM	1759	2630	4389			600	600	KU		300	300			700	700	GM	1830	850	2680	2199	2170	310											
XIX.	RDM	1759	875	2634			1275	1275	RDM	1759	2630	4389			600	600			300	300			700	700	GM	2684	850	3534	3297	2170	1492										
XX.	RDM	1759	875	2634			1275	1275	RDM	1759	2630	4389			600	600			300	300			700	700	RDM	3116	850	3966	3848	2170	1678										

EOS staat voor effectieve organische stof in kg ha, GR voor gewasrest, KU voor kunstmest, RDM voor rundveedrijfmest, GM voor geitenmest. \* Bij scenario XVII en XVIII. \*\* Bij scenario XIX en XX.



# Bijlage V Fosfaatgehalten gewas

Tabel 13 – Fosfaatgehalten (kg P2O5/ton vers product) uit de literatuur

	Van Dijk (2003)	Ehlert et al. (2009)	Op basis van de formules uit de Ruijter et al. (2020)
Consumptie aardappel	1,1	1	0,94-1,0
Zetmeel aardappel	0,9	1,16	1,26
Pootaardappel	1,1	0,85	0,92
Suikerbiet	0,9	0,8	0,65-0,71
Wintertarwe	7,8	6,93	6,92
Zomergerst	8	7,81	7,55-7,61
Graszaad	10,1	10,15	10,15
Ui	0,7	0,83	0,93-0,97
Bonen	1,1	1,13	2,7
Snijmais	1,1	1,32	1,43
Witlof	0,7	1,2	1,2
Peen	0,7	0,63	0,65



Nutriënten Management Instituut BV  
Nieuwe Kanaal 7c  
6709 PA Wageningen

tel: (06) 29 03 71 03  
e-mail: [nmi@nmi-agro.nl](mailto:nmi@nmi-agro.nl)  
website: [www.nmi-agro.nl](http://www.nmi-agro.nl)