



# Lange termijn effecten fosfaatbemesting op een bouwlandproef in Lelystad

Meetresultaten van de periode 2005-2020

Auteurs | Vervuurt, W., van Geel, W., Regelink, I. & de Haan, J.

WPR-OT 1000



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

# Lange termijn effecten fosfaatbemesting op een bouwlandproef in Lelystad

Meetresultaten van de periode 2005-2020

Auteurs: Vervuurt, W., van Geel, W., Regelink, I. en de Haan, J.

Wageningen University & Research

Dit onderzoek is in opdracht van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit uitgevoerd door de Stichting Wageningen Research (WR), business unit Open Teelten, in het kader van beleidsondersteunend onderzoeksthema MMIP: A1 – Verminderen fossiele nutriënten, water en stikstofdepositie.

WR is een onderdeel van Wageningen University & Research, samenwerkingsverband tussen Wageningen University en de Stichting Wageningen Research.

Wageningen, april 2023

---

Bovendien bedanken we Wim van den Berg voor zijn bijdrage aan de uitvoering van de statistische analyses. Voorts bedanken we Hendrik Holwerda voor zijn uitvoerige review.

Rapport WPR-OT 1000



Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/588813>

In Nederland zijn fosfaatgebruiksnormen ingesteld om de verliezen van fosfaat te beperken. In een lange termijn experiment op een zavelgrond in Lelystad zijn verschillende trappen met fosfaatbemesting aangelegd om de effecten op de bodemfosfaattoestand, gewasopbrengsten, productkwaliteit en verliezen in kaart te brengen. Dit proefveld is in 1986 aangelegd en kende de volgende fosfaattrappen: 0, 70, 140 en 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Dit heeft geleid tot uiteenlopende fosfaattoestanden. In 2005 zijn deze objecten gesplitst en de helft heeft geen fosfaatbemesting ontvangen (uitmijnen). Dit rapport beschrijft de resultaten van 2005-2020. De bemestingsstrategieën kwamen duidelijk tot uiting in de bodemmetingen. Bemesting met 140 en 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> heeft geleid tot zeer hoge fosfaattoestanden, ver boven het landbouwkundig streeftraject. Een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bleek niet voldoende om een initieel lage fosfaattoestand te verhogen tot binnen het streeftraject, deze gift leek wel voldoende om een initiële fosfaattoestand binnen het streeftraject te handhaven. Het effect van uitmijnen werd het snelst zichtbaar in de P-CaCl<sub>2</sub> meting, de historische bemesting kwam beter tot uiting in P-Al. De fosfaattoestand van de uitmijnobjecten is nog niet gestabiliseerd. Wat betreft de gewasopbrengst werd duidelijk dat gemiddeld gezien over de periode 2005-2020 de maximale opbrengst reeds bereikt werd bij een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> i.c.m. een Pw-getal van circa 40 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/L. Een hogere fosfaattoestand en/of hogere fosfaatgift gaf doorgaans geen hogere opbrengst. Bij gelijke bemesting (70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>) gaf een lagere toestand een significant lagere opbrengst. Uitmijnen leidde pas tot een opbrengstderving bij relatief lage fosfaattoestanden. In een bouwplan met fosfaatbehoefte gewassen kan er een optimale gewasopbrengst bereikt worden met een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bij een fosfaattoestand van Pw 30-45. Het effect van de fosfaattoestand en -bemesting op de gewaskwaliteit was veelal beperkt.

Trefwoorden: Fosfaat, fosfaatindicatoren, fosfaatverzadiging, gewasopbrengst, akkerbouw.

© 2023 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Open Teelten, Postbus 430, 8200 AK Lelystad; T 0320 291 111; [www.wur.nl/plant-research](http://www.wur.nl/plant-research)

KvK: 09098104 te Arnhem  
VAT NL no. 8113.83.696.B07

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

Stichting Wageningen Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Rapport WPR-OT 1000

Foto omslag: Open Teelten

---

# Inhoud

<b>Inhoud</b>	<b>3</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1 Aanleiding	6
1.2 Achtergrond fosfaatgiften in de proef	7
1.3 Achtergrond beoordeling fosfaattoestand	8
1.4 Kennisbehoefte	9
<b>2 Proefopzet, uitvoering en metingen</b>	<b>11</b>
2.1 Opzet	11
2.2 Meetprogramma	11
2.3 Data-analyse	13
<b>3 Resultaten</b>	<b>14</b>
3.1 Gewasopbrengsten	14
3.2 Productkwaliteit en sortering	18
3.3 Fosfaatafvoer	21
3.4 Fosfaatoverschot	22
3.5 Verloop van de fosfaatindicatoren in de tijd	23
3.6 Wijzigingen in de fosfaattoestand als functie van het fosfaatoverschot	39
3.7 Omzettingen en verliezen	42
3.8 Gewasopbrengsten als functie van de fosfaattoestand en -bemesting	42
<b>4 Discussie</b>	<b>46</b>
4.1 Resultaten in bredere context	46
4.2 Onzekerheden	50
<b>5 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>52</b>
<b>6 Literatuur</b>	<b>55</b>
<b>Bijlage 1 Schema Proefveld Lelystad</b>	<b>56</b>
<b>Bijlage 2 Berekening van de fosfaatafvoer</b>	<b>57</b>
<b>Bijlage 3 Jaarlijkse opbrengsten en fosfaatafvoer</b>	<b>58</b>
<b>Bijlage 4 Maatsortering van aardappel, ui en peen</b>	<b>59</b>
<b>Bijlage 5 Fosfaatafvoer</b>	<b>60</b>
<b>Bijlage 6 Gewasresten</b>	<b>61</b>
<b>Bijlage 7 Verloop fosfaattoestand in de bodem</b>	<b>62</b>
<b>Bijlage 8 Trendlijnen verloop fosfaattoestand</b>	<b>65</b>
<b>Bijlage 9 Samenhang in fosfaatmetingen in en onder de bouwvoor</b>	<b>72</b>
<b>Bijlage 10 Verandering van de fosfaattoestand in relatie tot het fosfaatoverschot</b>	<b>76</b>
<b>Bijlage 11 De fosfaattoestand in relatie tot het cumulatieve fosfaatoverschot</b>	<b>81</b>
<b>Bijlage 12 Verwachte en gerealiseerde verandering van P-CaCl<sub>2</sub>, P-Al en P-totaal</b>	<b>86</b>
<b>Bijlage 13 De samenhang tussen de fosfaattoestand en gewasopbrengst</b>	<b>87</b>

---

# Samenvatting

Vanwege maatschappelijke zorgen rond de negatieve effecten van fosfaat op het milieu is er in Nederland wet- en regelgeving geïmplementeerd welke de verliezen van fosfaat moeten beperken. Momenteel wordt er een maximum gesteld aan hoeveelheid meststoffen die op landbouwgrond gebruikt mogen worden, via een stelsel van fosfaatgebruiksnormen. De hoogte van de fosfaatgebruiksnorm is gedifferentieerd naar de fosfaattoestand van de bodem. Recentelijk is daarbij overgestapt van een bepaling op basis van het Pw-getal naar een gecombineerde indicator van P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al. De vraag is wat verschillende niveaus aan bemesting betekenen voor de landbouwpraktijk en milieukundige verliezen.

Met de resultaten verkregen uit de veeljarige fosfaatveldproef te Lelystad wordt antwoord gegeven op vragen met betrekking tot de effecten van verschillende bemestingsniveaus, inclusief uitmijnen, op gewasopbrengsten, gewaskwaliteit, bodemfosfaattoestand, mogelijke verliezen, en bodem organische stof.

Dit rapport is een vervolg en uitbreiding op de resultaten van de periode 1990-2001 zoals beschreven door Ehlert et al. (2003), van 1986-2007 door Ehlert et al. (2008), van 2002-2011 door van Wijk et al. (2013), van 2001-2016 door Ehlert et al. (2018), en van 2005-2019 zoals beschreven door Regelink et al. (2021). Het doel van dit project is om de trends in fosfaatbodemindicatoren gerichter te beschrijven.

De proef is aangelegd in 1986 waarbij vier niveaus aan bemesting zijn aangelegd: 0, 70, 140 en 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Door het jarenlang in stand houden van deze bemestingsniveaus zijn er verschillende niveaus in de bodem fosfaattoestand ontstaan. In 2005 zijn de veldjes gesplitst, waarbij de bemesting op de helft is voortgezet en op de andere helft er niet meer bemest is. Dit is gedaan om het effect van uitmijnen te kunnen volgen. Gedurende de proef zijn de gewasopbrengsten en het fosforgehalte bepaald en de bodem fosfaattoestand gemeten. Aanvullend zijn in enkele jaren het bodemprofiel bemonsterd tot 100cm diepte, de fosfaatconcentratie in het bodemvocht bepaald en metingen verricht aan (de kwaliteit van) de bodem organische stof.

Er zijn meerdere fosfaatindicatoren en systematieken om de fosfaattoestand van de bodem te beoordelen. Er is een wettelijk vastgestelde klassenindeling voor de fosfaattoestand (aanvankelijk o.b.v. Pw-getal voor bouwland en sinds 2021 o.b.v. de gecombineerde indicator) welke dient voor het vaststellen van de fosfaatgebruiksnormen. Daarnaast zijn er landbouwkundige streefwaarden voor bouwlandgrond welke nog zijn gebaseerd op het Pw-getal, maar binnenkort ook zullen worden gebaseerd op de gecombineerde indicator. Beide systematieken leiden tot een andere waardering van de bodemfosfaattoestand en kennen een ander doel. Het landbouwkundig streeftraject is in de jaren '70 opgesteld en is bedoeld om opbrengstderving te voorkomen. Het wettelijke kader van fosfaatgebruiksnormen is opgesteld om milieukundige verliezen van fosfaat te verminderen. In dit rapport is het landbouwkundige streefgetal o.b.v. Pw-getal als leidend genomen bij de beoordeling van de resultaten.

Uit de resultaten wordt duidelijk dat gemiddeld gezien over de periode 2005-2020 de maximale opbrengst reeds bereikt werd bij een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> i.c.m. een Pw-getal van circa 40 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/L. Een hogere fosfaattoestand en/of hogere fosfaatgift gaf doorgaans geen hogere opbrengst. Enkel aardappels en in mindere mate ook suikerbieten bleken in enkele jaren te profiteren van een relatief hoge fosfaattoestand en -gift. In het geval van lagere fosfaattoestanden (Pw<45, P-CaCl<sub>2</sub><1,7, P-Al<42) en gelijke bemesting (70kg kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>) wordt het effect van de fosfaattoestand zichtbaar. Een hogere fosfaattoestand gaf een significant hogere opbrengst. Bij een hogere fosfaattoestand leidde een verdere toename van de fosfaattoestand of -bemesting doorgaans niet tot significant hogere opbrengsten. Hierin bestaan verschillen tussen gewassen, aardappelen lijken hier sterker op te reageren dan bijvoorbeeld uien. In de onbemeste objecten wordt de samenhang tussen de fosfaattoestand en gewasopbrengst duidelijk. Hoe hoger de fosfaattoestand, hoe hoger de opbrengst. Dit effect vinkt af naarmate de fosfaattoestand hoger is. Enkel bij fosfaattoestanden lager dan Pw 45 leidde het onthouden van een verse fosfaatgift tot opbrengstderving, dit niveau verschilt echter per gewas. In een bouwplan met fosfaatbehoefte gewassen kan er een optimale gewasopbrengst bereikt worden met een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bij een fosfaattoestand van Pw 30-45. Bij een lagere fosfaattoestand is een hogere bemesting vanuit landbouwkundig oogpunt gewenst. Het huidige stelsel van gebruiksnormen voorziet in deze gevallen een gebruiksnorm van 80-120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>.

Kortgezegd is de fosfaattoestand en -gift enkel van belang wanneer de fosfaattoestand onder een bepaald niveau zakt. Dit onderstreept het belang van het handhaven van het landbouwkundig streeftraject voor de bodem fosfaattoestand. Met het huidige stelsel zullen initiële fosfaattoestanden boven het landbouwkundig streeftraject gaan dalen door een maximale bemesting van 40-60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. In deze proef gaf dat geen risico op opbrengstderving.

Het effect van de fosfaattoestand en -bemesting op de gewaskwaliteit was veelal beperkt. Enkel in één jaar werd er een effect vastgesteld van de objecten op het knolaantal bij de aardappel. Bij de twee laagste toestanden zonder fosfaatbemesting was het knolaantal significant lager dan bij de overige objecten.

---

Wat betreft de fosfaattoestand zijn de verschillen in fosfaatbemestingsniveaus goed zichtbaar in de bodemmetingen. De fosfaattoestand was hoger naarmate de fosfaatbemesting hoger was. Een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bleek niet voldoende om een initieel lage fosfaattoestand te verhogen tot binnen het streeftraject, mogelijk is deze gift wel voldoende om een initiële fosfaattoestand binnen het streeftraject te handhaven. Bemesting met 140 en 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> heeft geleid tot zeer hoge fosfaattoestanden, ver boven het landbouwkundig streeftraject.

Het effect van uitmijnen wordt snel zichtbaar in de fosfaattoestanden, waarbij de daling scherper is naarmate de initiële fosfaattoestand hoger is. Meetreeksen geven aan dat de fosfaattoestanden bij uitmijnen na 15 jaar nog niet gestabiliseerd zijn. Wel vinden er verschuivingen plaats in de bodemfracties. Het effect van uitmijnen werd het beste zichtbaar wanneer gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>, met P-Al werd het effect minder snel en gelijkmatiger zichtbaar. Kortom, P-CaCl<sub>2</sub> toont sneller de verschillen in bemesting en de historische bemesting komt beter tot uiting in P-Al.

Ook onder de bouwvoor (30-60cm) komen de verschillen tussen objecten tot uiting, al is het verschil minder sterk dan in de bouwvoor. In diepere lagen (60-100cm) is er geen verschil waarneembaar in de fosfaatconcentratie tussen de objecten met uiteenlopende fosfaatgiften.

Bij een hoger fosfaatoverschot stabiliseert de labiele fosfaatfractie (P-CaCl<sub>2</sub>) in de bodem, en wordt het overschot vastgelegd in stabielere fosfaatfracties. Bij fosfaatoverschotten rond evenwichtsbemesting (70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>) wordt het fosfaatoverschot grotendeels teruggevonden in de bodemlaag 0-60cm. Bij hogere fosfaatoverschotten wordt een groot deel echter niet teruggevonden. Uit metingen blijkt dat hogere fosfaatoverschotten hebben geleid tot een hogere concentratie fosfaat in het bodemvocht onder de bouwvoor gedurende de wintermaanden, wat het risico op uitspoeling aangeeft. Uitmijnen bij een hoge initiële fosfaattoestand gaf direct een duidelijke daling van de concentratie fosfaat in het bodemvocht. De verliezen per object zijn niet exact vast te stellen, gezien de grote jaar-tot-jaar variatie in de bodemmetingen, onzekerheden in de P-totaalmeting en de bulkdichtheidsbepaling.

Bij lage fosfaattoestanden en -giften bleef de productie achter, wat zou kunnen leiden tot een verminderde aanvoer van gewasresten en organische stof naar de bodem. In de meetresultaten van bepalingen aan de hoeveelheid en kwaliteit van organische stof in de bodem is dit echter niet tot uiting gekomen.

Kort samengevat geldt voor de grond van dit proefveld dat een bemesting groter of gelijk aan de evenwichtsbemesting (~70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>) vanuit landbouwkundig opzicht enkel nodig is bij een fosfaattoestand gelijk of kleiner dan het landbouwkundig streeftraject. Een bemesting met 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> is echter te laag om een toestand aan de bovenkant van het landbouwkundig streeftraject te handhaven, of een lage toestand te verhogen tot binnen het streeftraject. Binnen het huidige systeem van gebruiksnormen is hierin voorzien door een maximale bemesting van 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bij een toestand onder het landbouwkundig streeftraject (Pw <25) en van 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bij een toestand aan de onderkant van het traject (Pw 25-35). Een bemesting die veel hoger is dan evenwichtsbemesting in situaties boven het landbouwkundig streeftraject leidt tot een verdere verhoging van de fosfaattoestand, en geeft een onnodig risico op verliezen.

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In 1986 is de fosfaatrapenproef in Lelystad aangelegd met verschillende niveaus aan fosfaatbemesting. Destijds voornamelijk om de reactie van verschillende gewassen op fosfaattoestand van de bodem en fosfaatbemesting vast te stellen en het effect van verschillende fosfaatoverschotten (zowel positief als negatief overschot als evenwichtsbemesting) op de verandering van verschillende fosfaatfracties in de bodem. Vervolgens zijn er verschillende redenen geweest om deze proef in stand te houden en te blijven volgen. Allereerst zijn de veranderingen in de fosfaattoestand van de bodem, en de effecten daarvan op de waterkwaliteit, traag. Veeljarig onderzoek is vereist om dergelijke effecten objectief vast te kunnen stellen (Ehlert et al., 2003).

Al vanaf de jaren '70 zijn er maatschappelijke zorgen rond de negatieve effecten van fosfaat op het milieu. In 1998 is er wet- en regelgeving geïmplementeerd ter bescherming van het milieu. In die jaren lag de focus op de overschotten op de fosfaatbalans. Het toelaatbare verlies aan fosfaat veroorzaakt door dierlijke mest was vastgesteld op 40 kg  $P_2O_5$  in 1998, en op 25 kg  $P_2O_5$  in 2003. Destijds vond er nog steeds verrijking plaats van de bodem, en er bestonden zorgen om ongewenste verliezen. Ehlert et al. (1996; 2003) analyseerden daarom de fosfaatoverschotten in relatie tot de fosfaattoestand in de bodem en het bufferend vermogen van de gronden, om daarmee inzicht te krijgen in het lot van P in de bodem op lange termijn. Zij concludeerden dat hoge cumulatieve overschotten aan fosfaat niet leiden tot een overeenkomstige evenredige verhoging van het Pw-getal en P-Al getal (in en onder de bouwvoor). Zij gaven aan dat er aanvullend onderzoek nodig is om meer inzicht te krijgen in de fosfaatverliezen.

Dit is door Ehlert et al. (2008) onderzocht middels metingen aan de fosfaatfracties, een profielbemonstering, en de fosforconcentratie in het bodemvocht. Zij stelden vast dat hoge fosfaatoverschotten worden omgezet in fosfaatvormen die niet met de extractiemethoden voor Pw-getal of P-Al vastgesteld kunnen worden. Uit de profielbemonstering bleek dat de totale hoeveelheid P in de bodemlaag 0-40cm verschilde tussen de objecten, maar in diepere lagen niet. De totale hoeveelheid fosfaat in het bodemvocht op 35 cm was dan ook hoger bij een hogere fosfaattoestand. Het onthouden van enige vorm van fosfaatmesting leidde direct tot resultaat: het fosforgehalte in het bodemvocht daalde drastisch. Op 75 cm diepte waren de waarden gelijk of lager dan de aantoonbaarheidsgrens en konden dus geen verschillen worden vastgesteld.

Bovendien werd er in 2006 een stelsel van gebruiksnormen geïmplementeerd, waarbij een maximum gesteld werd aan de hoeveelheid meststoffen die op landbouwgrond gebruikt mocht worden. In 2008 gold een fosfaatgebruiksnorm van 85 kg  $P_2O_5$  per hectare, welke in de tijd aangescherpt werd. Invoering van dit stelsel van gebruiksnormen heeft in de praktijk zorg opgeroepen over een mogelijke teruggang in de opbrengst en kwaliteit van landbouwgewassen. Daarom rapporteerden Ehlert et al. (2008) ook over de gewasopbrengsten. Zij concludeerden dat een lage fosfaattoestand in combinatie met het onthouden van een fosfaatgift leidde tot het achterblijven van de gewasopbrengst. Voor de andere fosfaattoestanden bestond nog geen helder beeld.

In 2010 zijn de fosfaatgebruiksnormen afhankelijk gesteld van de fosfaattoestand van de bodem. Het doel hiervan was om te komen tot een fosfaat evenwichtsbemesting om de nadelige milieueffecten van fosfaatuitspoeling door hoge giften of hoge fosfaattoestanden te beperken. Er ontstond discussie over de hoeveelheid fosfaat die nodig is om het Pw-getal op een gewenst niveau te handhaven en of daarbij een fosfaattoeslag nodig zou zijn. Van Wijk et al. (2013) beoogden op basis van deze proef in Lelystad antwoorden te geven op de risico's die ontstaan bij een evenwichtsbemesting op de opbrengst en kwaliteit van landbouwgewassen, het risico op uitspoeling en de verdeling over de bodemfosfaatfracties. Zij stelden vast dat bij een neutrale fosfaattoestand en een fosfaatgift gericht op evenwichtsbemesting (70 kg  $P_2O_5$ , 5 kg boven de norm) er geen opbrengstverschil was in vergelijking met hogere fosfaattoestanden en -giften. Het Pw-getal in het bodemprofiel nam wel iets toe, het risico op fosfaatuitspoeling werd niet verhoogd. Daarnaast stelden zij vast dat het onthouden van een fosfaatbemesting op deze vruchtbare grond in Lelystad bij een neutrale fosfaat toestand (Pw-getal 30-53) niet direct leidde tot een opbrengstdaling, en dat een fosfaatgebruiksnorm richting evenwichtsbemesting dus niet zal resulteren in een daling van opbrengsten. Bij het onthouden van een fosfaatbemesting vanaf het begin van de proef werd alsnog fosfaat gemeten in het bodemvocht, al was deze lager dan bij fosfaatbemesting. Dit werd als aanwijzing gezien dat fosfaat uit de bodem aan het bodemvocht kon worden nageleverd.

Er bestond nog altijd onzekerheid over de hoogte van het fosfaatoverschot dat nodig is om de fosfaattoestand op niveau te houden (Schröder & Corré, 2000). Ehlert et al. (2018) gebruikten onder andere deze proef om de benodigde hoogte van het fosfaatoverschot met een grotere nauwkeurigheid vast te kunnen stellen. Op bouwland werden aanwijzingen gevonden dat evenwichtsbemesting leidde tot lagere waarden voor de intensiteit waarmee de bodem fosfaat aan het gewas levert. Evenwichtsbemesting leidde dus op termijn tot een andere verdeling tussen bodemfosfaatfracties en de mate waarin de bodem in staat is om direct fosfaat aan het gewas te leveren.

---

Indicatieve waarden voor benodigde fosfaatoverschot voor het in stand houden van het Pw-getal of P-Al getal op bouwland bij lage fosfaattoestanden zijn 10-20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per hectare per jaar en bij toestand neutraal ~30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per hectare per jaar (Ehlert et al., 2018).

Tot en met 2020 werd de fosfaattoestand en daarmee de gebruiksnorm bepaald aan de hand van het Pw-getal. Vanaf 2021 werd dit vervangen door een stelsel op basis van een gecombineerde indicator: het P-Al getal en het P-CaCl<sub>2</sub>-getal. Regelink et al. (2021) onderzochten, mede op basis van deze proef, de effecten van deze overgang op de waardering van de fosfaattoestand, hoe de fosfaattoestand in de tijd verandert onder invloed van de hoogte van de fosfaatgift en hoe de fosfaattoestand op basis van de gecombineerde indicator zich verhoudt tot de gewasreactie. Zij stellen voor de fosfaatproef in Lelystad vast dat de jaarlijkse gift van 70 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> leidde tot een neutrale fosfaattoestand gebaseerd op de classificatie op basis van het Pw-getal. Bij een overgang naar de gecombineerde indicator ontstaat een verschuiving van de classificatie waardoor de fosfaatgebruiksnorm toeneemt. In de praktijk heeft dit invloed op de hoogte van de mestgiften. Vanuit landbouwkundig oogpunt is deze verschuiving naar een hogere fosfaatgebruiksnorm op deze gronden niet noodzakelijk.

Eind 2021 is het 7<sup>e</sup> Nederlandse Actieprogramma Nitraatrichtlijn (NAP) gepubliceerd, met als doel waterverontreiniging uit agrarische bronnen te verminderen en verdere verontreiniging te voorkomen. In het zevende NAP zijn de gedifferentieerde fosfaatgebruiksnormen op basis van de gecombineerde indicator opgenomen. Deze normen zijn gericht op het beperken van verliezen. In deze vastgestelde fosfaatgebruiksnorm is een onvermijdelijk verlies van maximaal 5 kg fosfaat per hectare verrekend. Een onvermijdbaar verlies is hierbij gedefinieerd als de hoeveelheid fosfaat die boven de gewasonttrekking aangevoerd dient te worden om de fosfaattoestand te handhaven. Het verlies kan bestaan uit uitspoeling maar ook uit vastlegging van fosfaat in slecht-beschikbare fracties. Meer inzicht in het onvermijdbare verlies is gewenst teneinde gebruiksnormen vast te stellen waarbij de fosfaattoestand in klasse neutraal gehandhaafd blijft.

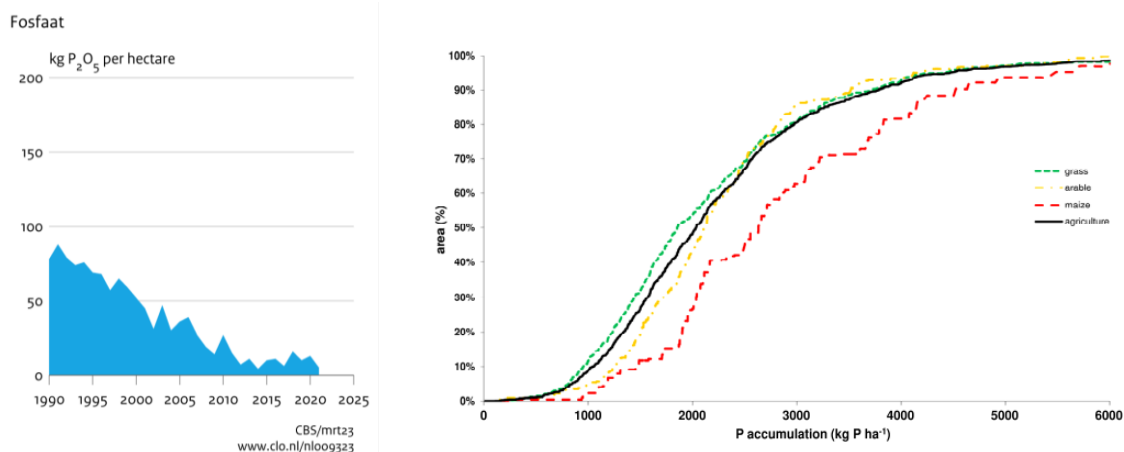
Daarnaast is er steeds meer aandacht voor bodem organische stof, en zijn er in het kader van de klimaatopgave maatregelen opgenomen om koolstof vast te leggen in landbouwgronden. Het is nog onbekend wat het effect van een evenwichtsbemesting of het onthouden van een bemesting is op het bodem organisch stofgehalte.

De fosfaatproef in Lelystad is een fosfaattoestanden-hoeveelheden proef. Bij aanvang van de proef zijn vier verschillende fosfaattoestanden gecreëerd (P1, P2, P3, P4). Vanaf 1990 bestaan de behandelingen uit een jaarlijkse fosfaatgiften van 0, 70, 140 en 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Aanvullend zijn er in 2005 extra uitmijnbehandelingen toegevoegd bij P2, P3 en P4 door de eerdergenoemde veldjes te splitsen. Dit maakt het mogelijk om het proces van uitmijnen te volgen bij vier verschillende initiële fosfaattoestanden. Door de proefopzet is er een verstrengeling tussen de hoogte van de fosfaatgift en de hoogte van de fosfaattoestand in de bodem; hierdoor is de proef minder geschikt om bemestingseffecten op gewasopbrengsten af te leiden. De proef is primair bedoeld om lange termijn trends in het verloop van fosfaatbodemindicatoren vast te stellen bij verschillende vormen van fosfaatmanagement.

## 1.2 Achtergrond fosfaatgiften in de proef

De fosfaatgift van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> komt overeen met de huidige fosfaatgebruiksnorm voor bouwlandgronden met een neutrale toestand. Ook komt deze gift bijna overeen met fosfaatevenwichtsbemesting. De fosfaatgiften bij objecten P3 van 140 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> komt qua orde-grootte overeen met de fosfaatgebruiksnorm voor gronden met fosfaattoestand arm. Een verschil is echter dat in de proef hoge fosfaatgiften corresponderen met hoge fosfaattoestanden van de bodem wat het tegenovergestelde is van de praktijk. De fosfaatgift bij object P4 van 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> is niet meer praktijkrelevant maar typeert wel de fosfaatgiften in jaren '80 en '90. Toch is ook deze behandeling relevant omdat het cumulatieve fosfaatoverschot dat hierbij gedurende de proefperiode is opgebouwd (6000 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> in 2020) representatief is voor intensief bemeste landbouwgronden in Nederland. Uit eerdere onderzoeken blijkt er op Nederlandse landbouwgronden gemiddeld 4600 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> is geaccumuleerd als gevolg van menselijk behandelen. In 25% van het landbouwareaal bedraagt het cumulatieve fosfaatoverschot >6700 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (Schoumans, 2015). De huidige range aan cumulatieve fosfaatoverschot op deze bouwlandproef valt daarmee binnen het bereik van de cumulatieve fosfaatoverschotten op Nederlandse landbouwgronden.





**Figuur 1-1** Het gemiddeld fosfaatoverschot (bemesting minus afvoer) op landbouwgronden in Nederland sinds 1990 (links) en de berekende cumulatieve frequentieverdeling voor de hoeveelheid fosfaat geaccumuleerd in landbouwgronden in kg P ha<sup>-1</sup> (rechts; uit Schoumans et al., 2015)

### 1.3 Achtergrond beoordeling fosfaattoestand

Voor het beoordelen van de bodem fosfaattoestand zijn verschillende systemen beschikbaar. De fosfaattoestand op bouwlandgrond werd decennialang beoordeeld aan de hand van het Pw-getal. Het Pw-getal werd zowel gebruikt voor opstellen van landbouwkundige adviezen (streeftrajecten en bemestingsadviezen) en vanaf 2010 eveneens voor het vaststellen van de hoogte van de wettelijke fosfaatgebruiksnormen. Voor grasland werd P-Al gebruikt.

De analytische methode voor bepaling van het Pw-getal is ontwikkeld in de jaren '70. De Pw-methode bestaat uit een extractie van grond met water en een 1:70 v/v mengverhouding maar kent een unieke voorbehandeling bestaande uit een 24-uur durende incubatie van de gedroogde grond met een kleine hoeveelheid water. Tijdens de incubatie komt de microbiologische activiteit weer op gang en komt de bodem op evenwicht, maar dit maakt de methode tevens bewerkelijk.

Ook in het Handboek Bodem en Bemesting (HBB) wordt de klasseindeling bepaald aan de hand van het Pw-getal, het gaat hier om het bodemgerichte streeftoestand. Deze waarden zijn gebaseerd op basis van veeljarige proefvelden, de streeftoestand is vastgesteld op een niveau waarbij een nadelig opbrengsteffect niet meer optreedt. Een overzicht wordt weergegeven in Tabel 2.

In de jaren '90 kwam meer aandacht voor de P-CaCl<sub>2</sub> extractie als multi-element methode en daarmee een goedkoper alternatief voor de bestaande element-specifieke extracties. Het P-CaCl<sub>2</sub>-getal en het Pw-getal correleren sterk met elkaar maar met een zekere bandbreedte. In het kader van de fosfaatadviezen wordt het P-CaCl<sub>2</sub>-getal beschouwd als indicator voor de direct beschikbaar fosfaat en gebruikt in combinatie met het P-AL-getal waarbij de laatste gezien wordt als indicator voor de fosfaatvoorraad. Eerst deed deze nieuwe gecombineerde indicator zijn intrede als nieuwe indicator voor vaststelling van gewasgerichte fosfaatbemestingsadviezen. Sinds 2021 heeft de gecombineerde indicator tevens het Pw-getal vervangen in de wettelijke bepaling van de fosfaatstand voor de afleiding van de fosfaatgebruiksnorm (zie Tabel 3). De overgang van het Pw-getal naar de gecombineerde indicator voor beoordeling van de fosfaattoestand op bouwlandgronden leidt op perceelsniveau tot verschuivingen (Regelink et al., 2021).

Wanneer fosfaatklassen worden vermeld in dit rapport wordt daarbij aangegeven of het gaat om de waardering op basis van het Pw-getal of op basis van de gecombineerde indicator. Bij het Pw-getal gaat het om de klassen zoals opgenomen in het HBB (zie Tabel 2). Ook het streeftraject is op basis van het Pw-getal en verwijst naar het HBB. Bij de gecombineerde indicator gaat het om de klassen zoals vastgelegd in het gebruiksnormenstelsel van RVO (zie Tabel 3).

In meer wetenschappelijke context wordt de fosfaatverzadigingsgraad, bepaald als de verhouding tussen fosfaat en het ijzer- en aluminiumgehalte van de bodem, gezien als maat voor de voorraad aan fosfaat. De fosfaatverzadigingsgraad is tevens een goede maat voor het risico op uitspoeling van fosfaat. De fosfaatverzadigingsgraad is echter nog geen standaardmethode bij landbouwkundig grondonderzoek maar resultaten worden wel besproken voor de bouwlandproef.

De huidige fosfaatbestedingsadviezen en landbouwkundige streeftrajecten zijn gebaseerd op onderzoek waaraan veldproeven uit de jaren 1960-1980 ten grondslag ligt. Het is echter nog immer zeer relevant om fosfaatonderzoek in veldproeven uit te voeren omdat er o.a. veranderingen zijn opgetreden in rassen van landbouwgewassen (hogere opbrengsten), er nieuwe fosfaatindicatoren zijn gekomen en omdat de fosfaattoestand van landbouwgronden in de afgelopen 50 jaar fors is gestegen. De bouwlandproef in Lelystad levert daarmee, samen met de andere langlopende veldproeven in Marknesse en Wijster, een unieke dataset waarin bijvoorbeeld de nieuwe gecombineerde indicator reeds langdurig gemonitord wordt.

**Tabel 1** Indeling van de fosfaattoestand op basis van het Pw-getal en bijbehorende gebruiksnorm, zoals geldend in 2020.

Waardering	Pw-getal	Norm
Arm	<25	120
Laag	25-35	80
Neutraal	36-45	70
Ruim voldoende	46-55	60
Hoog	>55	40

**Tabel 2** Waardering van de fosfaattoestand van de bodem op basis van het Pw-getal uit het Handboek Bodem en Bemesting.

Waardering	Pw-getal
Zeer laag	<11
Laag	11-20
Voldoende	21-30
Ruim voldoende	31-45
Vrij hoog	46-60
Hoog	>60
Streefstoestand	
Grondsoort	Streefgetal
Zeeklei, zeezand	25
Dekzand, dalgrond, rivierklei, löss	30
Toestand handhaven	
	25-45
	30-45

**Tabel 3** Indeling van de fosfaattoestand op basis van de gecombineerde indicator, geldend in 2023. Bij een fosfaatklasse 'arm' hoort een gebruiksruimte van 120kg, bij 'laag' van 80kg, bij 'neutraal' van 70 kg, bij 'ruim' van 60kg en bij 'hoog' van 40kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>.

P-CaCl <sub>2</sub>	P-Al <21	P-Al 21 t/m 30	P-Al 31 t/m 45	P-Al 46 t/m 55	P-Al > 55
< 0,8	Arm	Arm	Arm	Laag	Laag
0,8 t/m 1,4	Arm	Arm	Arm	Laag	Neutraal
1,5 t/m 2,4	Arm	Arm	Laag	Neutraal	Ruim
2,5 t/m 3,4	Arm	Laag	Neutraal	Ruim	Hoog
> 3,4	Laag	Laag	Neutraal	Ruim	Hoog

## 1.4 Kennisbehoefte

Met recente ontwikkelingen, zoals de overstap naar de gecombineerde indicator, ontstaan nieuwe vragen. Regelink et al. (2021) beschreven de veranderingen in de fosfaattoestand in de bouwvoor tot en met 2019, en gaven het effect op de gewasopbrengsten weer. De trend in de fosfaattoestand van de verschillende fosfaat fracties, en de trend in gewasopbrengsten zijn nog niet uitvoerig onderzocht. De fosfaattoestand onder de bouwvoor is minstens zo belangrijk, maar al sinds 2011 niet meer gerapporteerd. De relatie tussen het fosfaatoverschot en de fosfaattoestand met het Pw-getal is beschreven tot 2016 (Ehlert et al., 2018). De verandering van P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al in relatie tot het fosfaatoverschot zijn nog niet gerapporteerd. Tevens bestaan er vragen rond het effect van uitmijnen op het bodem organisch stofgehalte. Deze proef leent zich tot het beantwoorden van deze vragen, specifiek voor deze locatie.

Uitgesplitst geeft dit rapport antwoord op de volgende onderzoeksvragen:

*Fosfaatbemestingsniveaus*

1. Wat is het effect van verschillende fosfaatbemestingsniveaus en bodem fosfaattoestanden op de gewasopbrengst en -eigenschappen?
2. In hoeverre wordt de gewasopbrengst bepaald door de fosfaattoestand en in hoeverre door de -gift?
3. Wat is het effect van verschillende fosfaatbemestingsniveaus op de fosfaattoestand van de bodem?
4. Waar stabiliseert de fosfaattoestand bij verschillende bemestingsniveaus?
5. Wat is het effect van de verschillende fosfaatbemestingsniveaus op de verdeling van bodemfosfaat over verschillende fosfaatfracties?
6. Wat is het effect van verschillende bemestingsniveaus op fosfaatverliezen?
7. Wat is het effect van verschillende bemestingsniveaus op de bodem organische stof?

*Onthouden van fosfaatbemesting*

1. Wat is het effect van het onthouden van een fosfaatbemesting op de gewasopbrengst en -kwaliteit?
2. In hoeverre wordt het effect van het onthouden van een fosfaatbemesting op de gewasopbrengst bepaald door de fosfaattoestand?
3. Hoe verandert de fosfaattoestand bij het onthouden van een fosfaatbemesting?
4. Wat is het effect van het onthouden van een fosfaatbemesting op de verdeling van bodemfosfaat over verschillende fosfaatfracties?
5. Wat is het effect van het onthouden van fosfaatbemesting op de bodem organische stof?

Dit rapport geeft de resultaten van het onderzoek op het lange termijn experiment te Lelystad in de periode 2005-2020 weer. Dit rapport is een vervolg en uitbreiding op de resultaten van de periode 1990-2001 zoals beschreven door Ehlert et al. (2003), van 1986-2007 door Ehlert et al. (2008), van 2002-2011 door van Wijk et al. (2013), van 2001-2016 door Ehlert et al. (2018), en van 2005-2019 zoals beschreven door Regelink et al. (2021). Het doel van dit project is om de trends in fosfaatbodemindicatoren gerichter te beschrijven.

## 2 Proefopzet, uitvoering en metingen

### 2.1 Opzet

Het proefveld is gelegen te Lelystad. De bouwvoor van het perceel bestaat uit kalkrijke lichte zavel met 11% lutum, 4,7%  $\text{CaCO}_3$  en heeft een organisch stof percentage van 2,4%. Onder de bouwvoor op circa 50cm diepte ligt een ongeveer 10cm dikke laag kalkrijk, uiterst fijn zand met plaatselijk veel schelpen, daaronder bevindt zich kalkrijke lichte zavel (Ehlert et al., 2003). Het volumegewicht (gemeten in het najaar van 2020) was  $1,6 \text{ kg m}^{-3}$  in de laag 0-30cm.

Vanaf 1987 is de bemesting met tripelsuperfosfaat op vier niveaus gestart om het proefveld op te bouwen. De giften liepen uiteen van 70 tot 560  $\text{kg P}_2\text{O}_5$  per ha in 1987 en van 0 tot 300  $\text{kg P}_2\text{O}_5$  per ha in 1988 en 1989. Sinds 1990 worden jaarlijks dezelfde fosfaatgiften toegediend van 0 tot 280  $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . Er wordt enkel gebruik gemaakt van kunstmest, welke wordt gestrooid in het vroege voorjaar. Een overzicht van de objecten en bemesting staat weergegeven in Tabel 4.

De veldproef is opgezet als gewarde blokkenproef in vier herhalingen. De proefopzet is uitgebreid beschreven door Ehlert et al. (2003). Een overzicht van het proefveld (P1801) is opgenomen in Bijlage 1. In 2005 zijn de veldjes opgesplitst in een deel dat de fosfaatgiften continueert en een deel dat geen fosfaat meer ontvangt (uitmijnen). Bij het nulobject zijn de plots gesplitst in een deel waarop het onthouden van fosfaatbemesting is voortgezet en een deel dat sindsdien jaarlijks 70  $\text{kg P}_2\text{O}_5$  per ha ontvangt. Vanaf toen is de proef voortgezet als een split-plotproef.

Tot 2001 was er geen sprake van een vaste rotatie op het proefveld en zijn er diverse akkerbouw- en groetengewassen geteeld. Vanaf 2001 wordt een akkerbouwrotatie gehanteerd met daarin aardappelen, suikerbieten, zaaïuien en granen en soms andere gewassen. Een overzicht van de geteelde gewassen wordt gegeven in Tabel 6.

Na waterschade in aardappelen in 2005 is het proefveld in najaar 2006 opnieuw gedraineerd. Tussen de bestaande drains (afstand van 8m) werden zonder profielverstoring nieuwe drains gelegd.

**Tabel 4** Overzicht fosfaatobjecten en -giften.

Object	Behandeling (vanaf 2005)		Bemesting 1987-2020*	
			kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$
P1	P1-70	Bemest	-	70
P1	P1-0	Onbemest	0	0
P2	P2-70	Bemest	70	70
P2	P2-0	Onbemest	-	0
P3	P3-140	Bemest	140	140
P3	P3-0	Onbemest	-	0
P4	P4-280	Bemest	280	280
P4	P4-0	Onbemest	-	0

\* In enkele jaren week de bemestingsstrategie af. In 1996 werd er respectievelijk 130, 200 en 340  $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  bemest bij P2, P3 en P4. In 1999 en 2000 was dat 100, 200 en 300  $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ .

### 2.2 Meetprogramma

Jaarlijks is de bruto, netto en marktbaar gewasopbrengst bepaald van de geteelde gewassen bij alle behandelingen. Aanvullend is ook de opbrengst aan oogstresten bepaald (vier veldjes, enkel de eerste herhaling van de bemeste objecten). Van de gewasopbrengst en het loof zijn monsters genomen voor gehalten onderzoek op droge stof, kalium, magnesium, fosfor en N-totaal met name met het oog op de berekening van de fosfaatopname en fosfaatafvoer met het product. De bepaling van de fosfaatafvoer wordt nader toegelicht in Bijlage 2. De bodem is jaarlijks bemonsterd in de lagen 0-30 cm en 30-60 cm ter bepaling op P- $\text{CaCl}_2$ <sup>1</sup>, Pw-getal, P-Al en P-totaal. P- $\text{CaCl}_2$ , het Pw-getal en P-Al zijn bepaald door Eurofins Agro (voorheen Blgg) d.m.v. klassieke, chemische methodes, deze zijn beschreven door Ehlert e.a. (2003). P-totaal is klassiek bepaald tot en met 2016,

<sup>1</sup> Deze parameter wordt door Eurofins Agro P-PAE (Phosphorus Plant Available Element) genoemd.

en met NIRS bepaald vanaf 2017 (Eurofins Agro). Nadien is Eurofins Agro gestopt met het aanbieden van de P-totaal metingen op grond. P-totaal bepalingen op basis van NIRS zijn nog wel uitgevoerd, maar niet opgenomen in dit rapport. Sinds 2020 wordt het weer klassiek bepaald (destructie met H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Se), de analyse is uitgevoerd door het Chemisch Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB), onderdeel van WUR. In dit rapport is enkel de klassiek bepaalde P-totaal opgenomen. Figuur 2-1 geeft de samenhang aan tussen de verschillende methoden van grondonderzoek en bodemvocht.

Bovendien is het bodemprofiel in 2009 en 2018 op verschillende dieptes bemonsterd: op 0-20, 20-30, 30-40, 40-50 en 50-60cm in 2009 en op 0-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-80 en 80-100 cm in 2018. De resultaten van P-CaCl<sub>2</sub>, Pw-getal, P-Al en P-totaal worden in dit rapport beschreven. De analyses zijn allen uitgevoerd door het CBLB. Voor P-totaal is een destructie met H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Se uitgevoerd.

In 2018 is aanvullend de P-ox bepaald. P-ox is een maat voor het fosfaat gebonden aan ijzer- en aluminiumoxiden en dit fosfaat kan door desorptie weer beschikbaar komen voor gewasopname. Een bodem met een hoog aandeel ijzer- en aluminiumoxiden kan meer fosfaat binden. P-ox wordt gebruikt om de fosfaatverzadigingsgraad te bepalen. De fosfaatverzadigingsgraad geeft inzicht in de fosfaatbuffering en mogelijke fosfaatuitspoeling. Bij een fosfaatverzadigde bodem is een hogere uitspoeling te verwachten. De fosfaatverzadigingsgraad wordt als volgt bepaald:

$$\text{Fosfaatverzadigingsgraad (\%)} = P_{ox} / (0.5 * (Fe_{ox} + Al_{ox})) * 100\%$$

Daarnaast zijn er metingen gedaan aan fosfaat in het bodemvocht. Metingen zijn uitgevoerd gedurende enkele winterseizoenen, zie Tabel 5. Bodemvocht is bepaald met cups op 35 en 75cm diepte voor de objecten P1-0, P2-70, P3-140, P4-0 en P4-280. Monsters zijn koel bewaard tot moment van analyse en niet aangezuurd. De bodemvochtmonsters zijn binnen 24 uur na bemonstering geanalyseerd door het CBLB op P-PO<sub>4</sub> (SFA) en DOC (SFA) en P (ICP-OES). Het verschil tussen P en P-PO<sub>4</sub> wordt aangeduid als MUP (Molybdenum unreactive P) en bestaat uit organisch- en colloïdaal P. Uit eerdere analyse bleek dat het fosfaat in bodemvocht nagenoeg volledig in de vorm van ortho-fosfaat aanwezig was (Ehlert et al., 2018). De aantoonbaarheidsgrens voor P-totaal is 0,1 mg/l en voor ortho-P 0,02 mg/l. Omdat de meetwaarden voor P-totaal geregeld onder de aantoonbaarheidsgrens vielen, en het gemeten fosfaat bijna volledig uit ortho-P bestaat, is enkel deze fractie meegenomen in de analyse. Om te voldoen aan milieucriteria mag de concentratie ortho-P op het niveau van de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) niet hoger zijn dan 0,10 mg/l (TCB, 1990). De GHG op de percelen te Lelystad varieert van 50 tot 90 cm, afhankelijk van het meetpunt (bron: <https://bodemdata.nl>).

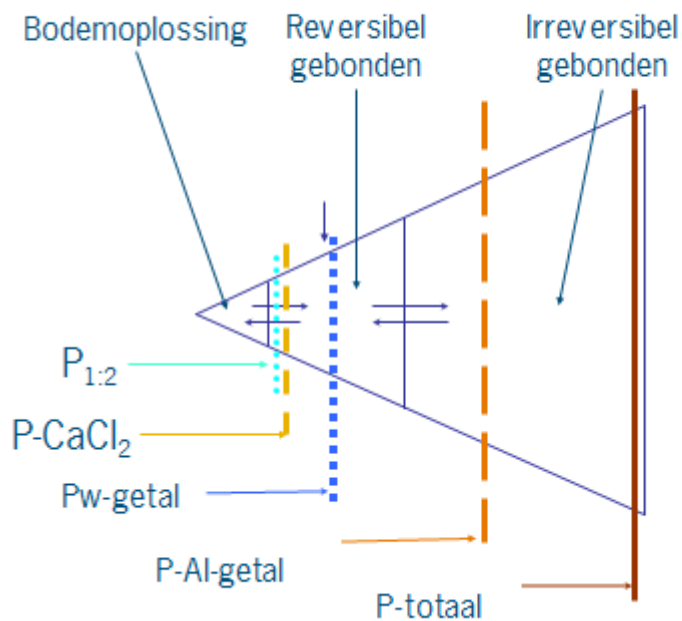
**Tabel 5** Overzicht meetmomenten bodemvocht.

Winter	Aantal meetmomenten	Meetperiode
2006/2007	7	14-11-2006 tot 27-02-2007
2008/2009	4	19-10-2008 tot 26-02-2009
2009/2010	3	25-11-2009 tot 10-03-2010
2010/2011	2	12-01-2011 en 08-03-2011
2019/2020	1	03-03-2020
2021/2022	1	23-02-2022

Aanvullend zijn er metingen verricht aan de bodemorganische stof (kwantiteit en kwaliteit). Het organisch stofgehalte is klassiek (gloeiverlies) bepaald in 2008 en 2017-2020. Daarnaast zijn in 2020 de HWC, POXC, C-Kurmies en DOC bepaald. Met de HWC wordt de makkelijk in heet wateroplosbare koolstof gemeten, met de POXC de makkelijk oxideerbare koolstof en met DOC de kleinste koolstofdeeltjes. Alle drie de metingen zijn een maat voor de activiteit van het bodemleven. HWC, POXC en DOC worden gezien als 'early-indicators', waarin het effect van bodemmaatregelen op bodem organische koolstof eerder tot uiting komen dan bij bulkmetingen. Een uitgebreidere omschrijving van deze meetmethodes met referenties wordt gegeven in de Haan et al. (2021).



## Fosfaatfracties en bepalingmethoden



**Figuur 2-1** Schematisch overzicht van de fosfaatfracties in de bodem en de belangrijkste analysemethoden waarmee de fosfaathoeveelheid in deze fracties in Nederland wordt bepaald (van Wijk et al., 2013).

## 2.3 Data-analyse

De resultaten zijn statistisch geanalyseerd met het softwarepakket Genstat. Om te toetsen of verschillen in opbrengsten tussen de objecten statistisch significant zijn, is een variantieanalyse uitgevoerd en een tweezijdige t-toets. Gezien de opzet sinds 2005 is de proef daarbij verwerkt als een split-plotproef. De kleinste significante verschillen (LSD-waarden) worden gegeven bij onbetrouwbaarheid  $\leq 0,05$ .

De verandering van de fosfaattoestand (zowel van het Pw-getal, P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al) in de tijd is beschreven met een exponentiële curve:

$$y = a + b \cdot e^{-c \cdot t}$$

Waarbij a, b en c parameters zijn, en t is tijd in jaren. Hiervoor zijn twee benaderingen gekozen. Bij de eerste benadering is het jaar 1990 op 0 gesteld. Om ook de uitmijneveldjes te analyseren is bij de tweede benadering het jaar 2005 is op 0 gesteld.

# 3 Resultaten

## 3.1 Gewasopbrengsten

In Tabel 6 zijn de gemiddelde relatieve opbrengsten gegeven van de gewassen die vanaf 2005 zijn geteeld. Daarbij is de opbrengst van fosfaattoestand P2 met een jaarlijkse bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> op 100 gesteld. De relatieve gemiddelde opbrengsten over de periode 2006-2020 staan onderaan de tabel vermeld, om de objecten te kunnen vergelijken over de gewassen heen. Bovendien is het relatieve gemiddelde van de periode 1990-2005 gepresenteerd. De werkelijke jaarlijkse opbrengsten over periode 1990-2001 zijn gerapporteerd door Ehlert et al. (2003; 2008), de werkelijke jaarlijkse opbrengsten over de periode 2001-2005 zijn gerapporteerd door van Wijk et al. (2013), en de werkelijke opbrengsten over de periode 2005-2020 worden gepresenteerd in Bijlage 3.

**Tabel 6** Jaarlijkse relatieve opbrengsten van de gewassen geteeld in 2005-2020 voor de fosfaattoestanden P1 t/m P4 voor de veeljarige veldproef P1801 te Lelystad. Dikgedrukt is weergegeven welke opbrengst statistisch verschilt van P2-bemest, indien de opbrengst bij onbemest is onderstreept verschilt deze significant van het bemeste object. Dit effect wordt mede beïnvloed door ontstane verschillen in bodemgehalten aan fosfaat. Ter indicatie zijn de gemiddelde bodemfosfaattoestanden opgenomen onderin de tabel.

Jaar	P-object >	P1		P2*		P3		P4		LSD**		Opbrengst	fosfaat behoefte
	gift kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	0	70	0	70	0	140	0	280	effect obj.	effect P-gift binnen P-obj.	P2-70 (t/ha)	gewas-groep***
	gewas												
2005	Aardappel****	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	28	1
2006	Suikerbiet	98	<b>92</b>	97	100	99	99	97	99	7,3	9,4	91	2
2007	Wintertarwe	<b>80</b>	<b>84</b>	<b>86</b>	100	<b>86</b>	<b>89</b>	<b>86</b>	<b>86</b>	6,0	5,6	11	4
2008	Zaaiui	<b>94</b>	98	100	100	100	101	103	101	4,6	5,7	92	1
2009	Peen	98	97	100	100	101	102	102	99	5,3	5,0	128	3
2010	Aardappel	<b>90</b>	96	<b>93</b>	100	<u>98</u>	106	<b>109</b>	<b>112</b>	9,4	7,1	69	1
2011	Suikerbiet	93	101	92	100	98	100	101	103	13,8	17,6	91	2
2012	Zomergerst	99	101	99	100	99	101	100	102	4,0	3,9	8,0	3
2013	Zaaiui	<b>69</b>	87	<b>83</b>	100	92	97	97	95	14,4	16,2	44	1
2014	Wintertarwe	100	98	99	100	99	98	99	<b>96</b>	4,0	4,4	8,5	4
2015	Aardappel	<b>67</b>	93	<b>77</b>	100	<b>88</b>	98	100	100	11,2	11,8	62	1
2016	Suikerbiet	101	105	101	100	105	103	102	<b>109</b>	7,1	8,8	100	2
2017	Zaaiui	<b>78</b>	98	<b>95</b>	100	98	101	100	98	4,4	5,5	94	1
2018	Wintertarwe	<b>95</b>	99	101	100	101	103	101	102	4,2	5,3	11	4
2019	Aardappel	<b>81</b>	96	<b>82</b>	100	98	102	101	106	9,8	11,3	69	1
2020	Suikerbiet	<b>83</b>	95	99	100	90	96	103	99	10,4	11,3	118	2
Gem.	2006-2020	<b>88</b>	<b>96</b>	<b>94</b>	100	<b>97</b>	100	100	101	2,8	2,3		
Gem. fosfaattoestand van de bodem voor elk object (2006-2020)													
	Pw-getal	17	25	28	40	43	68	69	113				
	P-CaCl <sub>2</sub>	0,4	0,6	0,8	1,2	1,3	2,7	2,7	6,3				
	P-AL	22	27	30	37	42	54	59	85				

\* De opbrengst van object P2 met 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jaar bemesting is steeds op 100 gesteld omdat de fosfaattoestand van dit object neutraal is (36 > Pw-getal > 55.)

\*\* De eerste LSD-waarde geldt voor de vergelijking van alle objecten onderling en de tweede alleen voor de vergelijking binnen hetzelfde P-object.

\*\*\* Indeling in gewasgroepen naar fosfaatbehoefte volgens Handboek Bodem en Bemesting ([www.handboekbodemenbemesting.nl](http://www.handboekbodemenbemesting.nl)): gewasgroep 0 = zeer fosfaatbehoefte gewassen; 4 = zeer weinig fosfaatbehoefte gewassen. Wat de aardappel betreft zijn er in deze proef enkel consumptieaardappelen geteeld, en geen pootgoed.

\*\*\*\* Door wateroverlast waren de aardappelopbrengsten in 2005 laag en was de veldvariatie relatief groot in de proef. Deze zijn in de gemiddelden over jaren heen buiten beschouwing gelaten.

---

In vergelijking met de standaard (P2-bemest) blijft de gemiddelde opbrengst significant achter bij de onbemeste objecten P1 en P2 voor de meest fosfaatbehoefte gewassen (zaaiui en aardappel). Ook bij de wintertarwe bleek dat bij een aantal jaar dat de opbrengsten bij P1 (bemest en onbemest) en P2 (onbemest) significant lager waren dan bij de standaard (P2-bemest), voor enkele jaren gold bovendien ook dat er bij P3 en P4 lagere opbrengsten werden gevonden.

In de periode 2006-2011 was het verschil tussen de bemeste en onbemeste veldjes enkel bij P1 significant (van Wijk et al., 2013). In de periode 2006-2020 blijft de gemiddelde opbrengst van de onbemeste veldjes achter bij vrijwel alle objecten, enkel bij P4 is het verschil tussen bemest en onbemest niet significant. Het verschil tussen bemest en onbemest was groter bij de objecten met de lagere fosfaattoestanden (P1 en P2) dan bij de objecten met hogere fosfaattoestanden (P3). Het effect van langdurig uitmijnen op de gewasopbrengsten lijkt inmiddels op te treden. Het verschil is echter niet voor alle gewasgroepen significant. Het verschil in opbrengsten tussen wel of niet bemesten was enkel significant voor fosfaatbehoefte gewassen (zaaiui en aardappel) en de relatief lage fosfaattoestanden, dit gold voornamelijk vanaf 2013. Bij een Pw-getal > 39 leidde wel of niet bemesten niet tot een significant verschil in opbrengsten. Omdat uitmijnen leidde tot een daling van de fosfaattoestand, is een vergelijking tussen wel of niet bemesten op de gewasopbrengst op basis van Tabel 6 niet vast te stellen, dit wordt nader toegelicht in paragraaf 3.8.

#### *Gewasreactie van aardappel in de periode 2005-2020*

In 2005, 2010, 2015 en 2019 zijn aardappels geteeld. In 2005 hadden de aardappelen sterk te lijden van wateroverlast met lage opbrengsten en een grote veldvariatie tot gevolg. De resultaten van dit jaar zijn als niet representatief beschouwd en blijven daarom buiten beschouwing. In 2010 werd bij de gewasbeoordeling zichtbaar dat het gewas bij de P1 objecten achterbleef, bij het onbemeste object was dit duidelijker zichtbaar dan bij het bemeste object. Bij de overige objecten werd geen duidelijk verschil waargenomen. In 2015 viel op dat het verschil tussen de bemeste en onbemeste objecten groter was dan in 2010 en 2019.

In elk jaar gaf een lage toestand zonder bemesting de laagste opbrengst en de hoge fosfaattoestand in combinatie met een hoge bemesting de hoogste opbrengst. Enkel P1-0 en P4-280 verschilde significant van P2-70. Zonder fosfaatbemesting was de opbrengst, gemiddeld over de jaren, hoger naarmate de fosfaattoestand hoger was (respectievelijk 53, 57, 64 en 69 ton ha<sup>-1</sup>), zie Figuur 3-1. Ook waren de opbrengsten hoger naarmate de bemesting toenam (respectievelijk 64, 67, 68, 71 ton ha<sup>-1</sup>). Gemiddeld genomen over de fosfaattoestanden heen gaf bemesting een opbrengststijging van 12%. Bij de fosfaattoestanden P1, P2 en P3 bedroeg het effect van bemesting respectievelijk 20%, 18% en 8%. Dit waren significante verschillen. Bij toestand P4 bedroeg het verschil slechts 3% (niet significant). Bij P3 zijn de verschillen tussen de jaren aanzienlijk en het gemiddelde wordt beïnvloed door de meting in 2015 toen de opbrengst op de onbemeste veldjes laag was. In de twee andere jaren is er geen duidelijk significant verschil in opbrengst bij P3 bemest en onbemest. Het verschil tussen wel of niet bemesten neemt dus af naarmate de fosfaattoestand hoger is. Hieruit valt af te leiden dat de maximale opbrengst kon worden behaald bij het object met een Pw-getal van rond de 40 en een gift van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha. Het is opvallend dat in elk jaar een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bij P1 een iets beter resultaat gaf vergeleken met fosfaattoestand P2 zonder een bemesting. De fosfaattoestand van de bodem was bij P1-70 vergelijkbaar met P2-0 (zie Figuur 3-6). Dit onderstreept de meerwaarde van een verse bemesting bij een fosfaattoestand bij Pw-getal 25-30.

#### *Gewasreactie van zaaiui in de periode 2005-2020*

In 2008, 2013 en 2017 zijn er zaaiuien geteeld. In 2008 hadden de uien bij object P1 een duidelijke groeiachterstand, dit trok enigszins bij richting het eind van het groeiseizoen. De opbrengst van P1-onbemest viel significant lager uit dan bij de standaard (P2-bemest). In vergelijking met de standaard (P2-bemest) was het verschil met de andere objecten (zowel bemest als onbemest) beperkt. In 2013 valt op dat de opbrengst bij de standaard (P2-bemest) hoger is dan bij alle andere objecten (zowel bemest als onbemest). Echter alleen het verschil met de onbemeste objecten van P1 en P2 was statistisch significant. In 2017 reageerde de zaaiui visueel sterk op aangelegde behandelingen: hoe hoger de fosfaatgift en fosfaattoestand, hoe beter het gewas erbij stond, maar ook hoe eerder het loof ging strijken. Bij de oogst werden enkel bij P1-onbemest en P2-onbemest significante verschillen met de standaard vastgesteld. Onbemest gaf een lagere opbrengst dan bemest, behalve bij de hoogste fosfaattoestand.

Ook gemiddeld genomen over de jaren wordt dit zichtbaar (zie Figuur 3-1). Het verschil tussen onbemest en bemest was kleiner naarmate de fosfaattoestand hoger was (P1-P3). Gemiddeld genomen over de jaren werd de hoogste opbrengst gehaald bij een neutrale fosfaattoestand (P2) en een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (zie Figuur 3-1).

#### *Gewasreactie van suikerbieten in de periode 2005-2020*

In 2006, 2011, 2016 en 2020 zijn suikerbieten geteeld. In 2011, 2016 en 2020 werd bij de beoordeling van het gewas duidelijk dat P1 achterbleef in vergelijking met de andere objecten. Bij het onbemeste P1-object was dit duidelijker dan bij het bemeste P1-object. In 2011 liet de wortelopbrengst een stijgende tendens zien bij de hogere fosfaattoestanden, maar deze was niet significant. In 2016 viel op dat de wortelopbrengst bij de lage fosfaattoestand en -gift (P1 bemest en onbemest) niet lager was dan bij de standaard (P2-bemest). Bij P4-bemest

echter, was de opbrengst significant hoger dan bij de standaard. In 2020 verschilde de wortelopbrengst van de bemeste veldjes niet significant van elkaar. De opbrengst van P1-onbemest was wel significant lager dan bij de overige objecten (behalve in vergelijking met P3-onbemest).

Gemiddeld over de jaren was enkel de wortelopbrengst bij P4 (bemest en onbemest) hoger dan bij de standaard (P2-bemest), zie Figuur 3-1, maar het verschil was niet significant. Bij object P1-onbemest was de opbrengst significant lager dan bij de standaard (P2-bemest).

#### *Gewasreactie van peen in de periode 2005-2020*

Enkel in 2009 is er peen geteeld. In dat jaar werden grote verschillen waargenomen tussen de objecten. In juni hadden de plantjes bij de P1 objecten 2 blaadjes en waren de plantjes ongeveer 3cm hoog, bij object P4 hadden de plantjes 4 à 5 blaadjes en was de planthoogte ongeveer 10cm. Deze achterstand in gewasgroei kwam beperkt terug in de opbrengsten. De opbrengst van de P1 objecten waren niet significant lager dan bij de standaard (P2-bemest), ook waren de opbrengsten bij P4-bemest niet significant hoger dan bij P2-bemest. Opvallend is dat de opbrengsten van P4-onbemest lager waren dan bij de standaard, dit verschil was echter niet significant.

#### *Gewasreactie van zomergerst in de periode 2005-2020*

Enkel in 2012 werd er zomergerst geteeld. Tijdens de teelt zijn er geen verschillen waargenomen tussen de objecten. Ook in de opbrengst waren de verschillen tussen de objecten beperkt en geen van alle significant.

#### *Gewasreactie van wintertarwe in de periode 2005-2020*

In 2007, 2014 en 2018 is er wintertarwe geteeld. In 2007 was de korrelopbrengst bij P2-bemest significant hoger dan bij alle andere objecten. Ook tussen P2-bemest en P2-onbemest was het onderlinge verschil significant. Dit is opvallend, omdat uit eerder onderzoek bekend is dat wintertarwe niet of nauwelijks op een fosfaatbemesting reageert en omdat de hogere fosfaattoestanden een lagere opbrengst gaven. In 2014 waren de verschillen in opbrengst tussen de objecten beperkt, opvallend is dat enkel de opbrengst van P4-bemest significant lager was dan de standaard (P2-bemest). In 2018 bleef de gewasgroei van P1-onbemest achter, dit resulteerde in een significant lagere opbrengst. De opbrengsten van de overige objecten verschilden niet significant van elkaar.

In Figuur 3-1 wordt zichtbaar dat, gemiddeld over de jaren heen, de hoogste opbrengst werd bereikt bij de standaard (P2-bemest). Deze opbrengst was significant hoger dan bij een lagere fosfaattoestand en -gift (P1 en P2-onbemest), en zelfs in vergelijking met P4-bemest. Het verschil met P3 (bemest en onbemest) en P4-onbemest was niet significant verschillend van de opbrengst bij P2-bemest. Een hoge fosfaattoestand en/of -gift had geen positief effect op de opbrengst van wintertarwe en leek zelfs een negatief effect te hebben. De verschillen over de drie jaar gemiddeld zijn sterk beïnvloed door de resultaten van het jaar 2007. Wanneer alleen naar het gemiddelde van 2014 en 2018 wordt gekeken, zijn de verschillen tussen de objecten gering.

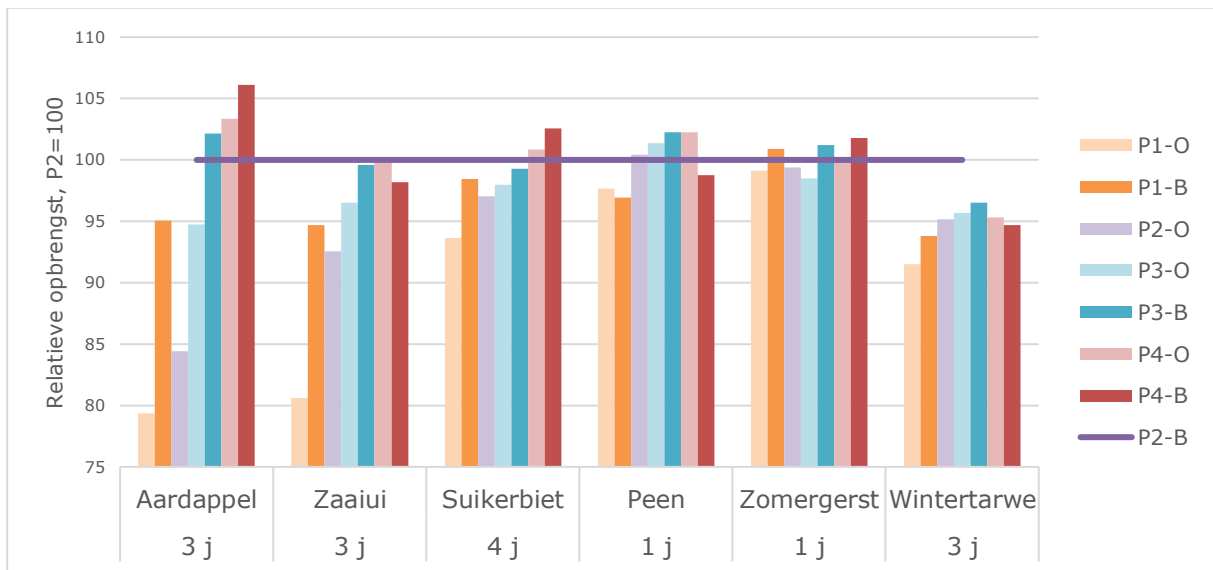
#### *Effect van bemesting op marktbaar opbrengst*

Het opbrengstverschil tussen bemest en niet bemest (uitmijnen) in de periode 2006-2020 fluctueert tussen de jaren en de gewassen. Voor gewasgroep 1 (aardappel en zaaiui) gold dat na enkele jaren de opbrengst significant hoger was bij bemesting dan zonder bemesting bij P1 en P2. Bij gewasgroep 2 (suikerbiet), gold dit alleen bij een lage fosfaattoestand (P1), en was dit alleen in 2020 statistisch significant. Bij gewasgroep 3 en 4 (peen, zomergerst en wintertarwe) was er nauwelijks verschil tussen wel of geen bemesting, ook niet bij P1.

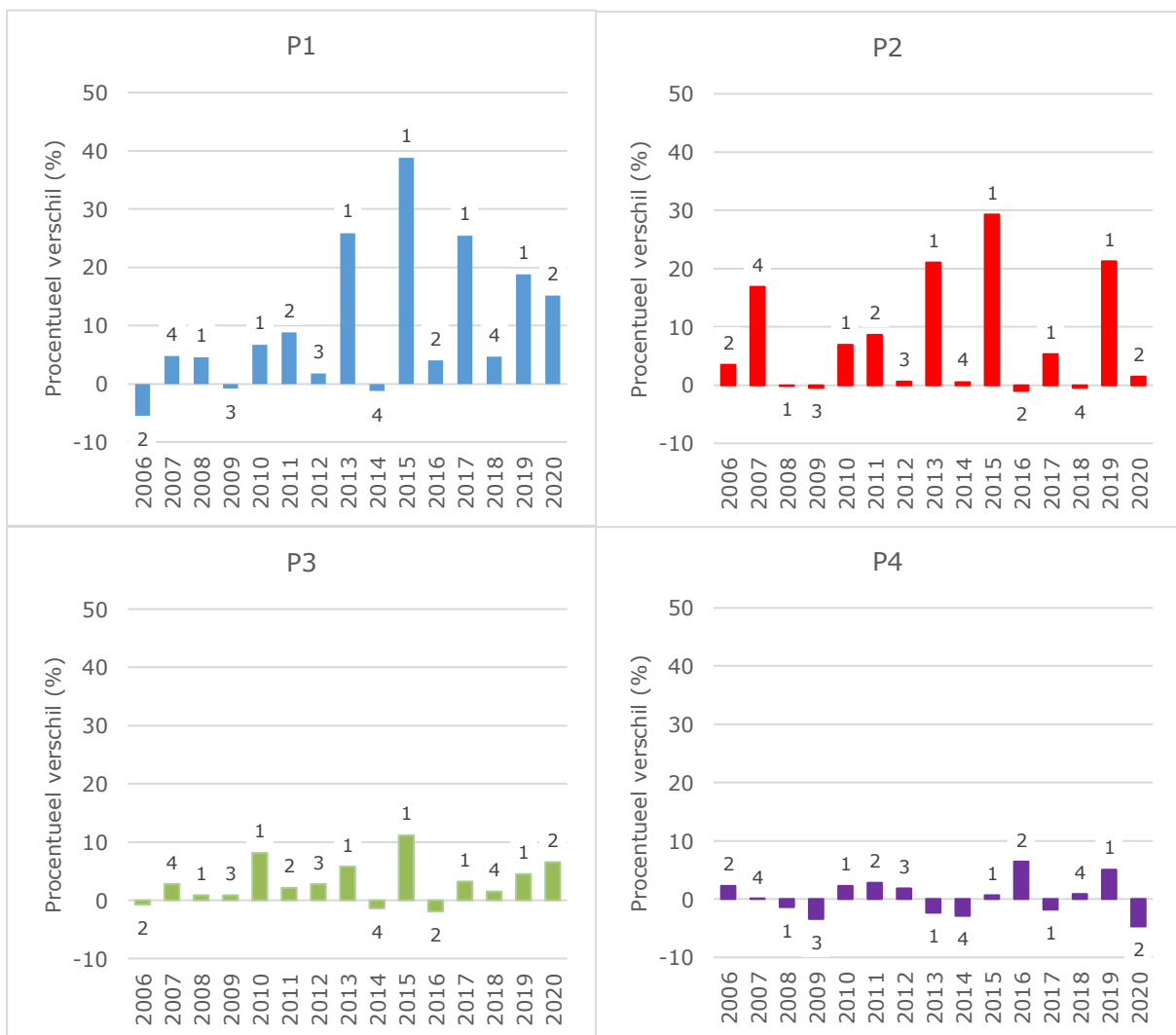
Gemiddeld genomen over de gewasgroepen en fosfaatobjecten nam het opbrengstverschil tussen bemest en niet bemest iets toe in de periode 2005-2020 (zie Figuur 3-2), dit werd met name bij P1 zichtbaar. Bij het effect van bemesting moet worden benadrukt dat het uitmijnen binnen de fosfaattoestanden P1 t/m P4 door de jaren heeft geleid tot verschillen in fosfaattoestand tussen de onbemeste (uitmijnen) en bemeste velden (zie Paragraaf 3.8), omdat bij uitmijnen de fosfaattoestand daalt. Het bemestingseffect is daarmee mede een toestandseffect.

#### *Effect van fosfaattoestand op de marktbaar opbrengst*

Zonder bemesting nam de opbrengst toe naarmate de fosfaatrap hoger was (behalve voor granen). Voor de bemeste veldjes is alleen een vergelijking mogelijk tussen P1 en P2. Bij P1 en P2 (beide bemest met 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) is het effect van de fosfaattoestand op de opbrengst te zien. Bij een lagere fosfaattoestand (P1; gemiddeld Pw-getal 25) was de opbrengst over alle gewassen gemiddeld significant lager dan bij een neutrale fosfaattoestand (P2; gemiddeld Pw-getal 40), zie Tabel 6 en Figuur 3-1.



**Figuur 3-1** Relatieve opbrengst per gewas in de periode 2006-2020, waarbij de relatieve opbrengst van object P2 met de bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> op 100 is gesteld. De bemeste objecten worden in een donkere kleur weergegeven en de onbemeste objecten in een lichte kleur.



**Figuur 3-2** Procentueel verschil tussen wel en niet bemesten, per object (P1-P4). De gewasgroepen worden met cijfers in het figuur aangegeven.



## 3.2 Productkwaliteit en sortering

De productkwaliteit is niet in alle jaren vastgesteld en in andere jaren was het veelal beperkt. Wel is naast opbrengst het droge-stofgehalte van de geoogste producten gemeten. Bij aardappelen, uien en peen is de sortering bepaald inclusief uitval (niet in alle jaren).

### *Effect fosfaattoestand en -bemesting op de kwaliteit van consumptieaardappels*

Van de aardappel is de tarra, de maatsortering en het knolaantal bijgehouden. De tarra betreft uitval van misvormde, rotte of groene knollen of knollen met groeischeuren. Wat betreft tarra lijkt er geen sprake te zijn van een effect van de fosfaatbemesting of -toestand op de tarra, al lijkt de tarra het laagst te zijn bij een lage tot neutrale fosfaattoestand met een standaard bemesting ( $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ ), zie Tabel 7. Wat betreft sortering is er onderscheid gemaakt in de categorieën  $<35$ ,  $35\text{-}55$  en  $>55\text{mm}$ . Opvallend is dat bij een hogere fosfaattoestand en -bemesting het aandeel opbrengst in de maat  $35\text{-}55\text{mm}$  lager is (zie Figuur 3-3 en Bijlage 4). Het aandeel aardappels in een grotere maat ( $>55\text{mm}$ ) neemt juist toe bij de fosfaattoestand en -bemesting. Deze effecten tussen de fosfaattoestand en -bemesting en de maatsortering hangen samen met het opbrengstniveau: een hogere fosfaatvoorziening levert meer opbrengst en daarmee een groter aandeel aardappels in een grote maatsortering. Naarmate de fosfaattoestand toeneemt, wordt het verschil in maatsortering tussen wel of niet bemesten minder groot. Wat betreft het knolaantal was er in 2010 geen significant effect van de fosfaatobjecten op het knolaantal. In 2015 evenmin, al was het knolaantal bij P1-onbemest wat lager dan bij de overige objecten. In 2019 was er wel een significant effect. Bij de twee laagste toestanden zonder fosfaatbemesting was het knolaantal significant lager dan bij de overige objecten. Verder was er in alle drie de jaren een tendens dat het knolaantal met fosfaatbemesting iets hoger was dan zonder fosfaatbemesting. Het verschil was alleen in 2019 significant. Er was in 2010 en 2015 geen significant effect van de fosfaatobjecten op het droge-stofgehalte van de knollen. In 2019 was er wel een significant effect, hoewel er geen duidelijk patroon in zat. Het droge-stofgehalte was het hoogst bij P2-onbemest en P3-bemest en het laagste bij P4-onbemest en P4-bemest.

### *Effect fosfaattoestand en -bemesting op de kwaliteit van suikerbiet*

Van de suikerbiet zijn het suikergehalte en de winbaarheid bekend van 2016 en 2020 (zie Tabel 7). Er was geen significant effect van de fosfaatvoorziening op het suikergehalte en de winbaarheid.

### *Effect fosfaattoestand en -bemesting op de kwaliteit van zaaiui*

Van zaaiui is het percentage uitval bekend van 2008, 2013 en 2017 (zie Tabel 7). Dit betreft uitval van rotte of kale uien en uien met watervellen, scheurknoten, vergroeiingen of dikke nekken. Het verschil tussen de jaren was groot. In 2008 lijkt het aandeel uitval hoger bij een hogere fosfaatvoorziening, in 2017 was dit omgekeerd. Op basis van deze cijfers lijkt er geen verband te zijn tussen de fosfaatvoorziening en de tarra. Daarnaast is de maatsortering bekend (zie Figuur 3-3 en Bijlage 4). Bij P1-onbemest viel een relatief groot aandeel van de uien in een kleinere maatsortering ( $<60 \text{ mm}$ ). Bij de onbemeste objecten is het aandeel aan relatief kleinere uien groter dan bij de bemeste objecten, al was dit verschil bij P3 en P4 erg klein.

### *Effect fosfaattoestand en -bemesting op de kwaliteit van peen*

Van de peen is het percentage uitval (kromme of vertakte peen) bekend van 2009 (zie Tabel 7). Op basis van deze cijfers lijkt er geen verband te zijn tussen de fosfaatvoorziening en de tarra. Daarnaast is de maatsortering bekend (zie Figuur 3-3 en Bijlage 4). De hoeveelheid kleine peen ( $<21 \text{ mm}$ ) was bij elk object vrijwel gelijk. De hoeveelheid peen in de grote maatsortering ( $>40 \text{ mm}$ ) was groter naarmate de fosfaattoestand en -bemesting toenam. Dit ging gedeeltelijk ten koste van de maat  $21\text{-}40 \text{ mm}$ . Bij P2-onbemest was de hoeveelheid peen in de gewenste maatsortering het grootst.

### *Effect fosfaattoestand en -bemesting op de kwaliteit van wintertarwe en zomergerst*

Van de wintertarwe is het vochtpercentage bekend van 2007, 2014 en 2018 (zie Tabel 7). Het vochtpercentage nam iets af naarmate de fosfaattoestand van de bodem hoger was. De fosfaatbemesting lijkt nauwelijks een effect te hebben op het vochtgehalte van de korrel. Ook voor de zomergerst, geteeld in 2012, leek er geen eenduidig effect te zijn van de fosfaatbemesting en -toestand op het vochtpercentage.

**Tabel 7** Kwaliteits- en overige aspecten van de gewassen geteeld in de periode 2006-2020.

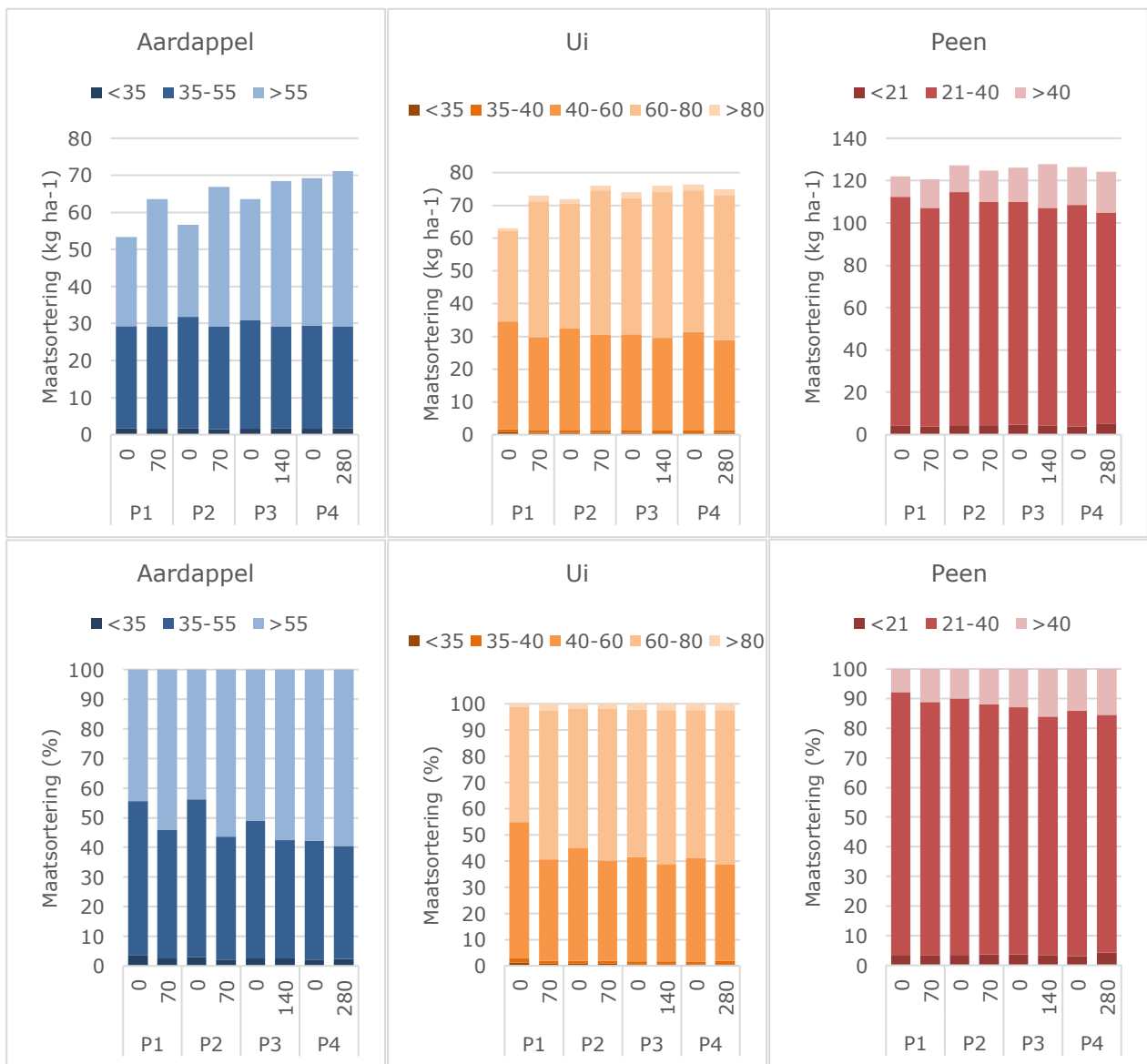
Jaar	Gewas	Kwaliteits- en overige aspecten	P1		P2		P3		P4		LSD*	
			0	70	0	70	0	140	0	280	Effect obj.	Effect P-gift binnen P-obj.
<b>2006</b>	Suikerbiet		*	*	*	*	*	*	*	*		
<b>2007</b>	Wintertarwe	Vochtgehalte (%)	13,90	13,88	13,90	13,95	13,88	13,88	13,85	13,95	3,12	3,32
<b>2008</b>	Zaaiui	Uitval (%) <sup>1</sup>	0,57	1,11	0,83	0,56	1,15	1,46	1,24	1,91	1,04	1,13
<b>2009</b>	Peen	Uitval (%) <sup>2</sup>	5,39	6,26	4,43	5,15	6,44	4,82	5,53	4,86	2,47	2,97
<b>2010</b>	Aardappel	Droge stof (%)	17,3	16,8	16,9	17,2	17,2	16,9	17,5	17,0	0,86	1,00
	(Melody)	Knolaantal per m <sup>2</sup>	88	92	88	85	86	93	88	93	12,4	13,7
<b>2011</b>	Suikerbiet		*	*	*	*	*	*	*	*		
<b>2012</b>	Zomergerst	Vochtgehalte (%)	13,2	13,3	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	0,21	0,28
<b>2013</b>	Zaaiui	Uitval (%)	0,58	0,03	0,35	0,13	0,27	0,49	0,29	0,30	0,653	0,581
<b>2014</b>	Wintertarwe	Vochtgehalte (%)	14,03	14,15	14,10	14,13	14,08	14,03	14,05	14,05	0,153	0,156
<b>2015</b>	Aardappel	Uitval (%) <sup>3</sup>	1,63	1,21	0,76	1,39	1,16	0,90	0,97	1,06	0,915	0,835
	(Maritiema)	Droge stof (%)	24,2	24,3	24,1	24,6	24,7	24,6	24,6	24,9	0,710	0,724
		Knolaantal per m <sup>2</sup>	51	54	54	55	54	54	55	55	6,1	7,0
<b>2016</b>	Suikerbiet	Suikergehalte (%)	17,33	16,93	17,36	17,20	17,40	17,49	17,18	17,37	0,487	0,505
		Winbaarheidsindex	92,3	92,1	92,1	92,3	92,1	92,3	92,1	92,2	0,27	0,27
<b>2017</b>	Zaaiui	Uitval (%)	1,78	1,17	1,02	1,22	0,87	0,80	0,65	0,71	1,03	0,99
<b>2018</b>	Wintertarwe	Vochtgehalte (%)	13,88	12,83	13,13	13,03	13,00	12,83	12,90	12,88	0,51	0,54
<b>2019</b>	Aardappel	Uitval (%) <sup>3</sup>	6,15	3,21	4,34	1,49	1,13	3,42	2,84	3,91	2,657	2,859
	(Agria)	Droge stof (%)	21,8	22,2	23,6	22,3	22,6	23,1	21,6	21,4	1,53	0,95
		Knolaantal per m <sup>2</sup>	39	45	40	47	47	48	49	49	4,79	4,85
<b>2020</b>	Suikerbiet	Suikergehalte (%)	14,96	15,41	16,05	15,75	15,75	15,87	16,11	15,29	1,115	1,108
		Winbaarheidsindex	91,0	90,9	91,1	91,0	91,1	91,2	91,2	90,9	0,74	0,80

\* De eerste LSD-waard geldt voor de vergelijking van alle objecten onderling en de tweede alleen voor de vergelijking binnen hetzelfde P-object.

<sup>1</sup> Rot, watervellen, scheurkonten, vergroeiingen, dikke nekken of kale uien

<sup>2</sup> Krom en vertakt.

<sup>3</sup> Rot, groen, groeischeuren en misvormd.



**Figuur 3-3** Maatsortering van aardappel (gemiddeld over 2010, 2015 en 2019), ui (2008, 2013 en 2017) en peen (2009).

### 3.3 Fosfaatafvoer

In Tabel 8 is de relatieve fosfaatafvoer (P2 bemest=100) gegeven van de gewassen die vanaf 2005 zijn geteeld. In Bijlage 5 zijn de werkelijke afvoeren per gewas weergegeven. De fosfaatafvoer van de aardappel in 2005 werd beïnvloed door wateroverlast en is daardoor lager en daarom buiten beschouwing gelaten. De oogstresten, zoals bietenblad, tarwe- en erwtenstro en uien, aardappel- en peenloof zijn niet afgevoerd maar op de desbetreffende veldjes ondergewerkt, deze zijn dus niet meegenomen in de berekening van de fosfaatafvoer. De hoeveelheden gewasresten, indien bekend, zijn weergegeven in Bijlage 6.

**Tabel 8** Jaarlijkse relatieve fosfaatafvoer met het geogste product van de gewassen geteeld in de periode 2005-2020. Dikgedrukt is weergegeven welke opbrengst statistisch verschilt van P2-bemest, indien de opbrengst bij onbemest is onderstreept verschilt deze significant van het bemeste object.

Jaar	Gewas	P1		P2		P3		P4		Effect obj.	Effect P-gift Binnen P-obj.	Werkelijke afvoer P2 bemest $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$
		0	70	0	70	0	140	0	280			
2006	Suikerbiet	<b>85</b>	<b>84</b>	103	100	<b>109</b>	108	107	<b>113</b>	8,5	6,2	64
2007	Wintertarwe	<b>77</b>	<b>84</b>	<b>88</b>	100	<b>88</b>	93	<b>90</b>	<b>86</b>	8,6	7,9	74
2008	Zaaiui	<b>90</b>	<b>98</b>	99	100	105	104	<b>110</b>	<b>115</b>	7,0	8,0	68
2009	Peen	<b>81</b>	89	94	100	<u>104</u>	<b>120</b>	<b>113</b>	<b>129</b>	10,1	9,0	82
2010	Aardappel	<u>83</u>	91	<u>87</u>	100	<u>103</u>	112	<b>134</b>	<b>143</b>	19,7	7,0	60
2011	Suikerbiet	88	102	94	100	100	101	102	104	16,5	19,7	67
2012	Zomergerst	93	95	100	100	100	101	99	105	7,1	7,9	55
2013	Zaaiui	<b>64</b>	86	88	100	98	110	106	105	19,8	19,9	33
2014	Wintertarwe	<b>92</b>	<b>92</b>	97	100	100	97	99	96	6,8	6,7	63
2015	Aardappel	<b>54</b>	84	<b>64</b>	100	<u>80</u>	<b>128</b>	<u>104</u>	<b>179</b>	21,9	23,1	44
2016	Suikerbiet	89	98	108	100	103	114	109	117	20,8	27,1	58
2017	Zaaiui	<b>64</b>	94	89	100	<u>88</u>	109	<u>98</u>	<b>123</b>	12,3	11,4	68
2018	Wintertarwe	89	90	90	100	93	107	<u>103</u>	<b>125</b>	16,3	18,8	63
2019	Aardappel	100	104	92	100	117	108	121	120	29,2	32,3	47
2020	Suikerbiet	<b>53</b>	90	88	100	87	100	111	106	16,9	17,5	82
2006-2020		<b>80</b>	<b>92</b>	<b>92</b>	100	<u>98</u>	<b>108</b>	<b>107</b>	<b>118</b>	5,6	4,8	62

Gemiddeld over de periode 2006-2020 was de gemiddelde fosfaatafvoer bij de standaard (P2-bemest) 62 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (zie Tabel 8). Er zijn aanzienlijke verschillen tussen de gewassen maar ook tussen de jaren, zo werd er met de teelt van zaaiui in 2008 68 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> afgevoerd en in 2013 slechts 33 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Bij de aardappels varieerde de afvoer tussen de 44 en 60, bij de suikerbiet tussen de 58 en 82 en bij de tarwe tussen de 63 en 74 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Dit hangt voor een groot deel samen met de gerealiseerde opbrengst.

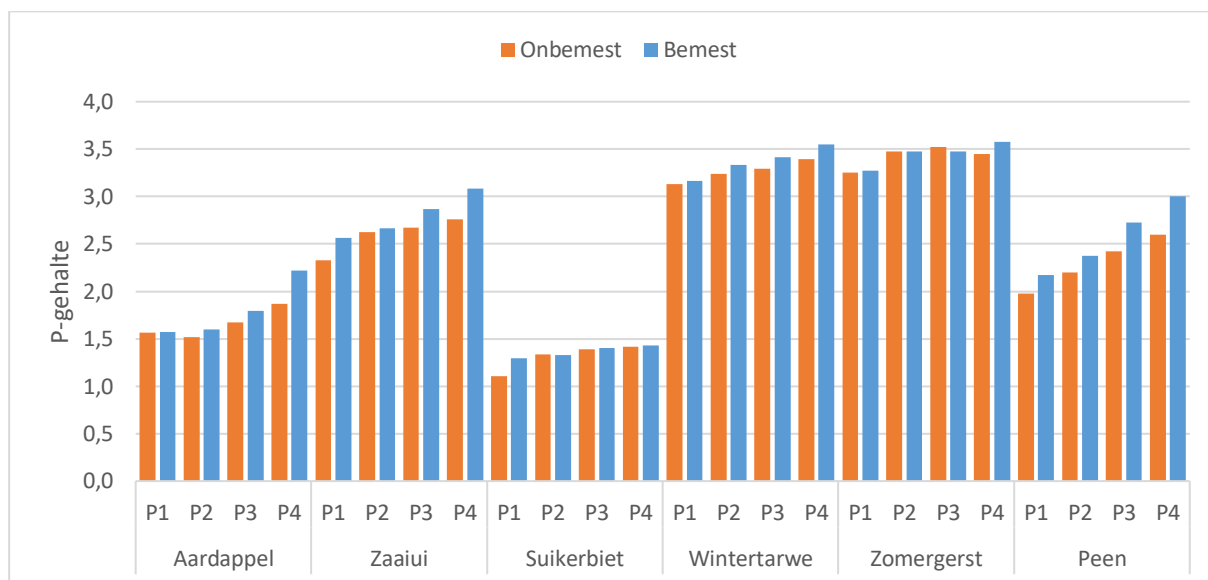
In vergelijking met de standaard (P2-bemest) is de fosfaatafvoer gemiddeld genomen hoger bij een hogere fosfaattoestand en -bemesting (P3-bemest en P4-bemest) en lager bij de lagere fosfaattoestand (P1-bemest). Gemiddeld over de periode 2006-2020 waren deze verschillen significant. Bij een lage fosfaattoestand (P1-bemest) blijft de gemiddelde fosfaatafvoer (2006-2020) 8% achter ten opzichte van de neutrale fosfaattoestand (P2-bemest). Bij een hogere fosfaattoestand en -bemesting (P3-bemest en P4-bemest) werd gemiddeld over de gewassen respectievelijk 8 en 18% meer fosfaat afgevoerd dan bij de standaard (P2-bemest). Bij de hogere fosfaattoestand en -bemesting ligt het P-gehalte hoger dan bij de standaard (zie Figuur 3-4).

#### Effect fosfaatbemesting op fosfaatafvoer

Gemiddeld genomen werd er meer fosfaat opgenomen door de gewassen bij de bemeste dan bij de onbemeste objecten. Dit scheelde respectievelijk 7, 5, 5 en 6 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha voor P1, P2, P3 en P4. Het fosforgehalte was hoger bij de bemeste dan bij de onbemeste objecten (zie Figuur 3-4). Het verschil in het fosforgehalte tussen wel en niet bemesten neemt iets toe naarmate de fosfaattoestand en -gift hoger is (data niet weergegeven). Bij het effect van bemesting moet worden benadrukt dat het uitmijnen binnen de fosfaattoestanden P1 t/m P4 door de jaren heeft geleid tot verschillen in fosfaattoestand tussen de onbemeste (uitmijnen) en bemeste velden (zie paragraaf 3.5). Het bemestingseffect is daarmee mede een toestandseffect.

### Luxe consumptie

Indien een hogere P-opname niet heeft geleid tot een hogere productie, was er sprake van luxe-consumptie. Een vergelijking tussen Tabel 6 en Figuur 3-4 laat zien dat er gemiddeld over de periode 2006-2020 sprake was van luxe-consumptie bij P3-bemest, P4-onbemest en P4-bemest. Een significant hogere P-opname leidde enkel bij wintertarwe bij P4-bemest (2007) tot een evenredig hogere opbrengst.



**Figuur 3-4** P-gehalte (g kg<sup>-1</sup> droge stof) per gewas en per fosfaatobject, gemiddeld over 2006-2020.

## 3.4 Fosfaatoverschot

In Tabel 9 wordt het fosfaatoverschot weergegeven. Het fosfaatoverschot wordt berekend door de fosfaatafvoer via het geogste product af te trekken van het aangevoerde fosfaat via de bemesting.

Bij het standaard object (P2-bemest) was het gemiddelde overschot in de periode 2006-2020 8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, dit past binnen de waarden die wordt aangehouden als het onvermijdbaar landbouwkundig verlies (5-20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>) voor het handhaven van het streeftraject (Pw-getal 25-45 op zeelei). Uit paragraaf 3.3 werd al duidelijk dat de fosfaatafvoer bij P1-bemest lager was dan bij P2-bemest. Dit betekent dat bij eenzelfde bemesting het fosfaatoverschot groter was bij een lage fosfaattoestand dan bij een toestand op landbouwkundig streefniveau.

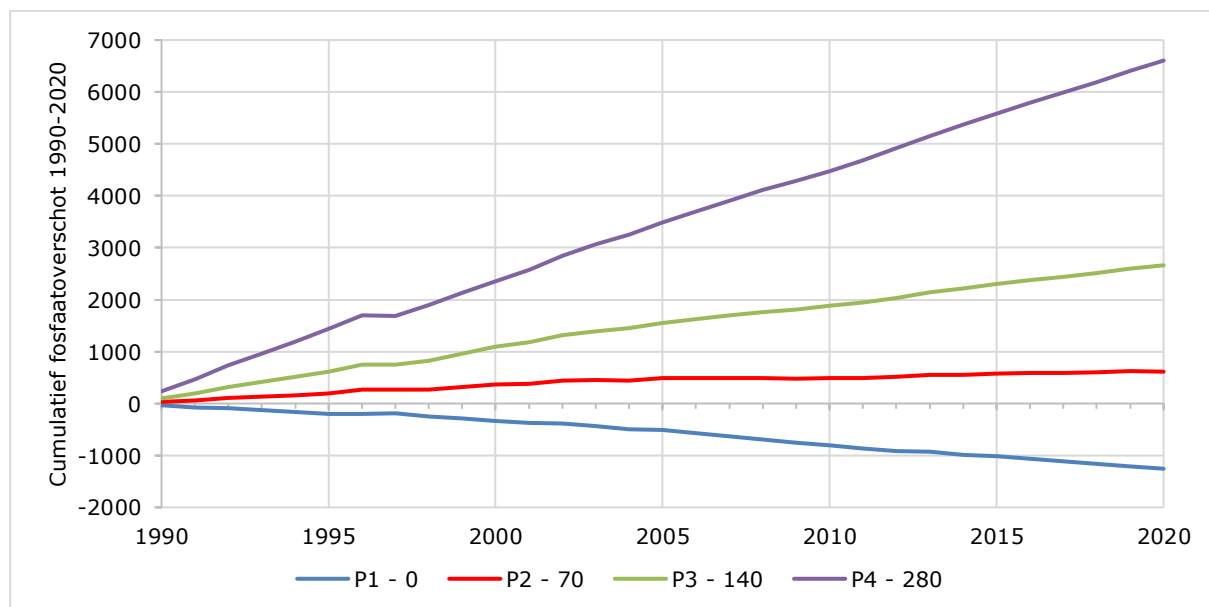
Voor alle onbemeste objecten geldt dat er meer fosfaat werd afgevoerd dan aangevoerd, dit tekort is groter naarmate de fosfaattoestand hoger is. Dit betekent dat zonder bemesting het uitmijnen van fosfaat uit de bodem groter is naarmate de fosfaattoestand hoger is.



**Tabel 9** Fosfaatoverschot (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>) per jaar en object.

Jaar	Gewas	P1		P2		P3		P4	
		0	70	0	70	0	140	0	280
2005	Aardappel	-19	56	-34	45	-30	104	-52	232
2006	Suikerbiet	-55	16	-66	6	-70	70	-68	207
2007	Wintertarwe	-57	8	-66	-4	-66	71	-67	216
2008	Zaaiui	-61	3	-67	2	-71	69	-74	202
2009	Peen	-66	-3	-76	-12	-85	42	-92	174
2010	Aardappel	-50	15	-53	10	-62	72	-81	194
2011	Suikerbiet	-59	2	-63	3	-67	73	-68	211
2012	Zomergerst	-51	18	-54	15	-55	85	-54	223
2013	Zaaiui	-21	42	-29	37	-32	104	-35	246
2014	Wintertarwe	-58	12	-61	7	-63	79	-62	220
2015	Aardappel	-24	33	-28	26	-35	84	-46	201
2016	Suikerbiet	-51	13	-62	12	-59	74	-63	212
2017	Zaaiui	-44	6	-60	2	-59	66	-66	197
2018	Wintertarwe	-56	14	-57	7	-59	73	-65	201
2019	Aardappel	-47	21	-43	23	-55	89	-56	224
2020	Suikerbiet	-43	-4	-72	-12	-71	58	-91	193
<b>2005-2020</b>		-48	16	-56	11	-59	76	-65	210
<b>2006-2020</b>		-49	13	-57	8	-61	74	-66	208

Het optellen van de jaarlijkse fosfaatoverschotten resulteert in een cumulatief fosfaatoverschot, dit is de hoeveelheid fosfaat die niet door het gewas is opgenomen (in het geval van een positief getal) of de hoeveelheid fosfaat die door het gewas aan de bodem is onttrokken (in het geval van een negatief getal). Dit kan inzicht geven in hoe snel de fosfaattoestand zal veranderen. Ook kan het verloop van het cumulatieve fosfaatoverschot een indicatie geven of de fosfaattoestand stabiliseert. Het verloop van het cumulatieve fosfaatoverschot vanaf 1989 is gepresenteerd in Figuur 3-5. De verwachting is daarom dat de totale fosfaatvoorraad in de bodem bij P1 zal afnemen, bij P2 stabiel zal blijven, bij P3 zal toenemen en bij P4 sterk zal toenemen.



**Figuur 3-5** Cumulatief fosfaatoverschot vanaf 1990.

### 3.5 Verloop van de fosfaatindicatoren in de tijd

Door jarenlange verschillen in de fosfaatbemesting zijn er vier verschillende fosfaatniveaus ontstaan, van fosfaattoestand 'arm' tot 'hoog'. Vanaf 2005 zijn deze fosfaatniveaus (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met uitmijnen (NB, niet bemest) of continueren van de fosfaatgift (B, bemest). In dit hoofdstuk worden de

resultaten vanaf 2005 opgenomen en gepresenteerd als gemiddelden van de vier herhalingen. Een overzicht van de meetwaarden van de periode 2005-2020 wordt in tabelvorm gepresenteerd in Bijlage 7. Het historische verloop van de fosfaattoestand (1990-2020) wordt gepresenteerd in Bijlage 8. Van het verloop zijn ook de trendlijnen per parameter en per laag berekend. Deze zijn weergegeven in Bijlage 8. Voor het fitten van deze trendlijnen zijn twee benaderingen gekozen. Een waarbij de meetwaarden van 1990-2020 zijn opgenomen, en een waarbij de meetwaarden van 2005-2020 zijn opgenomen. Het verloop van de data over de periode 1990-2020 en 2005-2020 laten zich niet goed beschrijven door eenvoudige lineaire of exponentiële curves. Deze trendlijnen zijn daarom niet opgenomen in de resultaten en discussie. Het verloop van de fosfaattoestand wordt daarom beschreven aan de hand van meetwaarden.

### 3.5.1 De fosfaattoestand gemeten met het Pw-getal

#### 3.5.1.1 Het gemeten fosfaat in de bouwvoor

De historische bemesting heeft geleid tot vier verschillende beginsituaties in 2005, de fosfaatklassen die hier benoemd worden zijn op basis van het Pw-getal. Een jaarlijkse bemesting met 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (P2) heeft geleid tot een Pw-getal van 51 in 2005, wat wordt gewaardeerd als 'vrij hoog'. Een bemesting met 140 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (P3) en 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (P4) hebben geleid tot een Pw-getal van 73 en 126 respectievelijk, beiden worden geclassificeerd als 'hoog'. Het jarenlang onthouden van bemesting (P1) heeft geleid tot een Pw-getal van 22 in 2005, geclassificeerd als 'voldoende'. Het verloop van het Pw-getal in de laag 0-30cm in de periode 2005-2020 wordt weergegeven in Figuur 3-6. Hierin worden de verschillen tussen de objecten, alsook de fluctuaties tussen de jaren, zichtbaar.

Bij een hoge fosfaattoestand (P4) lijkt het voortzetten van de bemestingsstrategie niet of nauwelijks te leiden tot een verdere toename van de fosfaattoestand. Met name in de laatste vijf jaar lijkt de fosfaattoestand niet verder toe te nemen, of er sprake is van stabilisatie van het Pw-getal bij P4-bemest is nog onduidelijk. Het uitmijnen (P4-onbemest) leidde tot een sterke afname van het Pw-getal. In de periode 2005-2020 nam het Pw-getal af van 113 tot 38 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liter<sup>-1</sup> en hiermee veranderde de waardering dus van 'hoog' naar 'ruim voldoende'. Deze afname begint af te vlakken, maar een stabiele toestand is nog niet bereikt (zie Bijlage 8). Dit zal naar verwachting de jaren daaropvolgend gebeuren.

Bij P3 lijkt de voortzetting van de bemestingsstrategie niet te leiden tot een verdere toename van de fosfaattoestand. Door de grote jaar-tot-jaar fluctuaties is het moeilijk vast te stellen of het Pw-getal nog toeneemt of niet. Het uitmijnen (P3-onbemest) leidde tot een sterke afname in het Pw-getal. Deze daalde van 62 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liter<sup>-1</sup> in 2005 tot 24 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liter<sup>-1</sup> in 2020, hiermee veranderde de fosfaatwaardering dus van 'hoog' naar 'voldoende' binnen 15 jaar. Het is nog niet duidelijk of de fosfaattoestand begint te stabiliseren. Omdat jaarlijks fosfaat wordt onttrokken, mag een verdere daling verwacht worden.

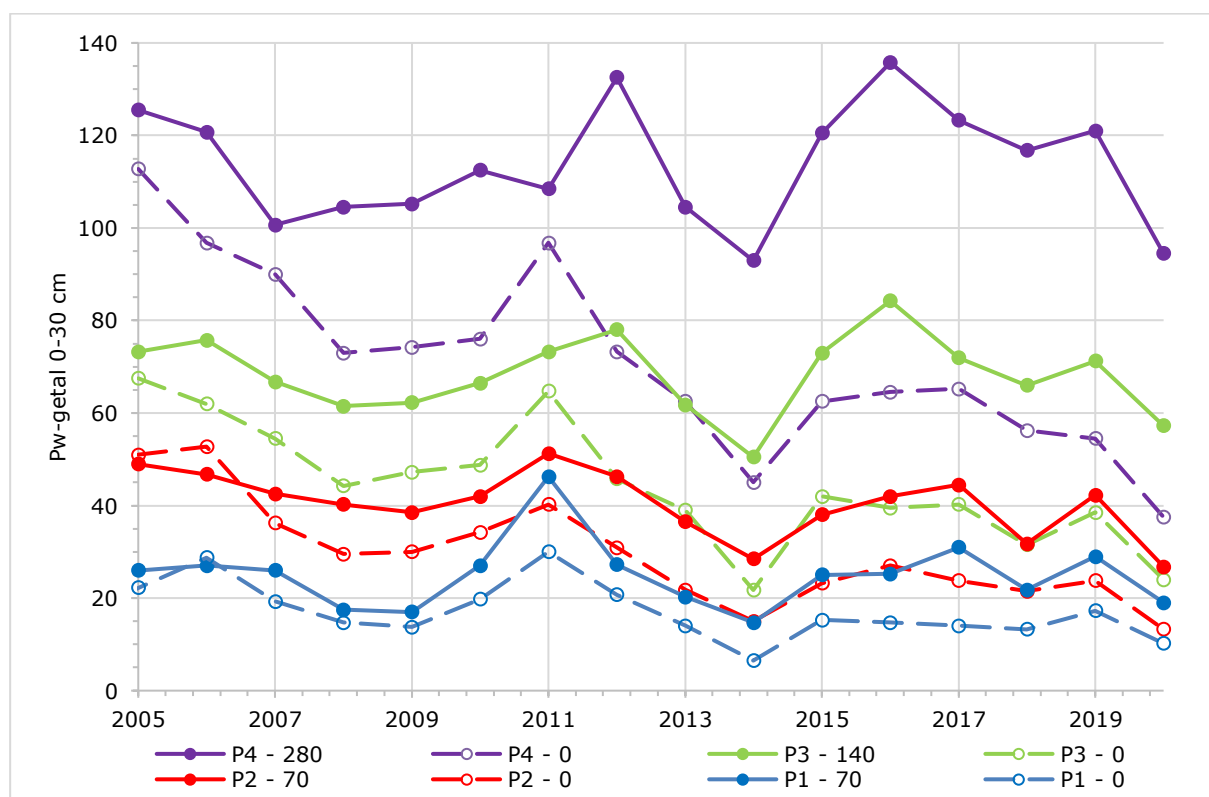
In 2005 werd de fosfaattoestand van P2 ingedeeld in de fosfaatklasse 'ruim' op basis van het gebruiksnormenstelsel van RVO. Daarbij hoorde een fosfaatnorm van 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, met als doel een afname van de fosfaattoestand. Bij dit object is 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bemest. Zelfs met een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> daalde het Pw-getal, al in 2007 werd de grens van Pw 45 gehaald, waardoor de fosfaatklasse op basis van het HBB veranderde van 'vrij hoog' naar 'ruim voldoende'. Bij een gift van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> is de verwachting dat deze toestand gehandhaafd zou blijven. Het Pw-getal daalde echter verder. Met een fosfaatgift van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> veranderde de fosfaatwaardering van 'vrij hoog' in 2005 naar 'ruim voldoende' in 2019, tot 'voldoende' in 2020. Bekeken over 1990-2020 lijkt de fosfaattoestand over de eerste 15 jaar toe te nemen, en vervolgens licht te dalen. Dit komt waarschijnlijk door een ander bouwplan in de twee periodes waarbij het fosfaatoverschot in de eerste periode hoger was dan in de daaropvolgende, en de ruimere bemesting in 1996, 1999 en 2000. Er is nog geen stabiel Pw-getal bereikt. Ook het uitmijnen leidde bij P2 tot een afname van het Pw-getal. In de periode 2005-2020 daalde deze van 51 tot 13 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liter<sup>-1</sup>, de fosfaattoestand veranderde daarmee van 'vrij hoog' naar 'laag'. Bij het uitmijnen lijkt de fosfaattoestand af te vlakken, van een gestabiliseerde toestand is in 2020 nog geen sprake.

Bij de fosfaatklasse van P1 mag er worden bemest met 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, binnen deze proef is er bemest met slechts 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Met deze bemesting lijkt het Pw-getal te stabiliseren rond 25 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/liter, wat wordt gewaardeerd als 'voldoende'. Een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> is dus voldoende om een landbouwkundig voldoende hoog Pw-getal te handhaven. Dit is echter wel aan de onderkant van het landbouwkundig streeftraject. Het voortzetten van uitmijnen bij een lage fosfaattoestand leidde tot een nog lager Pw-getal. Deze zakte van 22 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liter<sup>-1</sup> in 2005 tot 10 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liter<sup>-1</sup> in 2020 en wordt daarmee geclassificeerd als 'zeer laag'.

Voor alle onbemeste objecten liep het Pw-getal terug. Dit was sterker bij een hoge fosfaattoestand dan bij een lage fosfaattoestand. Ten opzichte van 2005 daalde het Pw-getal met 75, 44, 38 en mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> liter<sup>-1</sup> respectievelijk voor P4, P3, P2 en P1.

Door het grillige verloop van het Pw-getal is niet eenvoudig om aan te geven of er sprake is van een gestabiliseerd Pw-getal bij een aantal objecten. Bij P2-onbemest, P3-onbemest en P4-onbemest is er duidelijk geen sprake van een gestabiliseerde toestand. Er is in de laatste 15 jaar echter ook geen sprake van een sterke toe- of afname

bij de bemeste objecten. Wel is duidelijk dat het Pw-getal bij objecten met uiteenlopende fosfaatbemesting in de loop der tijd steeds verder uiteen gaat lopen.



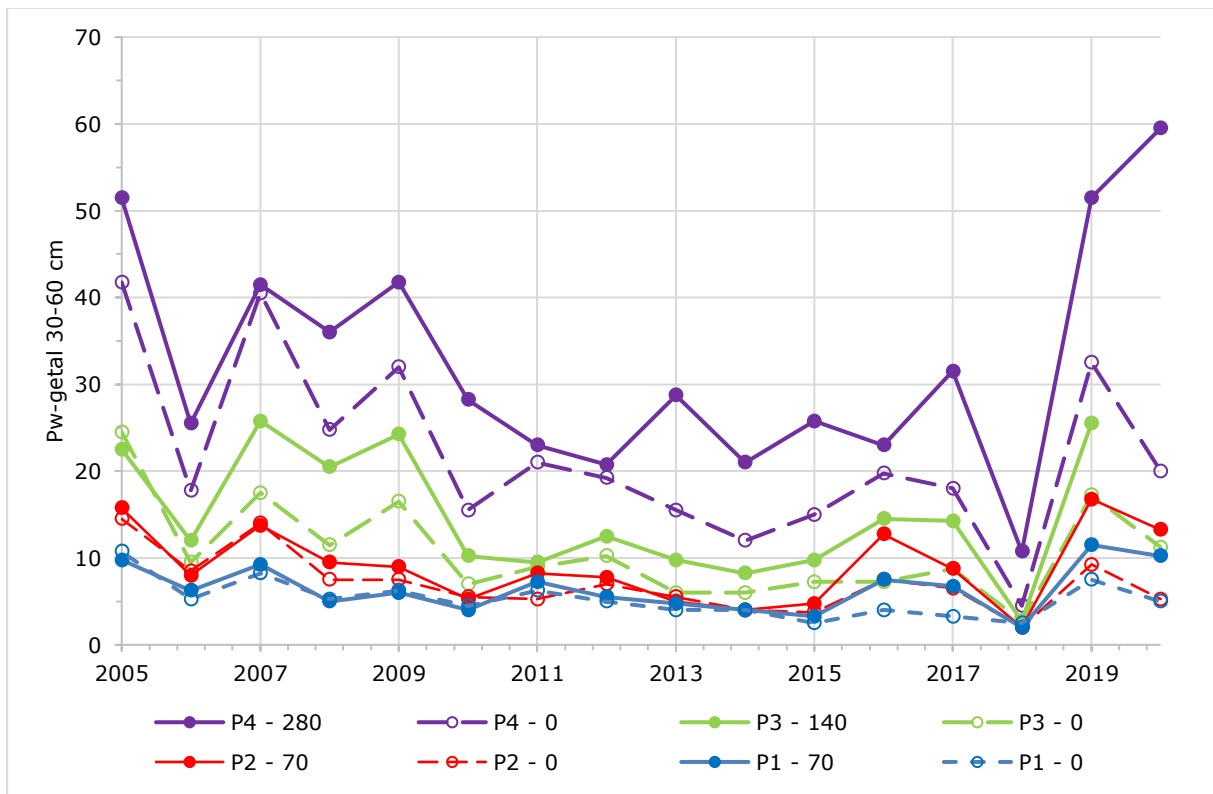
**Figuur 3-6** Het verloop van het Pw-getal (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/liter) in de laag 0-30cm in de periode 2005-2020 bij vier oplopende niveaus van initiële fosfaattoestanden (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met een jaarlijkse fosfaatgift van 0, 70, 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Gemiddelde van 4 herhalingen.

### 3.5.1.2 Het gemeten fosfaat onder de bouwvoor

In Figuur 3-7 wordt het verloop van het Pw-getal onder de bouwvoor (30-60cm) getoond. Verschillende fosfaatbemestingsniveaus hebben geleid tot een hoger Pw-getal in de ondergrond bij veldjes met hoge fosfaatgiften (P3 en P4). Dit duidt erop dat fosfaat vanuit de bouwvoor naar diepere lagen is getransporteerd.

In 2018 is er voor de meeste objecten een lage waarde gemeten, terwijl er in 2019 en 2020 weer hogere waarden zijn gemeten. Dezelfde afwijking werd ook voor de andere fosfaatindicatoren gevonden, maar een verklaring is lastig te geven. In 2018 was het fosfaatoverschot niet (extreem) lager dan in voorgaande jaren. In 2018 werd wintertarwe verbouwd, dit gewas wortelt relatief diep en is in staat nutriënten uit de laag 30-60cm te onttrekken, mogelijk werd dit effect verstrekt door het relatief droge jaar. In de andere jaren dat er granen zijn geteeld werd er geen dal in het Pw-getal (30-60cm) gevonden. De teelt van granen lijkt dus geen goede verklaring.

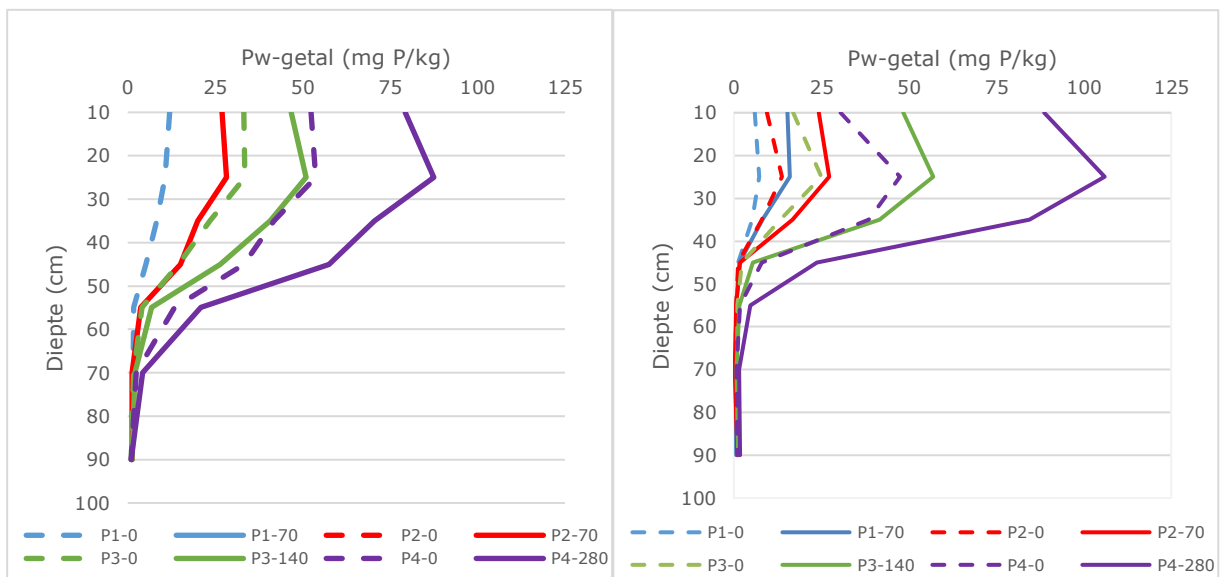
Al met al laat het Pw-getal (30-60cm) grote fluctuaties zien. Bij de meeste objecten lijkt de toestand licht af te nemen, en vanaf 2015 ontstonden relatief grote verschillen tussen de jaren. Het voortzetten van een hoge fosfaatbemesting (P3 en P4) lijkt niet te hebben geleid tot een verdere toename van de fosfaattoestand, ondanks het hoge fosfaatoverschot op deze veldjes. Enkel in 2019 en 2020 werden hoge waarden gemeten. Bij P1-bemest en P2-bemest leidde het voortzetten van de fosfaatbemesting tot een daling van het Pw-getal en was gelijk aan het object dat sinds 1990 niet meer met fosfaat werd bemest (P1-onbemest). Dat wil zeggen dat er bij de bemeste P1 en P2 behandelingen geen sprake was van verplaatsing van fosfaat naar onder de bouwvoor. Bij de onbemeste objecten van P3 en P4 liep het Pw-getal onder de bouwvoor terug, dit was sterker bij een hoge initiële fosfaattoestand.



**Figuur 3-7** Het verloop van het pw-getal (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/liter) in de laag 30-60cm in de periode 2005-2020 bij vier oplopende niveaus van initiële fosfaattoestanden (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met een jaarlijkse fosfaatgift van 0, 70, 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Gemiddelde van 4 herhalingen.

### 3.5.1.3 Profielbemonstering

In Figuur 3-8 worden de fosfaatconcentraties op verschillende diepten weergegeven. Hieruit wordt duidelijk zichtbaar dat de fosfaatconcentratie vanaf een diepte van 30 cm sterk afneemt. In Figuur 3-7 zijn de verschillen in fosfaatconcentratie in de laag 30-60cm tussen de objecten duidelijk te zien, in 2018 was dat minder het geval en was de concentratie voor vrijwel alle objecten laag. Dat is terug te zien in de profielbemonstering (Figuur 3-8). Het fosfaat in de laag 30-60cm (zoals gepresenteerd in Figuur 3-7) was in 2018 met name terug te vinden in de laag 30-40cm, in 2009 waren de verschillen tussen de bodemlagen minder groot, maar wel op verdere diepte zichtbaar.



**Figuur 3-8** De gemeten fosfaatconcentratie op verschillende diepten in 2009 (links) en 2018 (rechts). De

eenheid is  $\text{mg P kg}^{-1}$  en wijkt daarmee af van de standaard eenheid voor het Pw-getal. In 2009 is niet gemeten aan de objecten P1-70 en P2-0. Monsters zijn genomen van de 0-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-80 en 80-100 cm bodemlaag.

### 3.5.2 De fosfaattoestand gemeten met P-Al

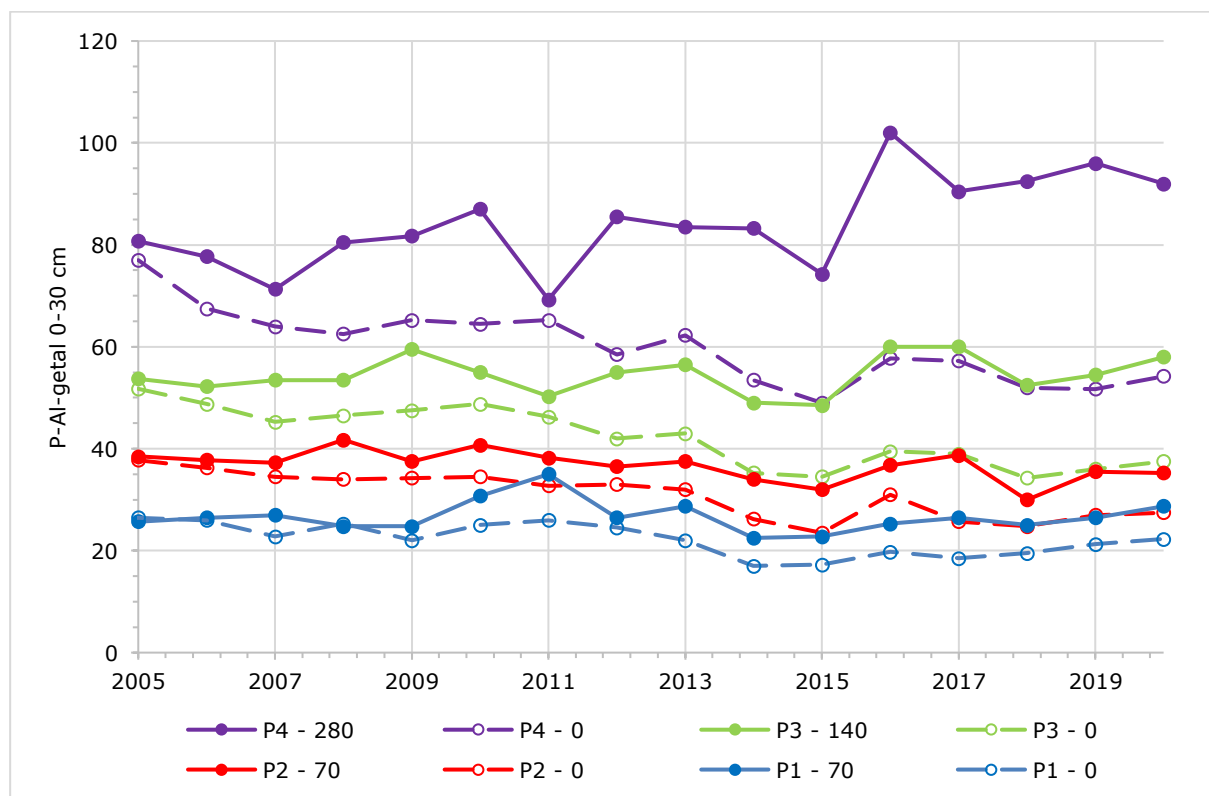
Ook in het P-Al getal komt de historische bemesting tot uiting. In 2005 was het P-Al getal respectievelijk 27, 39, 54 en 81 voor P1, P2, P3 en P4. In combinatie met het gemeten P-CaCl<sub>2</sub> worden aan de objecten respectievelijk fosfaatklasse 'arm', 'laag', 'ruim' en 'hoog' toegekend (klassenindeling op basis van de gecombineerde indicator). Het verloop van het P-Al getal in de laag 0-30 cm in de periode 2005-2020 wordt weergegeven in Figuur 3-9.

Bij een hoge fosfaattoestand (P4) heeft het voortzetten van de bemestingsstrategie geleid tot een verdere toename van de fosfaattoestand. Het P-Al getal is gestegen van 81 in 2005 tot 92  $\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ 100g}^{-1}$  in 2020. Het uitmijnen heeft geleid tot een afname van het P-Al getal. Deze is gezakt tot 54  $\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ 100g}^{-1}$  in 2020. Dit duidt erop dat het bodemgebonden fosfaat (gemeten met het P-Al getal), bij gebrek aan verse fosfaatbemesting, fosfaat heeft geleverd ten behoeve van de gewasgroei.

Bij P3 resulteerde het voortzetten van de bemestingsstrategie tot een lichte stijging van het P-Al getal, deze nam in de periode 2005-2020 minder hard toe dan in de periode 1990-2005. Het P-Al getal lijkt dus te zijn afgevlakt, bij een bemesting van  $140 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  schommelt het P-Al getal na 15 jaar rond de  $55 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ 100g}^{-1}$ . Het uitmijnen leidde tot een afname van het P-Al getal, deze is gezakt tot  $38 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ 100g}^{-1}$  in 2020. Het verschil tussen wel of niet bemesten is dan  $20 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ 100g}^{-1}$ . Hier lijkt nog niet sprake van een gestabiliseerde fosfaattoestand.

De fosfaattoestand bij object P2 wordt geclassificeerd als 'laag', volgens de fosfaatnormen mag er bemest worden met  $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  om de fosfaattoestand in de bodem te verhogen. In dit object werd er  $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  bemest. In Figuur 3-9 wordt zichtbaar dat het P-Al getal licht af is genomen in de laatste 15 jaar. Deze bemestingsstrategie is dus onvoldoende om de fosfaattoestand te handhaven of te laten toenemen. Uitmijnen leidde tot een afname van het P-Al getal. Voor zowel P2-bemest als P2-onbemest lijkt er geen sprake te zijn van een stabilisatie van P-Al.

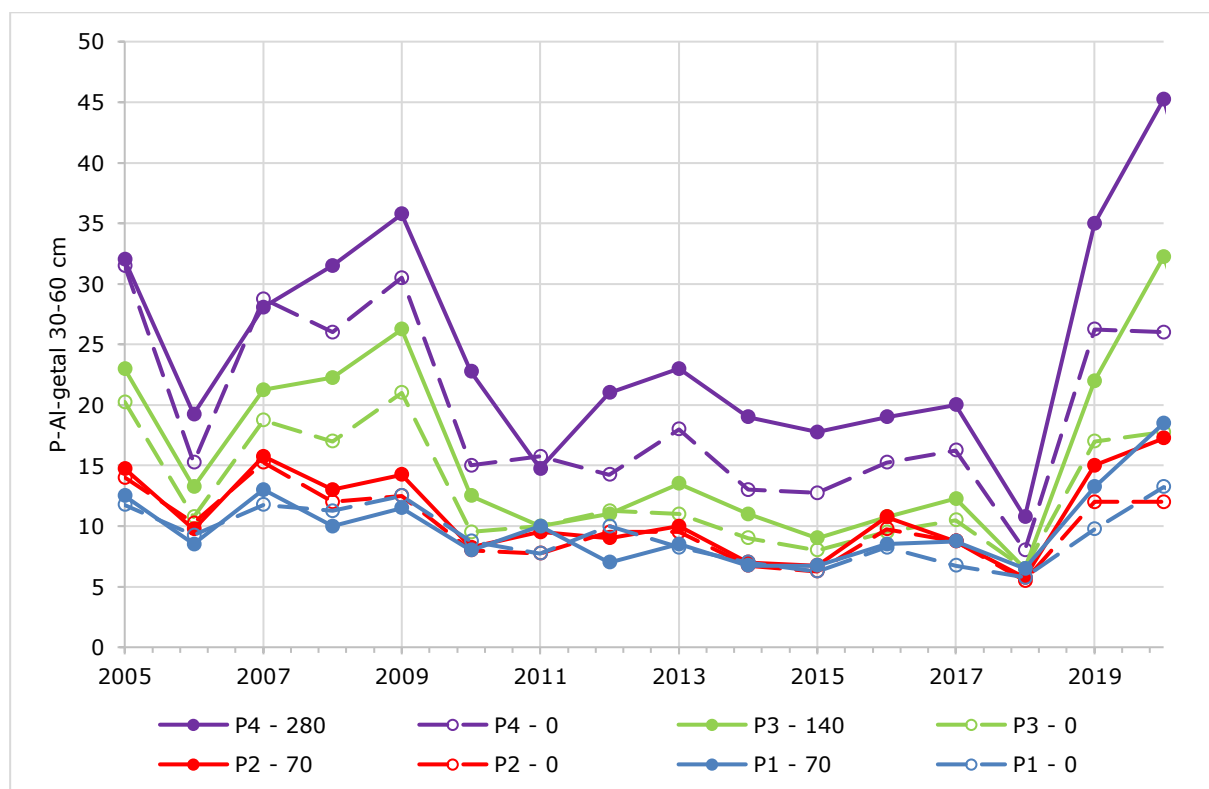
Bij object P1, waar in de periode 1990-2005 geen fosfaat werd bemest, word sinds 2005 bemest met  $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ . In Figuur 3-9 wordt zichtbaar dat het P-Al getal geen sterke toe- of afname laat zien. Hieruit valt af te leiden dat, in het geval van een lage fosfaattoestand, een verse bemesting van  $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  niet terecht komt in de bodemvoorraad gemeten met P-Al. Het P-Al getal bij uitmijnen is in de laatste 15 jaar iets gezakt.



**Figuur 3-9** Het verloop van het P-Al getal (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g) in de laag 0-30cm in de periode 2005-2020 bij vier oplopende niveaus van initiële fosfaattoestanden (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met een jaarlijkse fosfaatgift van 0, 70, 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Gemiddelde van 4 herhalingen.

### 3.5.2.1 Het gemeten fosfaat onder de bouwvoor

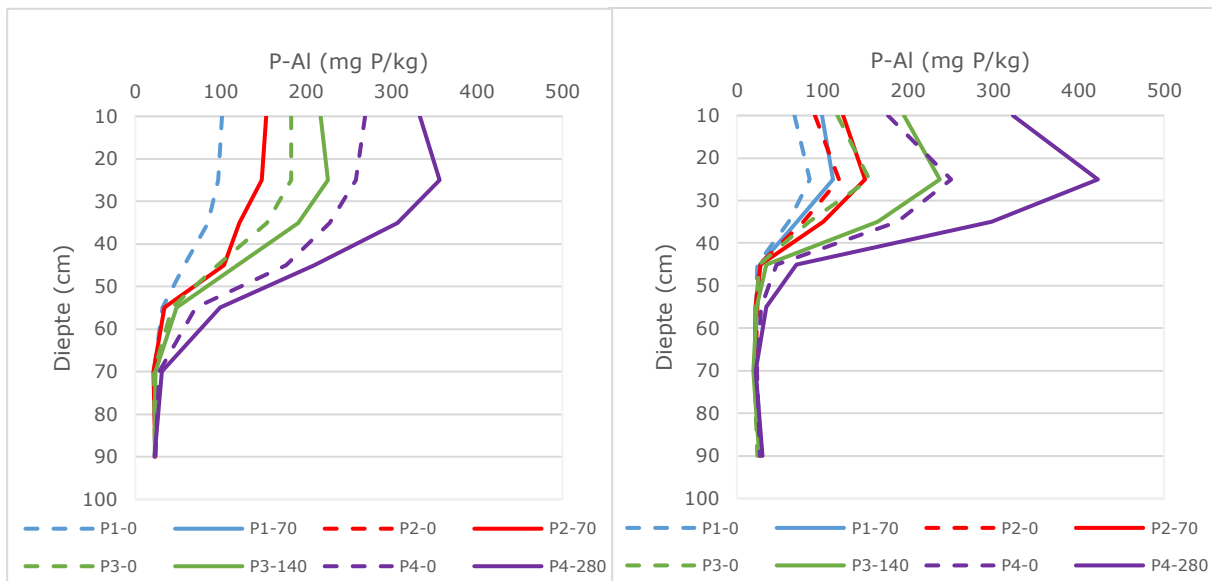
In Figuur 3-10 wordt het gemeten fosfaat met P-Al onder de bouwvoor getoond. Fosfaatoverschotten bij objecten P3-bemest en P4-bemest hebben geleid tot verhoogde P-Al getallen in de ondergrond ten opzichte van de P1 en P2 objecten. Uitmijnen bij P4 en P3 heeft geleid tot lagere waarden. Bij P1 en P2 heeft uitmijnen niet geleid tot een zichtbaar lagere concentratie dan P1-bemest en P2-bemest. Het P-Al getal toont fluctuaties in de tijd waarbij de jaren 2006 en 2018 zich kenmerken door lage waarden. Deze trends zijn vergelijkbaar met die van het Pw-getal en P-CaCl<sub>2</sub>. Het verloop van P-Al in en onder de bouwvoor laten min-of-meer dezelfde jaar-tot-jaar fluctuaties zien (zie Bijlage 9). Echter het effect van bemesting, en uitmijning, komt beter tot uiting in dan onder de bouwvoor.



**Figuur 3-10** Het verloop van het P-Al getal (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g) in de laag 30-60cm in de periode 2005-2020 bij vier oplopende niveaus van initiële fosfaattoestanden (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met een jaarlijkse fosfaatgift van 0, 70, 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Gemiddelde van 4 herhalingen.

### 3.5.2.2 Profielbemonstering

In Figuur 3-11 worden de fosfaatconcentraties op verschillende diepten weergegeven. De hoogste P-Al waarden worden gevonden in de laag 20-30cm, daaronder neemt de concentratie sterk af. In de laag 0-20cm was de fosfaatconcentratie van de bemeste objecten in 2018 iets hoger dan in 2009, voor de onbemeste objecten is deze afgenomen. In de bodemlaag net onder de bouwvoor (40-50 en 50-60cm) is de concentratie in 2018 is fors lager dan in 2009, zowel bij de bemeste als onbemeste objecten. Dit is ook zichtbaar in de metingen onder de bouwvoor gemeten met het Pw-getal, P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>. Het is onduidelijk waardoor dit precies komt.



**Figuur 3-11** De gemeten fosfaatconcentratie op verschillende diepten in 2009 (links) en 2018 (rechts). In 2009 is niet dieper gemeten dan 60cm, en is er niet gemeten aan de objecten P1-70 en P2-0. Monsters zijn genomen van de 0-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-80 en 80-100 cm bodemlaag.

### 3.5.3 De fosfaattoestand gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>

Figuur 3-12 toont het verloop in het P-CaCl<sub>2</sub> getal. De P-CaCl<sub>2</sub> data laat zich niet eenvoudig interpreteren omdat er op individuele metingen een grote variatie zit (zie Bijlage 8).

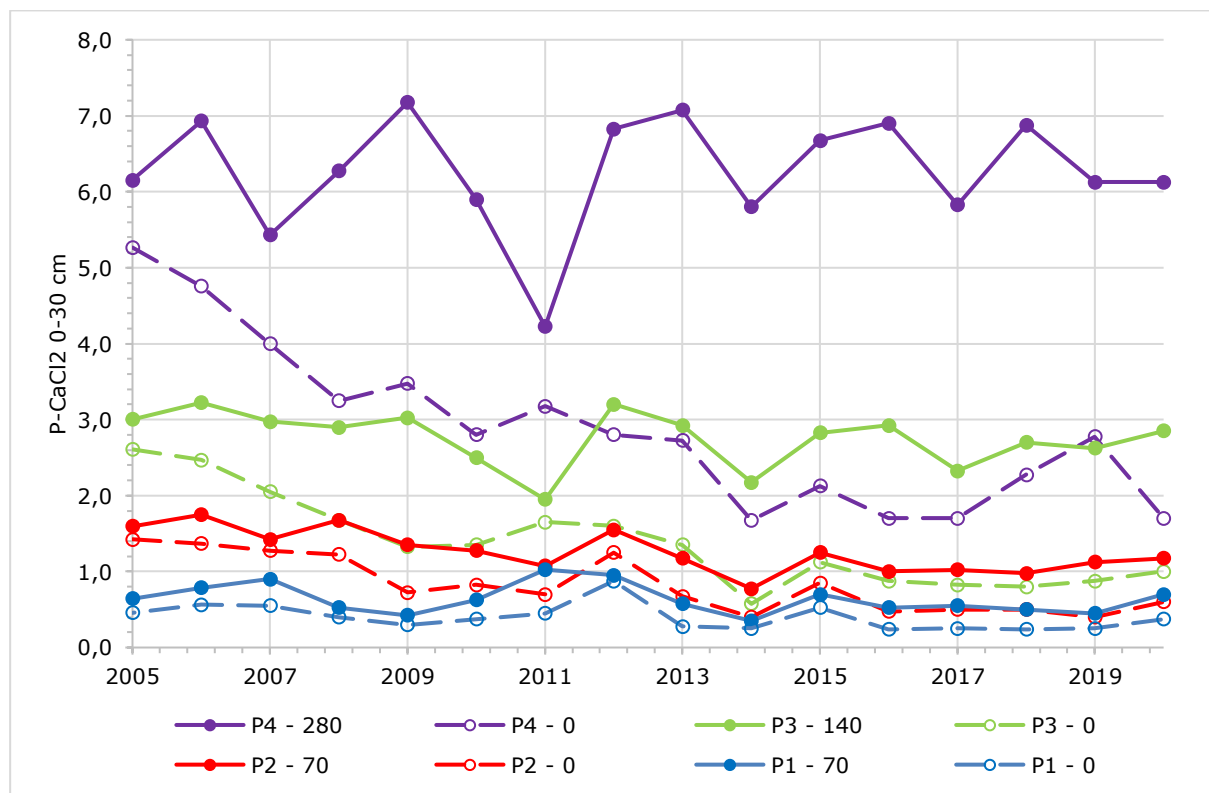
Bij een hoge fosfaattoestand (P4) leidde het voortzetten van de bemestingsstrategie niet tot een verdere toename van de fosfaattoestand gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>, dit is opvallend aangezien er een grote hoeveelheid makkelijk beschikbaar fosfaat is aangevoerd welke niet volledig door het gewas is opgenomen (zie paragraaf 3.4). Gezien er wel een toename is gemeten in bodemvoorraad (het P-Al getal), betekent dit dat het makkelijk beschikbaar fosfaat overgaat in andere fosfaatvormen in de bodem die minder gemakkelijk beschikbaar zijn c.q. overgaat naar andere fosfaatpools in de bodem. Uitmijnen leidde bij een hoge fosfaattoestand tot een sterke afname in plantbeschikbaar fosfaat (gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>). Deze daling was bij P4 groter dan bij de overige uitmijnobjecten.

Ook bij object P3 resulteerde het voortzetten van de bemestingsstrategie niet tot een toe- of afname van de fosfaattoestand zoals gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>. Uitmijnen leidde direct tot een afname in het plantbeschikbaar fosfaat, deze daalde van 2,6 in 2005 naar 1,0 mg P kg<sup>-1</sup> in 2020.

Bij het standaard object (P2-bemest) leidde de bemesting met 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> tot een hele lichte afname van P-CaCl<sub>2</sub>, deze lijkt te stabiliseren rond de 1. Uitmijning leidde bij P2 tot een afname van het beschikbaar fosfaat, gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>.

Bij een lage fosfaattoestand (P1) leidde een bemesting vanaf 2005 niet tot een toename van het P-CaCl<sub>2</sub> getal. De meststof, die goed oplosbaar fosfaat bevat (tripelsuperfosfaat), wordt jaarlijks voor de teelt van de gewassen gestrooid, terwijl de fosfaattoestand van de bodem na de teelt wordt gemeten (in het najaar). Door de bemesting wordt de fractie plantbeschikbaar fosfaat weliswaar aangevuld en zal stijgen, maar dit is van tijdelijke aard. Het fosfaat wordt tijdens het groeiseizoen opgenomen door de gewassen, waardoor het fosfaatoverschot beperkt was (zie

Tabel 9), en de bemesting niet tot uiting komt in de bodem. Verder wordt gemakkelijk beschikbaar fosfaat dat overblijft in de bodem omgezet in stabielere fosfaatvormen, die minder gemakkelijk beschikbaar zijn en niet meer in de P-CaCl<sub>2</sub>-meting worden teruggevonden. Het voortzetten van geen bemesting leidde tot een beperkte, maar lichte daling. De gemeten P-CaCl<sub>2</sub> schommelt de laatste 10 jaar tussen de 0,2 en 0,5 mg P kg<sup>-1</sup>.



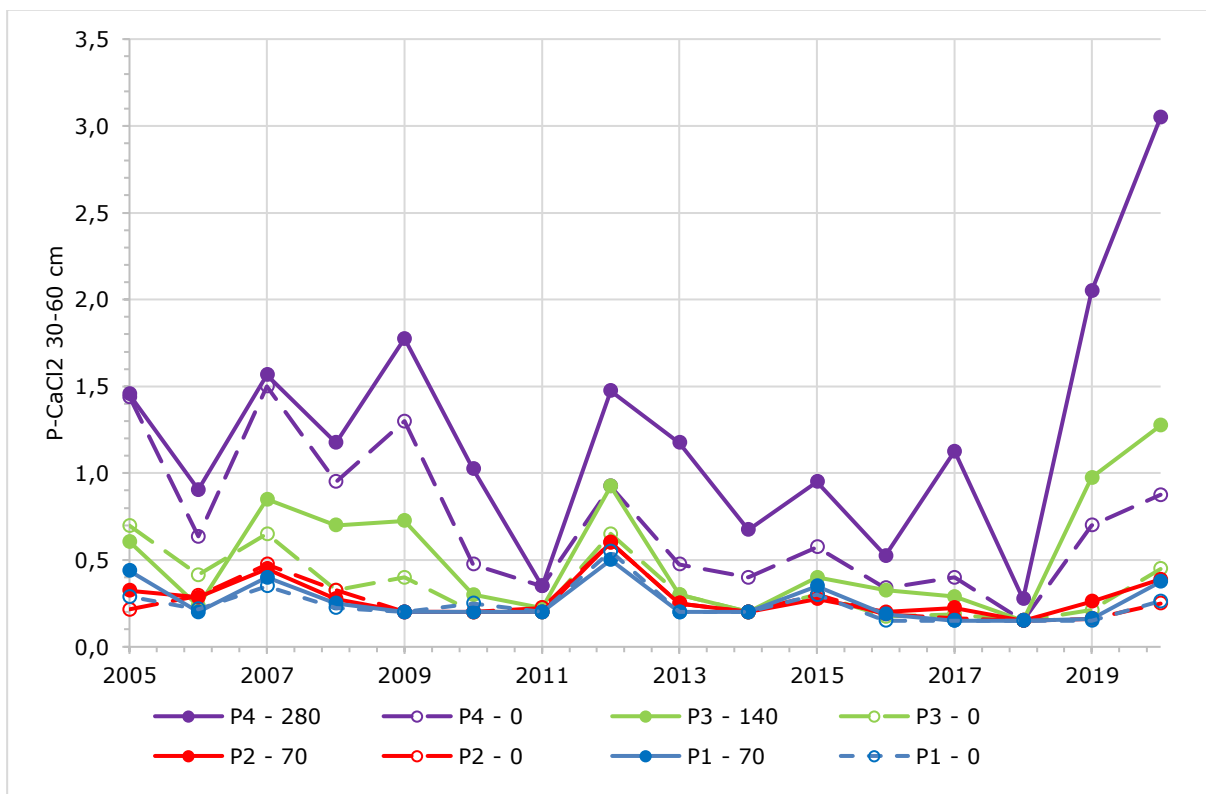
**Figuur 3-12** Het verloop van het P-CaCl<sub>2</sub> getal (mg P/kg) in de laag 0-30cm in de periode 2005-2020 bij vier oplopende niveaus van initiële fosfaattoestanden (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met een jaarlijkse fosfaatgift van 0, 70, 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Gemiddelde van 4 herhalingen.

### 3.5.3.1 Het gemeten fosfaat onder de bouwvoor

In Figuur 3-13 wordt het verloop van het fosfaat gemeten als P-CaCl<sub>2</sub> onder de bouwvoor weergegeven. Hoge fosfaatgiften bij object P4-bemest hebben geleid tot verhoogde P-CaCl<sub>2</sub>-getallen onder de bouwvoor, dit wijst op uitspoeling van fosfaat. In de periode 2005-2020 was de temporele variatie in het P-CaCl<sub>2</sub>-getal onder de bouwvoor hoog waardoor geen trend is af te leiden.

Het fosfaatgehalte bij P4-bemest gemeten met P-CaCl<sub>2</sub> bleef onder de bouwvoor min of meer constant, enkel in 2019 en 2020 werd een toename gemeten. Dit terwijl het P-Al getal in de bouwvoor in die periode verder steeg als gevolg van het continue stijgende cumulatieve overschot. Mogelijk is het overschot dus omgezet naar een stabielere fractie. Voor de bemeste P1 en P2 objecten was het P-CaCl<sub>2</sub> getal onder de bouwvoor gelijk aan de uitmijnveldjes die sinds 1990 niet meer zijn bemest. Dit geeft aan dat er geen sprake is geweest van verplaatsing van fosfaat naar diepere bodemlagen. Het Pw-getal toonde dezelfde uitkomsten.

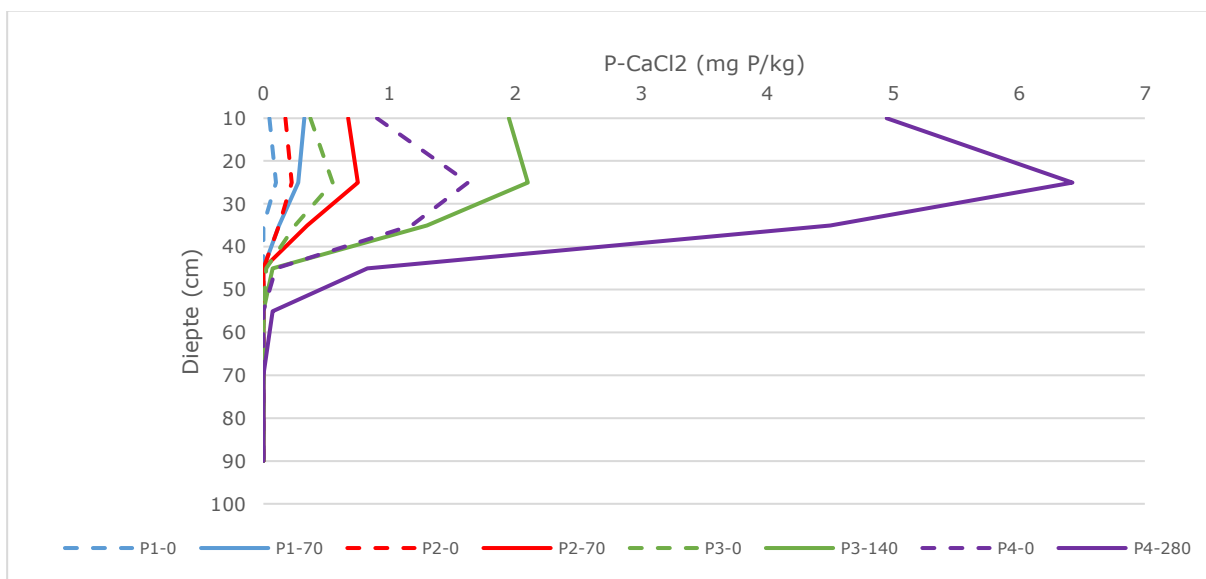




**Figuur 3-13** Het verloop van het P-CaCl<sub>2</sub> getal (mg P/kg) in de laag 30-60cm in de periode 2005-2020 bij vier oplopende niveaus van initiële fosfaattoestanden (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met een jaarlijkse fosfaatgift van 0, 70, 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Gemiddelde van 4 herhalingen.

### 3.5.3.2 Profielbemonstering

In Figuur 3-14 wordt de fosfaatconcentratie van 2018 op verschillende bodemdiepten weergegeven. De fosfaatconcentratie onder de bouwvoor, zoals weergegeven in Figuur 3-13, is op dat moment voor alle objecten laag. In Figuur 3-14 wordt duidelijk dat er in de laag 30-40 cm (net onder de bouwvoor) nog wel een aanzienlijke hoeveelheid direct beschikbaar fosfaat aanwezig is. Het fosfaat dat in diepere bodemlagen (60-100cm) nog aanwezig is, komt niet tot uiting in P-CaCl<sub>2</sub>, bij P-Al was dit wel het geval. Dit betekent dat makkelijk oplosbaar fosfaat diep in de bodem nauwelijks voorkomt, maar wel in fracties die worden gemeten met P-Al. Opgemerkt dient te worden dat 2018 een uitzonderlijk (droog) jaar was.



**Figuur 3-14** De gemeten fosfaatconcentratie op verschillende diepten in 2018. Monsters zijn genomen van de

0-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-80 en 80-100 cm bodemlaag.

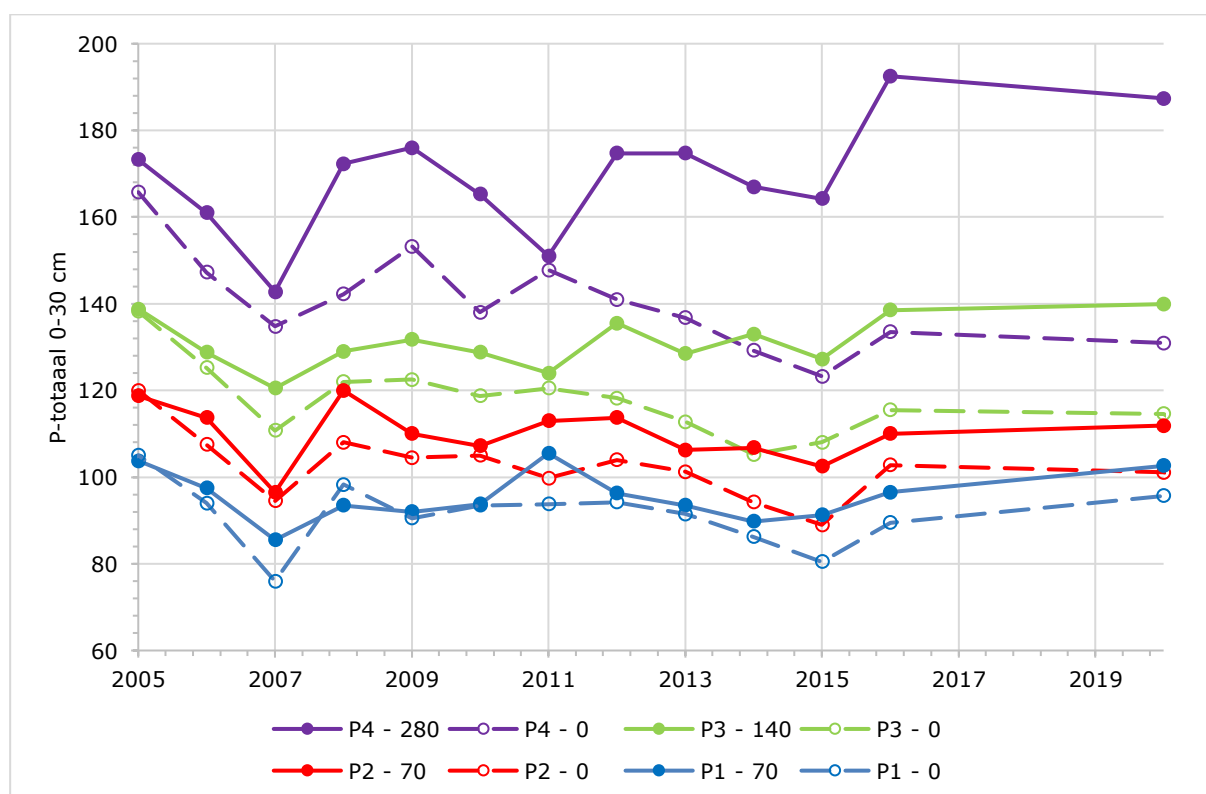
### 3.5.4 De fosfaattoestand gemeten met P-totaal

Het verloop van P-totaal in de bouwvoor wordt weergegeven in Figuur 3-15. In de periode 2017-2019 is geen totaal-fosfaat gemeten volgens de klassieke methode. In 2020 is P-totaal gemeten door het CBLB. De ontwikkeling van P-totaal is lastig te beoordelen op basis van meetwaarden, omdat deze dus ontbreken voor 2017-2019.

Bij een hoge fosfaattoestand (P4) leidde het voortzetten van de fosfaatbemesting tot een verdere toename van P-totaal. Uitmijnen leidde tot een daling. Ook bij P3 leidde het voortzetten van de bemesting tot een toename in P-totaal, al was deze minder sterk dan bij P4. Ook hier leidde uitmijnen tot een daling van de fosfaattoestand. Bij P2 bleef het totaal-fosfaatgehalte gemiddeld genomen op hetzelfde niveau, al is dit moeilijk te beoordelen door de ontbrekende waarden. Uitmijnen leidde wel tot een verandering, de fosfaattoestand daalde. De fosfaattoestanden bij P1-bemest en P1-onbemest lieten geen stijging of daling zien, en bleven min of meer constant. Eenzelfde beeld kwam ook bij de overige fosfaatmetingen naar voren.

Uitmijnen gaf bij alle fosfaattoestanden een lager totaal-fosfaatgehalte ten opzichte van de veldjes waar de fosfaatbemesting werd gecontinueerd.

Het totaal-fosfaat gehalte van de bodem hoort te stijgen indien er sprake is van een cumulatief fosfaatoverschot en te dalen bij een negatief fosfaatoverschot. In de praktijk is het afleiden van trends echter lastig vanwege de fluctuaties in de P-totaal bepaling. Tevens is het zo dat de totale fosfaatvoorraad zeer langzaam verandert omdat de fosfaatvoorraad in het bodemprofiel zeer groot is ten opzichte van de jaarlijkse fosfaatoverschotten.



**Figuur 3-15** Het verloop van P-totaal (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g) in de laag 0-30cm in de periode 2005-2020 bij vier oplopende niveaus van initiële fosfaattoestanden (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met een jaarlijkse fosfaatgift van 0, 70, 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Gemiddelde van 4 herhalingen.

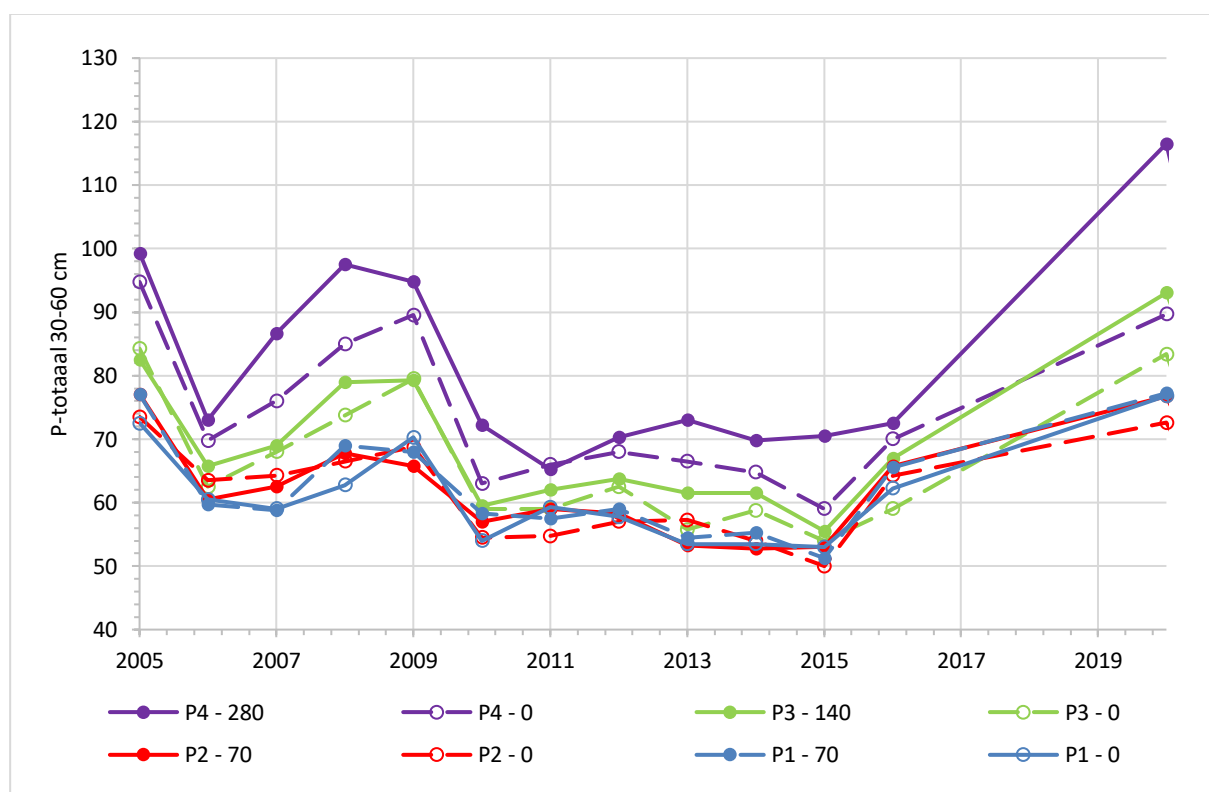
#### 3.5.4.1 Het gemeten fosfaat onder de bouwvoor

Het verloop van P-totaal onder de bouwvoor wordt weergegeven in Figuur 3-16. Als gevolg van de langjarige fosfaatbehandelingen zijn onderscheidenlijke P-totaal gehalten in de ondergrond ontstaan.

Voor een P-totaal meting wordt theoretisch gezien geen jaar-op-jaar fluctuatie verwacht. Een verandering in P-

totaal als gevolg van accumulatie van fosfaat zou zich heel geleidelijk voordoen omdat de totale fosfaatvoorraad in de bodem vele malen groter is dan de jaarlijkse fosfaatoverschotten. Toch worden in 2020 hogere waarden gemeten dan in de periode 2005-2016. Zelfs in objecten waar al 15 jaar geen fosfaat meer wordt bemest, nam P-totaal onder de bouwvoor toe. De totaal-fosfaat analyse werd in 2020 voor het eerst uitgevoerd door het CBLB (voorheen door Eurofins) al lijkt dit geen verklaring te zijn voor de stijging in P-totaal. Immers, alle andere fosfaatindicatoren, namelijk het Pw-getal, P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>, zijn in 2020 eveneens verhoogd ten opzichte van de voorgaande jaren. De oorzaak van de fluctuaties is daarmee niet duidelijk.

Door de temporele variatie in de metingen kunnen de effecten door de opgelegde fosfaatbehandelingen het best beoordeeld worden door een vergelijking te maken met de P1-onbemest veldjes welke sinds 1990 geen fosfaat meer hebben ontvangen. Dan blijkt dat het fosfaatgehalte in de ondergrond bij P1-bemest en P2-bemest niet stijgen ten opzichte van P-onbemest. Bij P4-bemest en P3-bemest is er wel sprake van een verhoging in P-totaal ten opzichte van P1-onbemest. Uitmijnen bij P3 en P4 leidde tot lagere waarden.

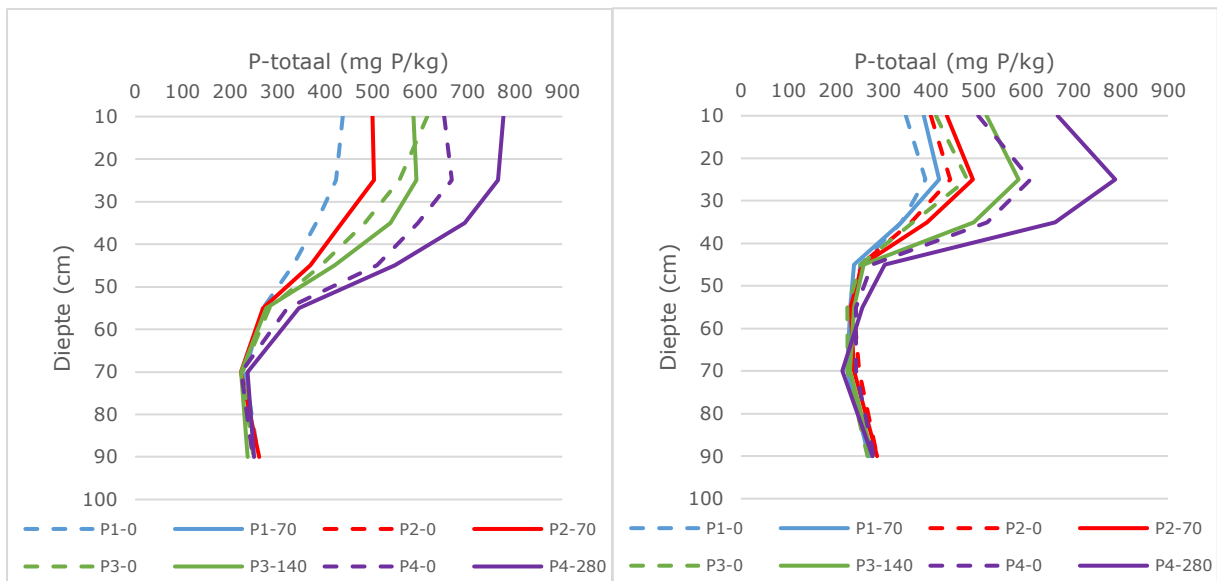


**Figuur 3-16** Het verloop van P-totaal (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g) in de laag 30-60cm in de periode 2005-2020 bij vier oplopende niveaus van initiële fosfaattoestanden (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met een jaarlijkse fosfaatgift van 0, 70, 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Gemiddelde van 4 herhalingen.

### 3.5.4.2 Profielbemonstering

In Figuur 3-17 is de totale hoeveelheid fosfaat in het bodemprofiel weergegeven. Zichtbaar wordt dat de hoeveelheid fosfaat het hoogst is in de bouwvoor en daaronder stek afneemt. In de bouwvoor zijn de verschillen tussen de objecten goed zichtbaar, vanaf een diepte van ongeveer 50cm is er nauwelijks een verschil zichtbaar tussen de objecten, dit is sterker in de meting van 2018 dan van 2009. Waar bij de relatief beschikbare fosfaatfracties (P-CaCl<sub>2</sub> en Pw-getal) nauwelijks fosfaat werd gevonden op een laag dieper dan 60cm, was dit bij P-totaal wel het geval.

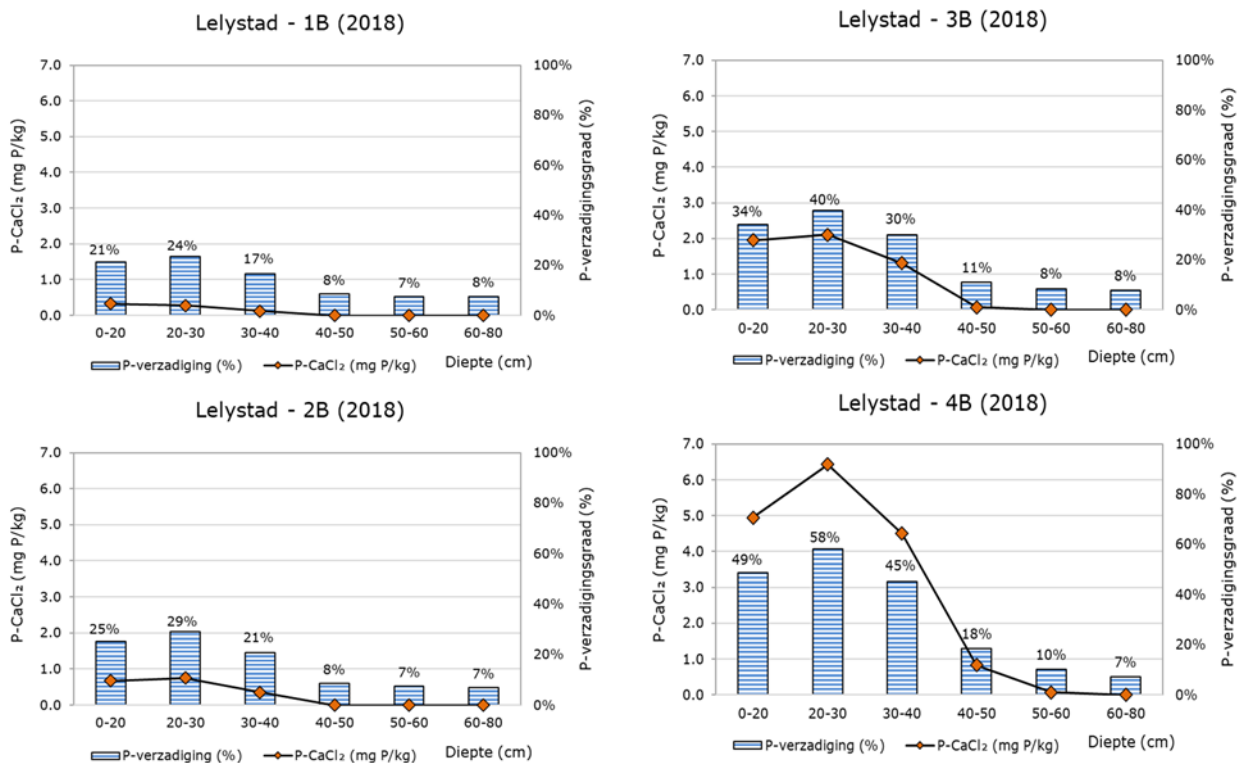
Indien het fosfaatgehalte onder de bouwvoor is verhoogd ten opzichte van de uitmijnbehandelingen, duidt dit op uitspoeling/verplaatsing van fosfaat vanuit de bouwvoor naar de onderliggende lagen. De profielbemonsteringen in 2009 laten zien dat in de bodemlaag van 40-50 cm diepte duidelijk verhoogde fosfaatgehalten worden waargenomen in veldjes met jaarlijks hoge fosfaatgiften. In 2018 daarentegen, zijn de fosfaatgehalten bij de verschillende behandelingen op 40-50 cm diepte nauwelijks onderscheidenlijk. Dit terwijl juist verwacht mag worden dat de verschillen in totaalfosfaat tussen de behandelingen in de loop der tijd toenemen omdat de cumulatieve fosfaatbalansen in de tijd verder uiteen lopen. Dat dit niet wordt waargenomen in de metingen laat zien dat de nauwkeurigheid van de bepalingen beperkt is. Omdat de andere fosfaatindicatoren, met name het P-Al-getal, precies dezelfde trends vertonen wordt de verklaring gezocht in veranderingen van het volume van de bodemlagen door veranderingen in de bulkdichtheid. Dit wordt verder besproken in de discussie.



**Figuur 3-17** De gemeten fosfaatconcentratie op verschillende diepten in 2009 (links) en 2018 (rechts). In 2009 is er niet gemeten aan de objecten P1-70 en P2-0.

### 3.5.5 Fosfaatverzadigingsgraad

Aanvullend is in 2018 de P-ox bepaald. Met deze indicator kan de fosfaatverzadigingsgraad worden berekend, zie Figuur 3-18. Zichtbaar wordt dat P-CaCl<sub>2</sub> sterk correspondeert met de fosfaatverzadiging. Beiden nemen sterk af bij toenemende diepte. De fosfaatverzadigingsgraad was hoger naarmate er meer bemest is. Dit betekent dat het fosfaatoverschot is gaan binden aan aluminium- en ijzer(hydro)oxiden. Bij een verzadigingsgraad van >25% wordt er gesproken van een fosfaat verzadigde grond. Volgens die definitie is de bouwvoor van P2-bemest, P3-



**Figuur 3-18** De fosfaatverzadigingsgraad en het P-CaCl<sub>2</sub>.

bemest en P4-bemest verzadigd. Bij een verzadigingsgraad van hoger dan 30% neemt de bufferende werking doorgaans sterk af, wat P-CaCl<sub>2</sub> sterk stuurt. Ook in Figuur 3-18 wordt duidelijk dat P-CaCl<sub>2</sub> sterk toeneemt bij een verzadigingsgraad boven de 30%.

### 3.5.6 Fosfaat in het bodemvocht

Het fosfaat in het bodemvocht is gemeten op verschillende momenten in de periode 2006-2022, de resultaten worden weergegeven in Figuur 3-19, Tabel 10 en Tabel 11.

. De fosfaatconcentratie in het bodemvocht in de winterseizoenen geeft een indicatie van het risico op uitspoeling van fosfaat naar het grondwater en oppervlaktewater via drains. De gemeten concentraties vertoonden aanzienlijke variatie en fluctuaties in de tijd. In de tabellen zijn de gemiddelde concentraties per object in de winterperiode weergegeven. Hierbij is tevens de standaardfout (s.e.; standard error) vermeld en het aantal metingen (n) waarop het gemiddelde is gebaseerd. Dit aantal was niet steeds bij alle objecten gelijk door ontbrekende meetwaarden, omdat bodemvocht soms niet kon worden afgezogen door droogte of één of andere reden. Doordat het aantal meetmomenten en de meetdatums verschillen tussen de seizoenen, is het lastig om uitspraken te doen over verschillen tussen de seizoenen. Tussen de objecten werden wel verschillen zichtbaar op een diepte van 35cm, waarbij fosfaat in het bodemvocht het hoogst was voor P4-bemest en het laagst voor P1-onbemest. Bovendien is het duidelijk dat de concentratie in het bodemvocht is afgenomen wanneer de fosfaatbemesting bij een hoge toestand is gestopt (P4-onbemest). Door het achterwege laten van fosfaatbemesting bij P4 sinds 2005 leidde al na twee jaar tot een drastische verlaging van de P-PO<sub>4</sub>-concentratie in het bodemvocht vergeleken met het bemeste P4 object. Het verschil bleef ook in de navolgende seizoenen aanwezig. Uitmijnen lijkt daarom een effectieve methode om het risico van fosfaatsuitspoeling te reduceren. De fosfaatconcentratie bij P4-onbemest lag overigens na 15 jaar nog altijd hoger dan het referentie object (P2-bemest). Op een diepte van 75cm waren de concentraties in het bodemvocht erg laag, veelal onder de detectiegrens. Enkel bij P4-bemest werd in één winter de milieunorm overschreden (2009/2010).

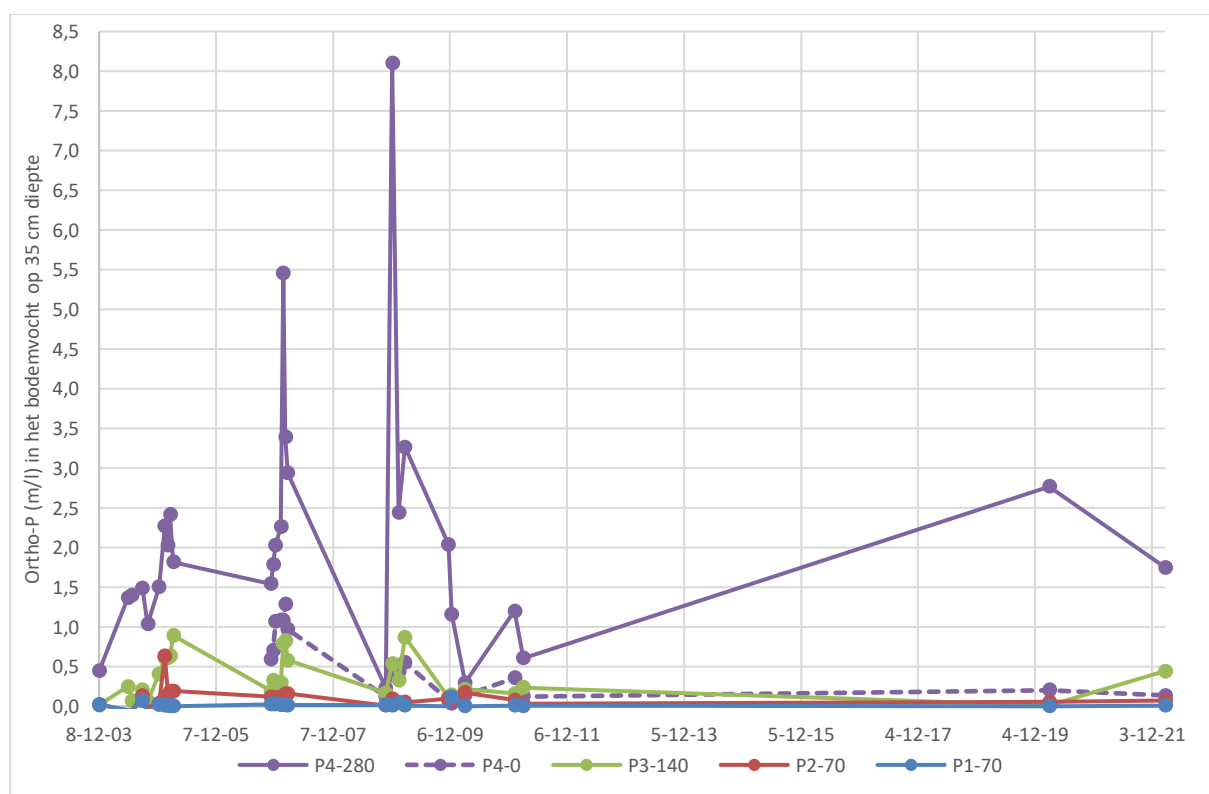
Bij behandeling P4-280 worden hoge concentraties ortho-P in het bodemvocht waargenomen. Uitgaande van een neerslagoverschot van 250 mm geeft een ortho-P concentratie van 4 mg/l een uitspoeling van 10 kg P ha<sup>-1</sup> (22 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>). Dit betekent dat in de loop van de jaren een substantiële hoeveelheid fosfaat is verplaatst naar de onderliggende lagen en aldaar aan de bodem is gebonden. Dit sluit aan bij de geconstateerde verhoogde fosfaatgehalten in de 30-60 bodemlaag bij de veldjes met een hoge fosfaatgift. Zolang de ondergrond nog in staat is om de uitspoelende fosfaat te binden, is er geen meetbaar effect op de fosfaatconcentratie in het bodemvocht op 75cm diepte.

**Tabel 10** Gemiddelde concentraties van ortho-fosfaat (P-PO<sub>4</sub>) in het bodemvocht (mg/l) op 35cm diepte bij vijf fosfaattoestanden.

Winterseizoen	Parameter	P-object				
		P1-0	P2-70	P3-140	P4-280	P4-0
2006/2007	gemiddelde	0,02	0,11	0,38	2,37	1,03
	s.e.	0,003	0,02	0,10	0,31	0,09
	n	16	15	19	17	21
2008/2009	gemiddelde	0,02	0,06	0,46	4,03	0,43
	s.e.	0,01	0,03	0,14	2,13	0,20
	n	13	8	14	13	8
2009/2010	gemiddelde	0,04	0,10	0,16	1,29	0,07
	s.e.	0,04	0,04	0,05	0,61	0,03
	n	6	6	7	7	5
2010/2011	gemiddelde	<0,02	0,06	0,19	0,95	0,26
	s.e.	-	0,02	0,07	0,22	0,09
	n	8	8	7	7	7
2019/2020	gemiddelde	<0,02	0,05	<0,02	2,77	0,21
	s.e.	-	0,03	-	0,41	0,12
	n	4	4	2	4	4
2021/2022	gemiddelde	<0,02	0,07	0,44	1,75	0,14
	s.e.	-	0,05	0,36	0,24	0,04
	n	4	4	4	4	4

**Tabel 11** Gemiddelde concentraties van ortho-fosfaat (P-PO<sub>4</sub>) in het bodemvocht (mg/l) op 75cm diepte bij vijf fosfaattoestanden.

Winterseizoen	Parameter	P-object				
		P1-0	P2-70	P3-140	P4-280	P4-0
2006/2007	gemiddelde	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	*
	s.e.	-	-	-	-	*
	n	25	25	28	27	0
2008/2009	gemiddelde	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	*
	s.e.	-	-	-	-	*
	n	12	12	11	13	0
2009/2010	gemiddelde	<0,02	0,04	0,08	0,28	*
	s.e.	-	0,04	0,03	0,14	*
	n	4	4	11	10	0
2010/2011	gemiddelde	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	*
	s.e.	-	-	-	-	*
	n	5	7	6	6	0
2019/2020	gemiddelde	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02
	s.e.	-	-	-	0,01	-
	n	4	4	4	4	4
2021/2022	gemiddelde	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
	s.e.	-	-	-	-	-
	n	4	4	3	3	4



**Figuur 3-19** De gemeten fosfaatconcentratie (ortho-P) op verschillende momenten in de periode 2003-2022.

### 3.5.7 Bodemindicatoren organische stof

In 2008, 2017, 2018, 2019 en 2020 is er gemeten aan het bodem organisch stof gehalte, de resultaten worden gepresenteerd in Tabel 12. Omdat er enkel werd bemest met kunstmest, is de verwachting dat het bodem organisch stof gehalte zal dalen. In Tabel 12 wordt zichtbaar dat het bodem organisch stof gehalte niet aantoonbaar is gedaald in de periode 2008-2020. Hoewel er in 2017 en 2018 lagere gehalten werden gemeten dan in 2008, zijn de gemeten waarden in 2019 en 2020 vergelijkbaar met 2008. Het is mogelijk dat het bodem organisch stof gehalte in de periode 1990-2008 is gedaald en vervolgens is gestabiliseerd rond de 2,5%. Omdat er geen metingen zijn verricht aan het bodem organisch stof gehalte bij aanvang van de proef is niet vast te stellen of het bodem organisch stof gehalte is veranderd als gevolg van het uitsluitend gebruik van kunstmest.

Bovendien is de verwachting dat bij achterblijvende gewasgroei, zoals zichtbaar werd bij P1, minder gewasresten in de bodem achterblijven wat zou resulteren in een lager bodem organisch (kool)stof gehalte. In Bijlage 6 wordt de hoeveelheid bovengrondse gewasresten weergegeven van de periode 2005-2020. Hieruit blijkt dat hogere fosfaattoestanden en -giften in veel gevallen hebben geleid tot meer gewasresten in vergelijking met de referentie. P2-bemest leidde echter niet tot meer gewasresten dan P1-bemest. Van de onbemeste objecten is te weinig data beschikbaar om een uitspraak over te kunnen doen. Hoewel de hogere fosfaattoestanden en -giften hebben geleid tot meer bovengrondse gewasresten, heeft dat niet geleid tot een aantoonbaar hoger bodem organisch stof gehalte (zie Tabel 12). Gezien de gehele bodemvoorraad aan organische stof in de bouwvoor en de relatief minimale verschillen in organische stof uit bovengrondse gewasresten, kan een aantoonbaar verschil in de bodem organische stof ook niet worden verwacht.

**Tabel 12** Meetresultaten bodem organische stof (%) in de laag 0-30 cm.

		2008	2017	2018	2019	2020
P1	0	2,4	2,2	2,3	2,6	2,4
	70	2,7	2,3	2,4	2,6	2,4
P2	0	2,4	2,1	2,2	2,3	2,5
	70	2,5	2,3	2,3	2,6	2,4
P3	0	2,4	2,3	2,3	2,7	2,5
	140	2,5	2,3	2,3	2,6	2,5
P4	0	2,5	2,3	2,2	2,6	2,5
	280	2,4	2,2	2,4	2,5	2,5

In 2020 is er gemeten aan verschillende bodemindicatoren, de meetresultaten worden gepresenteerd in Tabel 13. Bulkmetingen aan organische koolstof zijn gedaan met de Kurmies methode. Deze resultaten wijzen, net als de meting aan organische stof, niet op een aanzienlijk verschil tussen de objecten. HWC, POXC en DOC worden gezien als indicator voor het bodemleven. De verwachting is dat bij achterblijvende gewasgroei en minder gewasresten in de bodem zou resulteren in minder voeding voor het bodemleven en minder activiteit als gevolg. De gemeten HWC-, POXC- en DOC-waardes bij P1-onbemest waren echter niet lager dan bij de referentie (P2-bemest).

**Tabel 13** Meetresultaten (2020) bodemindicatoren met betrekking tot bodem organische stof.

		P1		P2		P3		P4	
Meting	Laag	0	70	0	70	0	140	0	280
HWC (mg kg <sup>-1</sup> )	0-30cm	276	267	277	251	318	243	256	279
	30-60cm	232	239	238	183	259	208	185	223
POXC (mg kg <sup>-1</sup> )	0-30cm	181	335	265	180	182	170	200	226
	30-60cm	75	209	97	95	213	108	93	111
C-Kurmies (g kg <sup>-1</sup> )	0-30cm	9	10	10	10	11	10	10	10
	30-60cm	7	8	8	7	8	8	8	8
DOC (mg kg <sup>-1</sup> )	0-30cm	41	45	43	41	45	40	43	43
	30-60cm	31	35	33	35	33	35	35	33

### 3.5.8 Samenhang

#### 3.5.8.1 Tussen de classificaties van bodems op fosfaattoestand

Door de historische bemesting zijn er verschillen in fosfaattoestand en daarmee fosfaatgebruiksnorm ontstaan. Door de jaar-tot-jaar variatie in de metingen ontstaan er mogelijk ook jaar-tot-jaar verschillen in de fosfaatgebruiksnorm. In **Tabel 14** wordt de fosfaatgebruiksnorm op basis van het Pw-getal en P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> in beeld gebracht. Hieruit blijkt dat met de gecombineerde indicator (o.b.v. P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>) de fosfaatklasse lager wordt beoordeeld dan met het oude systeem (o.b.v. het Pw-getal). Dit heeft consequenties voor de fosfaatgebruiksnorm. Op basis van de nieuwe systematiek mag er meer fosfaat worden aangevoerd bij vrijwel alle objecten, met uitzondering van de uiterste objecten (P1-onbemest en P4-bemest). Dit komt doordat de gronden in Lelystad een relatief laag P-Al getal hebben ten opzichte van het Pw-getal. Op de kalkrijke zavelgronden komt het historisch opgebouwde fosfaatoverschot niet volledig tot uiting in het P-Al-getal, wat leidt tot een lagere waardering van de fosfaattoestand ten opzichte van de beoordeling op basis van het Pw-getal (Regelink et al., 2021). Bovendien is de fosfaatgebruiksnorm op basis van het Pw-getal gevoeliger voor jaar-tot-jaar variatie dan op basis van P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>, zie Tabel 14.

**Tabel 14** Fosfaatgebruiksnorm in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, op basis van twee stelsels.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	<i>Op basis van het Pw-getal</i>															
P1-0	120	80	120	120	120	120	80	120	120	120	120	120	120	120	120	120
P1-70	80	80	80	120	120	80	60	80	120	120	80	80	80	120	80	120
P2-0	60	60	70	80	80	80	70	80	120	120	120	80	120	120	120	120
P2-70	60	60	70	70	70	70	60	60	70	80	70	70	70	80	70	80
P3-0	40	40	60	70	60	60	40	60	70	120	70	70	70	80	70	120
P3-140	40	40	40	40	40	40	40	40	40	60	40	40	40	40	40	40
P4-0	40	40	40	40	40	40	40	40	40	60	40	40	40	40	60	70
P4-280	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	<i>Op basis van de gecombineerde indicator P-Al en P-CaCl<sub>2</sub></i>															
P1-0	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
P1-70	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
P2-0	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
P2-70	80	80	120	80	120	120	120	80	120	120	120	120	120	120	120	120
P3-0	60	60	80	70	80	80	70	80	120	120	120	120	120	120	120	120
P3-140	60	60	60	60	40	60	70	60	40	70	60	40	60	60	60	40
P4-0	40	40	40	40	40	40	40	60	40	70	70	60	60	70	60	70
P4-280	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Klassen indeling:

40	Hoog
60	Ruim
70	Neutraal
80	Laag
120	Arm

### 3.5.8.2 Tussen de metingen van verschillende fosfaatfracties

De fosfaattoestand van de bodemlagen 0-30 en 30-60 cm laten een grillig verloop zien. Dit grillige verloop wordt zowel bij het Pw-getal als bij P-CaCl<sub>2</sub> en P-totaal gevonden, P-Al lijkt iets minder fluctuatie te geven. De richting van een wijziging in fosfaattoestand komt bij alle drie analysemethodes min of meer overeen, een uitzondering daarop is object P4-bemest. Opvallend is dat er bij de hoge bemesting bij object P4 in de laag 0-30 cm geen verdere toename wordt gevonden in het P-CaCl<sub>2</sub> getal, terwijl er een lichte toename werd gevonden voor het Pw-getal, en een sterkere toename zichtbaar werd in het P-Al getal. Dit wordt zichtbaar in het afwijkende verband tussen P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> in Bijlage 7, bij een hogere P-Al is P-CaCl<sub>2</sub> niet meer hoger vanaf ~ P-Al 70. Dit duidt erop dat het overschot aan (verse) bemesting werd vastgelegd in de bodemvoorraad, dit betekent dat label fosfaat werd omgezet in stabiele fracties. Bij een alsmaar oplopend fosfaatoverschot wordt de fractie P-Al van P-totaal dus groter.

Verder valt op dat de fosfaattoestand bij P2-bemest (licht) daalde wanneer gemeten met Pw, P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>, terwijl P-totaal geen sterke daling liet zien. Omdat de P-totaal waarden van 2017-2019 ontbreken, kunnen hier geen harde conclusies aan verbonden worden.

Bij een lage fosfaattoestand (P1) leidde de bemesting, na jarenlang uitmijnen, niet tot een toename van het Pw-getal, de P-AL, de P-CaCl<sub>2</sub> of P-totaal. Mogelijk werd het via bemesting toegediende fosfaat grotendeels opgenomen door het gewas. Het fosfaatoverschot van gemiddeld 13 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> leidde dus niet tot een toename in de fosfaattoestand.

Bij de laagste fosfaattoestand en -bemesting (P1-onbemest) nam de fosfaattoestand gemeten met het Pw-getal, P-Al, P-CaCl<sub>2</sub> en P-totaal af in de periode 2005-2020, al was de verandering beperkt. Dat de verschillende fosfaatfracties geen sterke daling laten zien, kan wijzen op een nalevering uit anorganische bodemfracties die niet met de methoden van de bepaling van het Pw-getal of het P-Al-getal kunnen worden vastgesteld en mogelijk op een bijdrage door fosfaatmineralisatie uit organische stof.



Voor het uitmijnen geldt dat er in de laag 0-30 cm een afname is gevonden in zowel het Pw-getal, P-Al als P-CaCl<sub>2</sub>. Deze afname wordt het duidelijkst zichtbaar bij P-CaCl<sub>2</sub>, P-Al liep minder sterk terug. Ook lijkt het P-CaCl<sub>2</sub> getal bij de start van het uitmijnen direct te zakken, terwijl dit het P-Al getal meer geleidelijk lijkt te verlopen. Bij een oplopend fosfaattekort wordt de fractie P-CaCl<sub>2</sub> van P-totaal dus kleiner dan voor P-Al het geval is. Dit zou betekenen dat er bij het onthouden van een fosfaatbemesting eerst het plant beschikbare fosfaat (gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>) afneemt en gelijktijdig het fosfaat in de bodemvoorraad geleidelijk afneemt. P-CaCl<sub>2</sub> reageert dus sterker op uitmijnen dan P-Al. Omdat P-Al langzamer zakt, zijn na verloop van tijd de verschillen in bemestingshistorie tussen de objecten beter zichtbaar in P-Al dan in P-CaCl<sub>2</sub>.

Hieruit valt af te leiden dat er verschuivingen in fosfaatfracties plaatsvinden. Bij oplopende fosfaatbemesting werd de verse fosfaatbemesting omgezet in stabiele bodemfracties (P-totaal nam toe terwijl P-CaCl<sub>2</sub> min of meer constant bleef). Opvallend is wel dat P-CaCl<sub>2</sub> bij P3 op een lager niveau stabiliseerde dan bij P4, de jaarlijkse fosfaatgift is dus van belang waar P-CaCl<sub>2</sub> zal stabiliseren. Bij uitmijnen nam de beschikbare fractie sterker af, waardoor de verhouding tussen de fracties veranderde.

In het Pw-getal in zowel de laag 0-30 als 30-60cm worden de verschillen tussen de objecten zichtbaar. Het Pw-getal in de laag 0-30 en 30-60cm vertoonden een vergelijkbaar verloop, enkel bij P2-bemest valt op dat deze in de laag 0-30cm lijkt te blijven zakken, door grote jaar-tot-jaar fluctuaties in de laag 30-60cm is moeilijk af te leiden of deze daalde. Opvallend is dat het Pw-getal in de laag 0-30cm sterker lijkt te reageren op de onbemeste objecten dan in de laag 30-60cm. Zo komt het fosfaatgehalte in de laag 0-30cm bij P4-onbemest na verloop van tijd onder die van P3-bemest te liggen en P3-onbemest onder P2-bemest. In de laag 30-60cm blijft er langer een onderscheid zichtbaar blijft tussen P4-onbemest en P3-bemest en tussen P3-onbemest en P2-bemest. Dit duidt erop dat het effect van uitmijnen in de laag 30-60cm trager tot uiting komt in vergelijking met de laag 0-30cm. Ditzelfde effect is zichtbaar bij P-Al, het uitmijnen komt sterker tot uiting in de laag 0-30 dan in 30-60cm. Opvallend is dat P-Al bij P4-bemest toeneemt in de laag 0-30cm terwijl deze afneemt in de laag 30-60cm. Ook bij P-CaCl<sub>2</sub> komt het uitmijnen beter tot uiting in de bouwvoor dan daaronder.

### 3.5.8.3 In het bodemprofiel

In 2009 en 2018 is de fosfaatconcentratie in het bodemprofiel gemeten tot op 100cm. De verdeling van het fosfaat in het bodemprofiel vertoont een vergelijkbaar verloop voor de verschillende fosfaatfracties, waarbij de fosfaatconcentratie in de laag 20-30cm het hoogst is, gevolgd door 0-20cm, onder de 30cm neemt de concentratie af met de diepte. Opvallend is dat met minder makkelijk extraheerbare fracties (P-Al; P-ox; P-totaal) in de laag 80-100cm meer fosfaat wordt gemeten dan in de 20cm daarboven.

In 2009 was het verschil tussen de objecten zichtbaar in elke fosfaatfractie en in elke bodemlaag. Bij een hogere bemesting werd een hogere fosfaatconcentratie gevonden, tot op 60-70cm diepte. Ehlert et al. (2018) hebben in diezelfde periode (2003-2011) gemeten aan de fosfaatconcentratie in het bodemvocht. Zij vonden een sterke relatie tussen de bemesting en de fosfaatconcentraties op 35cm diepte, op 75cm zagen ze dit effect niet meer. Ditzelfde effect werd zichtbaar in 2009 en 2018, in de laag 30-40cm was het verschil tussen de objecten duidelijk zichtbaar. Op 75cm werd nauwelijks een verschil gemeten in de fosfaatconcentratie tussen de objecten, ook tussen wel of niet bemesten werd geen verschil zichtbaar. Aan de resultaten van de profielbemonstering in 2018 mogen geen algemene conclusies worden verbonden, aangezien er in dat jaar een uitzonderlijk lage fosfaatconcentratie is gemeten onder de bouwvoor (zie Figuur 3-7 en Figuur 3-10).

## 3.6 Wijzigingen in de fosfaattoestand als functie van het fosfaatoverschot

In Bijlage 10 is de verandering in de fosfaattoestand geplot als functie van het jaarlijkse fosfaatoverschot (vergelijkbaar met de aanpak van Amery et al., 2021) en in Bijlage 11 is de fosfaattoestand geplot ten opzichte van het cumulatieve fosfaatoverschot. In Bijlage 10 wordt dit voor zowel het Pw-getal, P-Al als P-CaCl<sub>2</sub> gepresenteerd. De verwachting is dat de fosfaattoestand zal stijgen bij een overschot op de fosfaatbalans dat groter is dan het onvermijdbare verlies en de toestand zal dalen bij een overschot op de fosfaatbalans dat lager is dan het onvermijdbare verlies of een tekort op de fosfaatbalans.

Er komt geen eenduidig verband naar voren wanneer de jaarlijkse verandering in de fosfaattoestand wordt geplot ten opzichte van het jaarlijkse fosfaatoverschot (zie Bijlage 10). Dit gold voor het Pw-getal, P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>. Het is zinvoller om dit over een langere periode te bekijken.

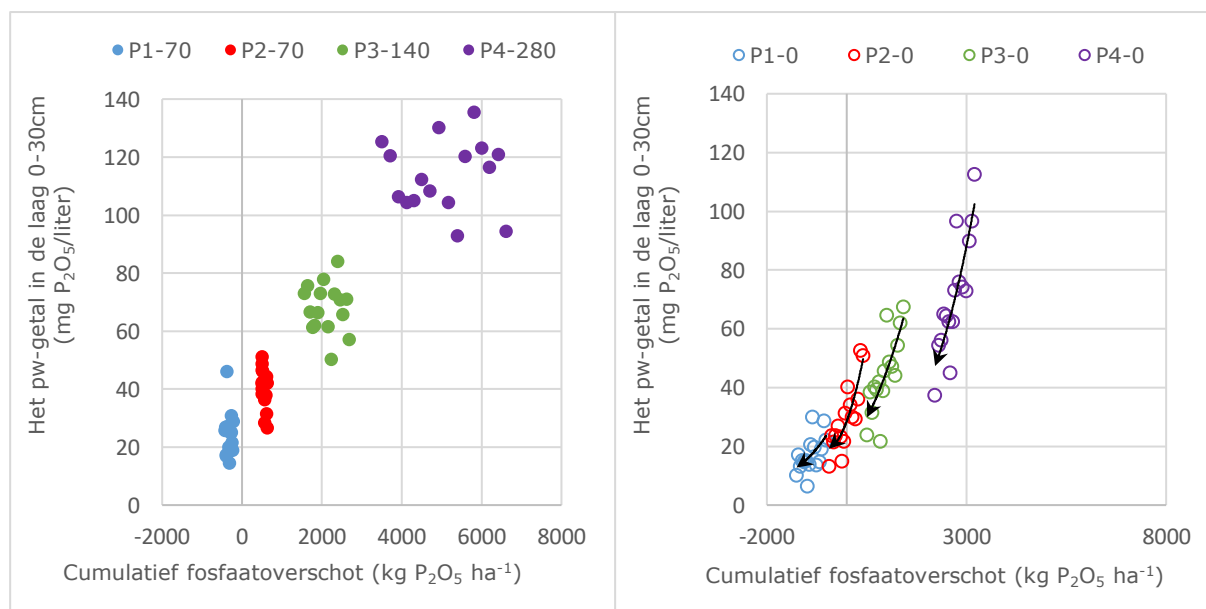
In Figuur 3-20 wordt het verband tussen het cumulatief fosfaatoverschot en de fosfaattoestand inzichtelijk gemaakt voor het Pw-getal. In dit figuur wordt duidelijk dat een hoger cumulatief overschot samenhangt met een hogere fosfaattoestand. Van Wijk et al. (2013) gaven aan dat de ontwikkeling van het Pw-getal op basis van het cumulatief fosfaatoverschot met een rechtlijnig verband per fosfaattoestand kan worden beschreven. Op basis van Figuur 3-20 lijkt dit effect sterker voor de onbemeste dan voor de bemeste objecten, bij de bemeste objecten

wordt dit verband in de laatste 15 jaar namelijk niet zichtbaar. Bij een hoge fosfaattoestand en bemesting (P4-bemest) lijkt een hoger overschot niet te leiden tot een sterke verhoging van het Pw-getal, dit is in lijn met de bevinding in paragraaf 3.5.1.1. Bij P2-bemest wordt zelfs zichtbaar dat een hoger cumulatief bodemoverschot gepaard gaat met een lager Pw-getal. Ook uit de laatste vier figuren in Bijlage 11 wordt zichtbaar dat het verloop van de fosfaattoestand (gemeten met het Pw-getal) sterker verband houdt met het cumulatieve fosfaatoverschot voor de onbemeste dan voor de bemeste objecten.

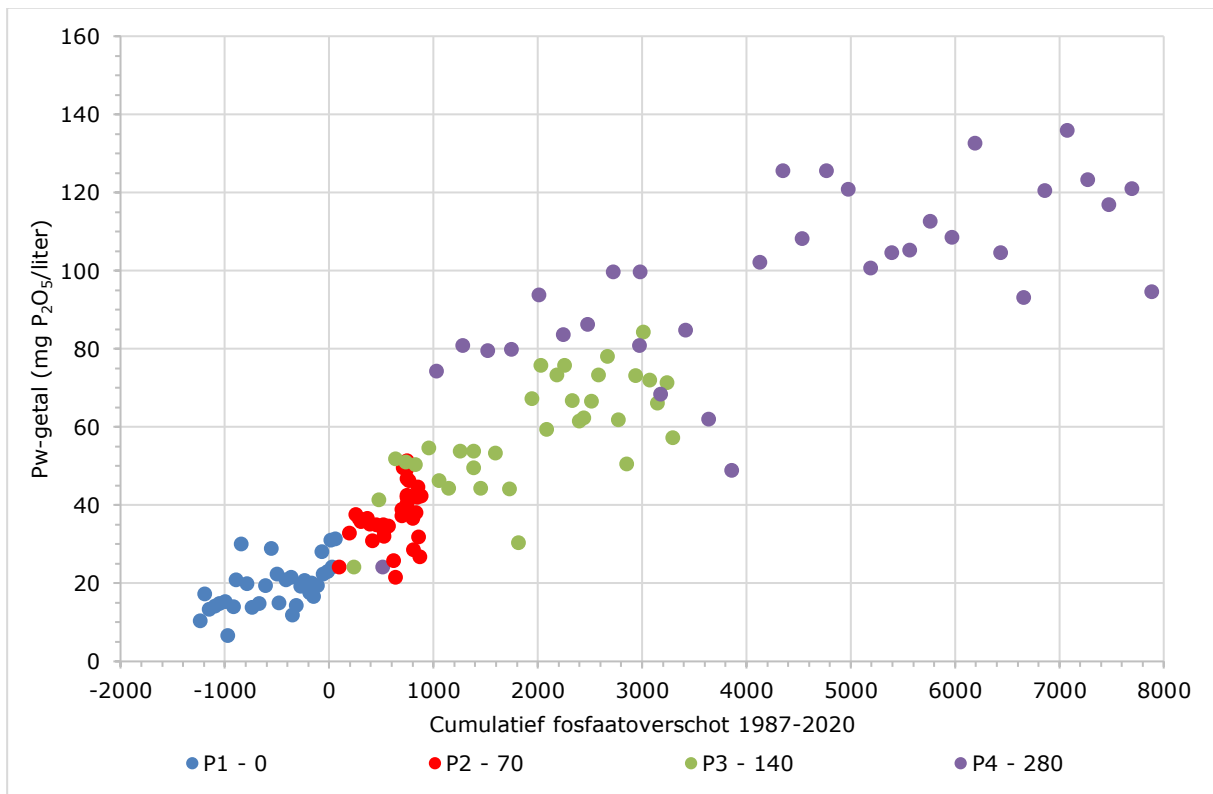
Bij de objecten P4-onbemest en P3-bemest komen de cumulatieve overschotten steeds dichterbij elkaar te liggen, en hebben in 2017 een zeer vergelijkbaar cumulatief overschot (respectievelijk 2425 en 2442 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>). Dit is terug te zien in de meetdata, het Pw-getal van de twee objecten komt na verloop van tijd dichterbij elkaar te liggen en kruisen in 2013. Ook P3-onbemest en P2-bemest hebben een vergelijkbaar cumulatief fosfaatoverschot en ook hier komt dit terug in de gemeten fosfaattoestand met het Pw-getal.

Dat bij bemesting de fosfaatoverschotten van de laatste 15 jaar niet hebben geleid tot een sterke toename van de fosfaattoestand gemeten met het Pw-getal, komt mogelijk doordat de bemestingsstrategieën hebben geleid tot stabilisatie (i.e. de fosfaattoestand stijgt niet verder bij het fosfaatoverschot). Om na te gaan of de fosfaattoestanden zijn gestabiliseerd (bij een constante fosfaatbemesting), is de fosfaattoestand uitgezet tegen het cumulatieve fosfaatoverschot van een langere periode (1987-2020), zie Figuur 3-21. Bij het onbemeste object (P1-onbemest) lijkt het Pw-getal zich nog niet te stabiliseren in deze periode. Ook bij P2 lijkt dit niet het geval, van een afvallende toename is geen sprake. De laatste 15 jaar ligt het Pw-getal iets hoger dan in de eerste periode, maar neemt vervolgens weer af. Bovendien is het bereik van het fosfaatoverschot bij dit object minder groot dan bij de andere objecten, wat betekent dat deze bemestingsstrategie min of meer overeenkomt met evenwichtsbemesting. Ook bij P3 lijkt er sprake van twee periodes. In de periode 1987 tot 2000 nam het Pw-getal licht toe, in 2000 en 2001 is het Pw-getal fors lager en vanaf dan lijkt het Pw-getal zich op een hoger niveau te stabiliseren. Ditzelfde speelt ook bij P4, de laatste 15 jaar ligt het Pw-getal hoger dan in de eerste periode, maar lijkt in deze laatste 15 jaar niet sterk toe te nemen. Kort samengevat lijkt er nog geen sprake te zijn van stabilisatie van het Pw-getal, een hoger cumulatief overschot leidt na ~15 jaar nog beperkt tot een hoger Pw-getal. Bij P2 lijkt het Pw-getal de laatste 15 jaar in lichte mate zakken. Ook bij de uitmijnveldjes (P2, P3 en P4) heeft de fosfaattoestand zich na 15 jaar nog niet gestabiliseerd (zie Figuur 3-20).

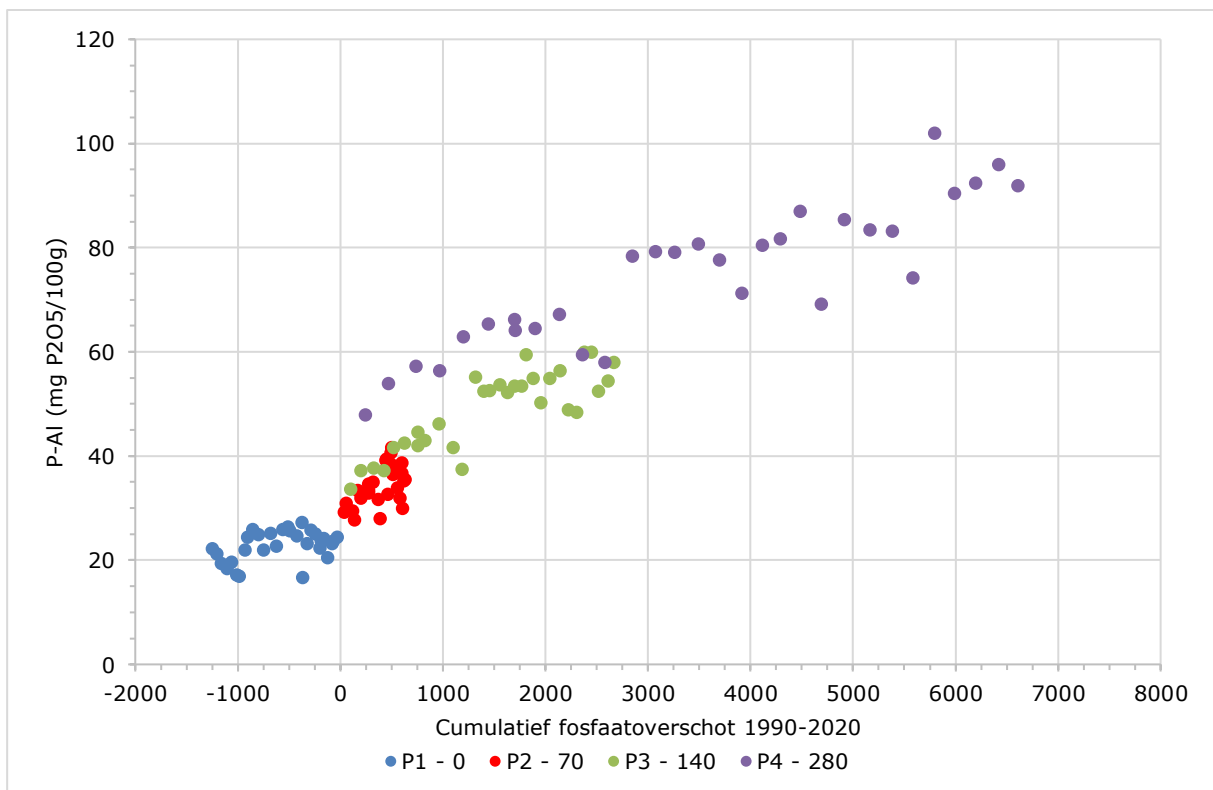
Voor de fosfaattoestanden gemeten met P-Al gelden deze bevindingen niet (zie Figuur 3-22). P-Al lijkt bij P3 en P4 nog steeds toe te nemen, van een afvlakking lijkt geen sprake. Voor P-CaCl<sub>2</sub> en P-totaal zijn de tijdsreeksen van 1987-2020 of 1990-2020 niet beschikbaar.



**Figuur 3-20** De fosfaattoestand, gemeten als Pw-getal, uitgedrukt ten opzichte van het cumulatieve fosfaatoverschot (2006-2020), links bemest en rechts onbemest vanaf 2005.



**Figuur 3-21** De fosfaattoestand, gemeten als Pw-getal, uitgedrukt ten opzichte van het cumulatieve fosfaatoverschot (1987-2020).



**Figuur 3-22** De fosfaattoestand, gemeten als P-AI, uitgedrukt ten opzichte van het cumulatieve fosfaatoverschot (1990-2020).

## 3.7 Omzettingen en verliezen

In Bijlage 12 wordt de gemeten verandering van de fosfaattoestand (in P-CaCl<sub>2</sub>, P-Al en P-totaal) geplot ten opzichte van de verwachte (berekende) toename op basis van het jaarlijkse fosfaatoverschot (2005-2020). Het verschil tussen de verwachte (berekende) toename en de daadwerkelijke toename van P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al geeft inzicht in de omzetting naar andere/stabielere fracties en de ondergrond. Het verschil tussen de verwachte toename en daadwerkelijke toename van P-totaal geeft inzicht in de eventuele verliezen naar diepere lagen en het grond- en oppervlakte water.

Uit de figuren in Bijlage 12 wordt duidelijk dat een fosfaatoverschot niet leidde tot een hogere P-CaCl<sub>2</sub>, maar waarschijnlijker tot omzetting naar stabielere fracties. Wat P-Al betreft worden er verschillen zichtbaar tussen de objecten. Bij de lagere fosfaattoestanden en -overschotten (P1 en P2) liep het te verwachte P-Al getal vrijwel gelijk aan de meetpunten. Het fosfaatoverschot kwam voor een groot deel tot uiting in P-Al. Bij een hoger fosfaatoverschot (P3 en P4) kwam dit niet geheel tot uiting in P-Al, waarschijnlijk door omzetting naar nog stabielere fosfaatvormen of verliezen. Dit is in lijn met de bevindingen van Regelink (2021). Bij P-totaal was het verschil tussen het overschot en de te verwachte P-totaal in de laag 0-60cm 26, 477, 490 en 1424 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> respectievelijk voor P1-bemest, P2-bemest, P3-bemest en P4-bemest. Voor P1 en P2 is dit relatief gezien verwaarloosbaar. Voor P3 en P4 is dit bijna de helft van het fosfaatoverschot. Waarom een groot deel van het fosfaatoverschot niet terugkomt in de bodemvoorraad 0-60cm gemeten met P-totaal is niet geheel duidelijk. Een deel van het overschot is terug te vinden in lagen dieper dan 60cm (zie Figuur 3-17). Daarnaast is het mogelijk dat er, met name bij de hogere overschotten, verliezen naar het oppervlakte- of het grondwater zijn opgetreden. Bij de hoge fosfaattoestanden worden inderdaad verhoogde fosfaatconcentraties in het bodemvocht aangetroffen al is dit na omrekening niet meer dan 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> voor P4-bemest en kan daarmee niet bovenbeschreven verschillen verklaren. Ook de meetfout in de meting van bodemfosfaat (grote verschillen tussen herhalingen en in de tijd) en andere onzekerheden zoals in de fosfaatvoer, spelen hierbij een rol. Ook in andere fosfaatproeven wordt geconstateerd dat het niet mogelijk is om een goed sluitende massabalans voor fosfaat op te stellen (Holwerda et al., 2023). De variatie tussen de veldjes i.c.m. de meetfout spelen daarbij ook een belangrijke rol.

## 3.8 Gewasopbrengsten als functie van de fosfaattoestand en -bemesting

Uit paragraaf 3.1 wordt duidelijk dat gemiddeld gezien over de periode 2005-2020 de opbrengst hoger was naarmate de fosfaattoestand hoger was, dit gold voornamelijk voor de fosfaatbehoefte gewassen (aardappel, zaaiui en suikerbiet) en in mindere mate voor de peen, wintertarwe en zomergerst (zie Figuur 3-1). De opbrengst is echter uitgedrukt als gemiddelde over de periode 2005-2020 en per fosfaatobject, in plaats van de fosfaattoestand. De samenhang tussen de fosfaattoestand en -bemesting en de gewasopbrengst, wordt per jaar en gewas weergegeven in Bijlage 13. Hieronder volgt een korte omschrijving.

De samenhang tussen de fosfaattoestand en gewasopbrengst wordt vooral duidelijk voor de aardappel, met name in de onbemeste objecten. Hoe hoger het Pw-getal, hoe hoger de opbrengst. Voor zowel de bemeste als onbemeste objecten lijkt dit af te vlakken naarmate de fosfaattoestand hoger werd. Dit werd sterker zichtbaar bij de bemeste dan bij de onbemeste objecten. Zonder (verse) bemesting is de fosfaattoestand dus van groter belang dan bij een jaarlijkse bemesting. Bovendien verschilde alleen de opbrengst van P1 significant van P2. Dit betekent dat er vanaf een Pw-getal van grofweg 40 geen significant hogere opbrengst werd behaald. Ook voor de zaaiui nam de gewasopbrengst toe naarmate het Pw-getal hoger was, bij de zaaiui is te zien dat de gewasopbrengst afvlakt naarmate het Pw-getal hoger was (met uitzondering van 2013-bemest). Ook hier geldt dat de opbrengsten van bij de hoge fosfaattoestanden (P3 en P4) niet significant verschilden van P2, een maximale opbrengst kan dus worden behaald bij Pw 37-45 en een fosfaatgift van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. In mindere mate komt dit beeld ook bij de peen en de onbemeste objecten van de wintertarwe naar voren. De opbrengst van de zomergerst lijkt minder gevoelig voor het Pw-getal. In de opbrengst van de suikerbiet komt geen eenduidig beeld naar voren.

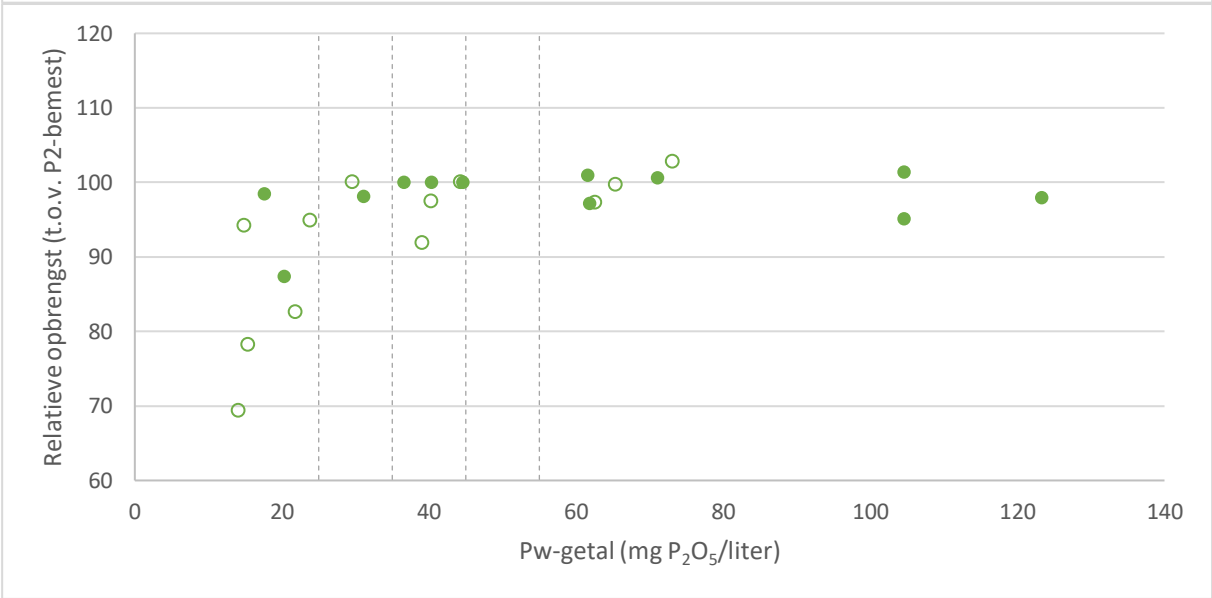
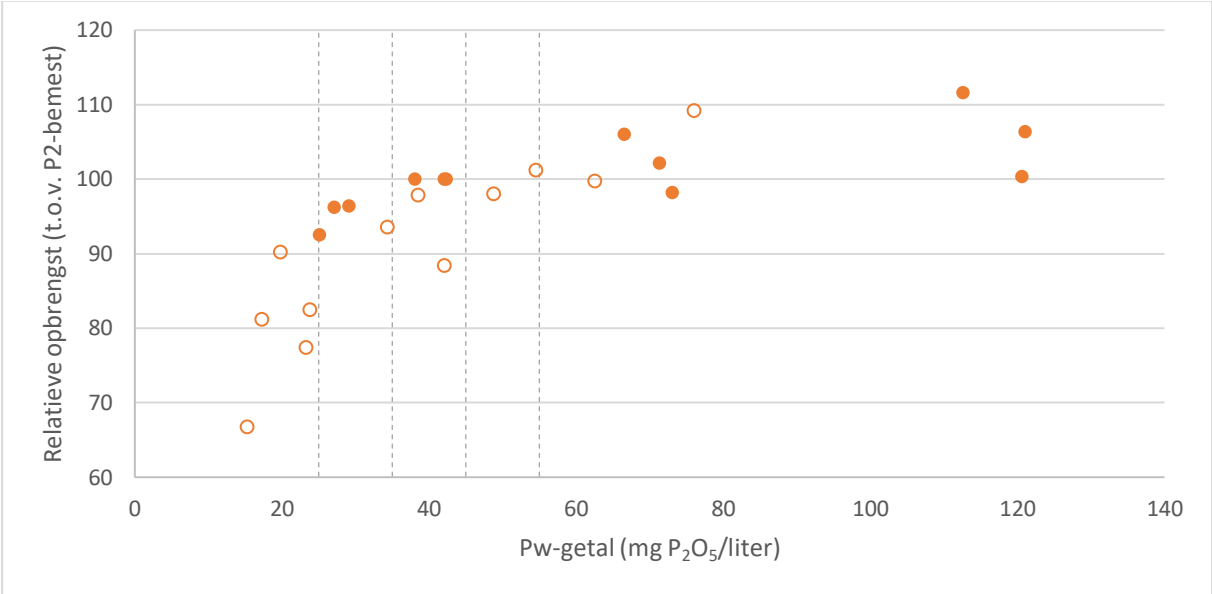
Het beeld dat naar voren komt op basis van het Pw-getal is vergelijkbaar met het beeld op basis van P-Al en P-CaCl<sub>2</sub>, dit komt enerzijds doordat er dezelfde waarden op de y-as staan en mogelijk doordat de ontwikkeling in de fosfaattoestand bij de drie meetmethoden min of meer gelijk is (zie paragraaf 3.5.8.2).

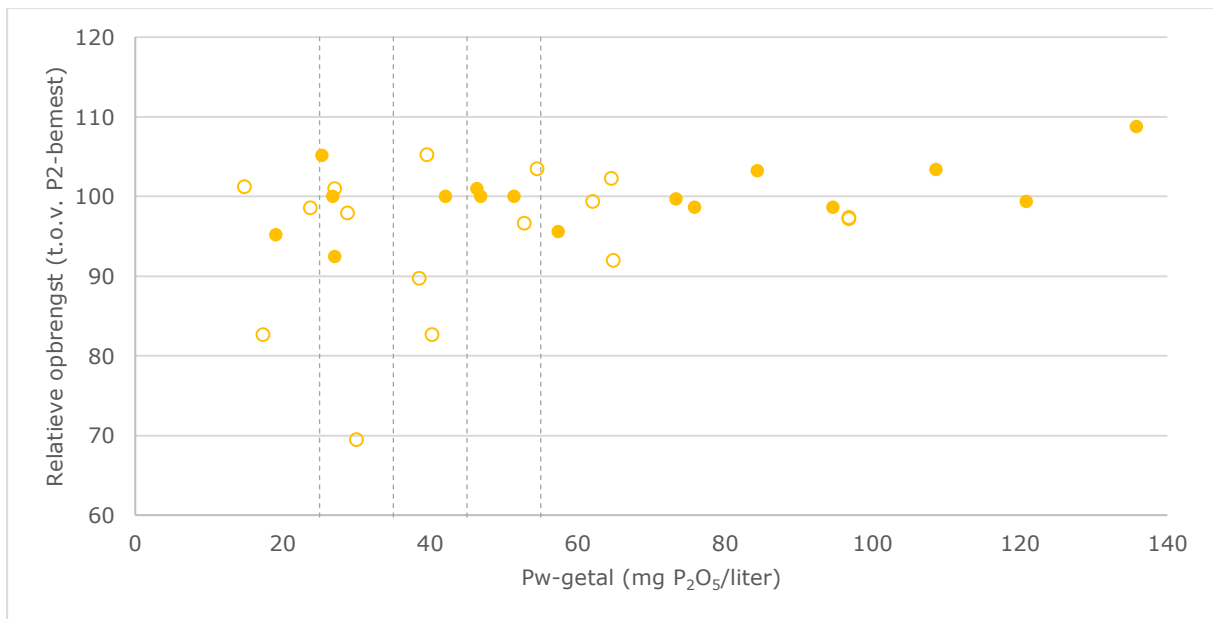
### 3.8.1 Fosfaattoestand of -bemesting?

In Figuur 3-23 wordt de relatieve opbrengst (t.o.v. P2-bemest) per gewas uitgezet tegen de fosfaattoestand (uitgedrukt in het Pw-getal), hierdoor wordt inzichtelijk of bij eenzelfde fosfaattoestand bemesting leidt tot hogere opbrengsten. Uit dit figuur is af te leiden dat bij een Pw-getal <45 een bemesting gepaard gaat met een hogere gewasopbrengst bij gewasgroep 1 (aardappel en ui). Hieruit valt af te leiden dat een lage fosfaattoestand gecompenseerd kan worden door een fosfaatgift. Bij zeer lage toestanden (Pw-getal <25) is dit moeilijk vast te

stellen omdat er in deze toestand nauwelijks datapunten van bemeste objecten beschikbaar zijn, met name bij aardappel. Bij uien lijkt een hogere fosfaattoestand en -bemesting geen opbrengstverhoging plaats te vinden. Bij aardappel is dit twijfelachtig, een hogere fosfaattoestand- en bemesting lijkt te leiden tot een hogere opbrengst. Door het beperkt aantal datapunten is moeilijk af te lezen of ook bij deze hoge toestanden een bemesting nog leidt tot een hogere opbrengst. Bij gewasgroep 2 (suikerbieten) was dit in mindere mate het geval. Bij de lagere toestanden lijkt bemesting in een aantal gevallen wel tot een hogere opbrengst te leiden, net als bij gewasgroep 1 was dit bij de hogere fosfaattoestanden niet het geval. Kortom, zonder (verse) bemesting speelt de fosfaattoestand een grotere rol bij de gewasopbrengsten. Voor gewasgroepen 3 en 4 waren de opbrengsten niet hoger bij bemesting dan zonder bemesting, ook niet bij de lage fosfaattoestanden (data niet weergegeven).

Voor twee fosfaatniveaus kan een gerichtere vergelijking worden gemaakt. Vanaf 2011 lag de fosfaattoestand van P2-onbemest namelijk op hetzelfde niveau als P1-bemest (Pw-getal rond de 25). Uit de opbrengstcijfers blijkt dat de aardappelopbrengsten van P1-bemest significant hoger waren dan voor P2-onbemest. Dit geeft aan dat een fosfaatbemesting bij een dergelijke fosfaattoestand van belang is voor de aardappel. Voor de ui en suikerbiet was dat niet het geval. De fosfaattoestand van P3-onbemest en P2-bemest lag vanaf 2012 rond hetzelfde niveau (Pw-getal rond de 40). In deze periode was alleen de aardappelopbrengst in 2015 lager dan bij P3-onbemest dan bij P2-bemest, voor de overige gewassen en jaren was dit niet het geval. Dit bevestigt dat het onthouden van een fosfaatbemesting opbrengstderving kan geven bij het zeer fosfaatbehoefteige gewas aardappels bij een fosfaattoestand  $Pw < 40$ , maar niet bij de hogere fosfaattoestanden.





**Figuur 3-23** De relatieve gewasopbrengst, ten opzichte van object P2-bemest, uitgedrukt tegen de fosfaattoestand als Pw-getal. In oranje gewasgroep 1 (aardappel), in groen gewasgroep 1 (zaaiui) en in geel gewasgroep 2 (suikerbieten). De teelten van 2005 (aardappel) is buiten beschouwing gelaten wegens respectievelijk wateroverlast. Gevulde bolletjes zijn de bemeste objecten, open rondjes de onbemeste objecten.

## 4 Discussie

### 4.1 Resultaten in bredere context

Twee vergelijkbare bouwlandproeven in beheer van WUR liggen in Marknesse en in Wijster, waardoor de effecten van fosfaatmanagement op drie locaties met elkaar vergeleken kunnen worden. Dit is eerder uitgebreid gedaan door o.a. Regelink et al. (2021). In Tabel 15 worden algemene kenmerken van deze proeven weergegeven.

**Tabel 15** Overzicht bouwlandproeven op verschillende locaties.

		Lelystad	Marknesse	Wijster
Grondsoort		Kalkrijke zavel (jonge zeeklei)	Kalkrijke zavel (jonge zeeklei)	Zandgrond (dekzand)
pH	(-)	>7,5	Circa 7,5	Circa 5,0
Fe-ox	(mg/kg)	2464	3683	842
Al-ox	(mg/kg)	272	66	2178
Fe+Al	(mmol/kg)	54	81	96
Startjaar proef		1990	1972	1972
Fosfaatgiften	(kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> jr <sup>-1</sup> )	0 – 280	0 -	0 -

De bouwlandproef in Lelystad is gelegen op een jonge zeekleigrond waarvan bekend is dat deze van nature rijk is aan fosfaat. De profielbemonsteringen en P-totaal metingen op de niet-bemeste veldjes tonen aan dat deze grond tot grote diepte fosfaat bevat in een gehalte van circa 200 mg P/kg. Er is echter een groot verschil in de oplosbaarheid van dit fosfaat ten opzichte van fosfaat wat door bemesting is opgebracht. Het fosfaat wat van nature in de ondergrond aanwezig is komt niet tot uiting in de agronomische P-indicatoren en eveneens niet in de P-ox bepaling. In de ondergrond en in de uitmijnobjecten (P1-onbemest) is minder dan 10% van P-totaal extraheerbaar in P-Al en minder dan 20% extraheerbaar met P-ox. Dit wijst erop dat het natuurlijke fosfaat aanwezig is in de vorm van zeer stabiele fosfaatmineralen zoals apatiet welke niet oplossen in zure extracties. Vergelijkbare resultaten werden gevonden bij profielbemonsteringen op zeekleigrond in Marknesse. Ook daar bevat de ondergrond van nature circa 400-500 mg P/kg maar is dit fosfaat niet extraheerbaar met P-Al of P-ox. De jonge zeekleigronden in de polder wijken daarmee duidelijk af van bijvoorbeeld de van nature arme dekzandgronden in Nederland. De dekzandgrond in Wijster bevat minder dan 10 mg P/kg in de ondergrond; deze bodem is van nature arm in fosfaat (Holwerda et al., 2023).

#### 4.1.1 Het lot van het fosfaatoverschot

Bij de proef in Lelystad wordt maar een deel van het fosfaatoverschot teruggevonden in de verschillende analyses in het bodemprofiel. Het is de vraag wat er precies met dit fosfaatoverschot gebeurt en in welke fracties dit wordt vastgelegd.

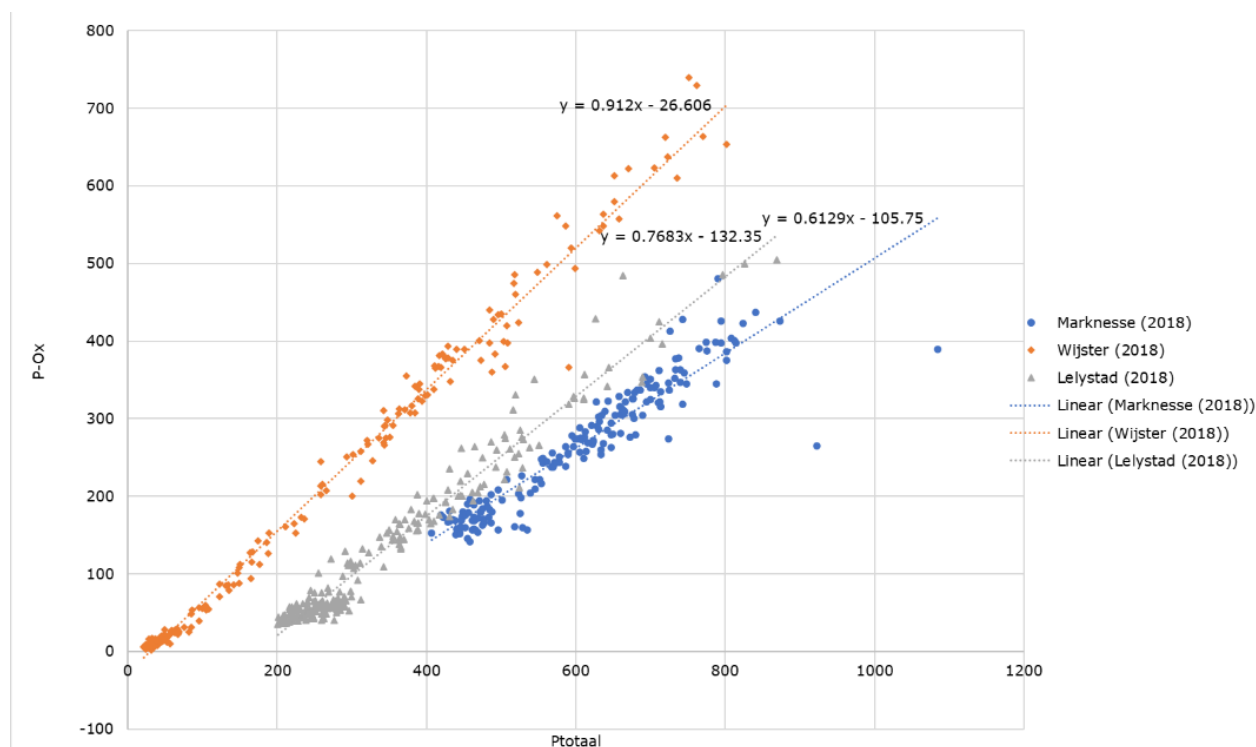
Het P-totaal gehalte in de bodem vertoont een sterke correlatie met het P-ox gehalte in de bodem. Uit de regressievergelijking volgt dat een stijging in P-totaal – als gevolg van fosfaatbemesting – voor circa 80% tot uiting komt in het P-ox gehalte. De overige 20% van het fosfaatoverschot wordt vastgelegd in zeer stabiele mineralen. De regressielijn loopt niet door het nulpunt omdat het van nature aanwezige fosfaat (circa 200 mg P/kg) niet tot uiting komt in P-ox, zie Figuur 3-24. Een vergelijkbare trend werd gevonden voor de zeekleigrond in Marknesse. Op de dekzandgrond in Wijster komt daarentegen 100% van het fosfaatoverschot tot uiting in P-ox.

De fosfaatverzadigingsgraad op de grond uit Lelystad stijgt sneller ten opzichte van Wijster en Marknesse. Dit is te verklaren vanuit de lagere gehalten aan ijzer- en aluminium-oxiden in Lelystad (zie Tabel 15). Vaak wordt gedacht dat kleigronden een hoger bindingsvermogen hebben voor fosfaat dan zandgronden maar dat is niet persé juist. Het bindingsvermogen van de bodem wordt bepaald door het gehalte aan ijzer- en aluminiumoxiden in de grond en hoewel dit vaak correleert met het kleigehalte laten deze resultaten zien dat deze vuistregel zeker niet generiek toepasbaar is.

Een gelijk cumulatief fosfaatoverschot geeft daarmee op Lelystad een sterkere verhoging in de fosfaatverzadigingsgraad ten opzichte van de grond op Wijster en Marknesse. De fosfaatverzadigingsgraad stuurt vervolgens P-CaCl<sub>2</sub> in de bodem en is tevens een goede voorspeller voor het fosfaatgehalte in het bodemvocht. De objecten P3 en P4 hebben hierdoor een hoge mate van fosfaatverzadiging bereikt van 50 tot 60%. De bodem is hierbij oververzadigd met fosfaat waardoor P-CaCl<sub>2</sub> tot waarden boven 3,0 mg P/kg steeg. Dit komt ook tot uiting in hoge fosfaatconcentraties in het bodemvocht net onder de bouwvoor.



De relatie tussen P-CaCl<sub>2</sub> en de fosfaatverzadigingsgraad toont de vorm van een adsorptie-isotherm. Bij een lage fosfaatverzadigingsgraad wordt P-CaCl<sub>2</sub> sterk gebufferd. Er is een grote hoeveelheid extra fosfaat nodig om een kleine verandering in het P-CaCl<sub>2</sub>-getal teweeg te brengen. Bij een fosfaatverzadigingsgraad van 30% of hoger, neemt de bufferende werking snel af. Een kleine verhoging in de fosfaatverzadigingsgraad leidt dan tot een sterke verhoging in P-CaCl<sub>2</sub>. Dit komt ook tot uiting in het verloop van P-CaCl<sub>2</sub> bij de verschillende objecten. Op basis van deze adsorptie-isothermen mag verwacht worden dat het P-CaCl<sub>2</sub>-getal en het Pw-getal bij een voortdurende fosfaatoverschotten blijven stijgen. Uit de jaarlijkse monitoring komt echter geen duidelijke stijgende trend over de periode 2005-2015 naar voren. Omdat ook P-totaal in deze periode aanzienlijk minder stijgt dan verwacht werd op basis van het fosfaatoverschot is onduidelijk of het fosfaatgehalte van de bodem wel zoveel stijgt als verwacht. Dit vraagt nader onderzoek.



**Figuur 3-24** P-ox ten opzichte van P-totaal in de bouwvoor gemeten in 2018, voor drie verschillende fosfaatproeven op bouwland.

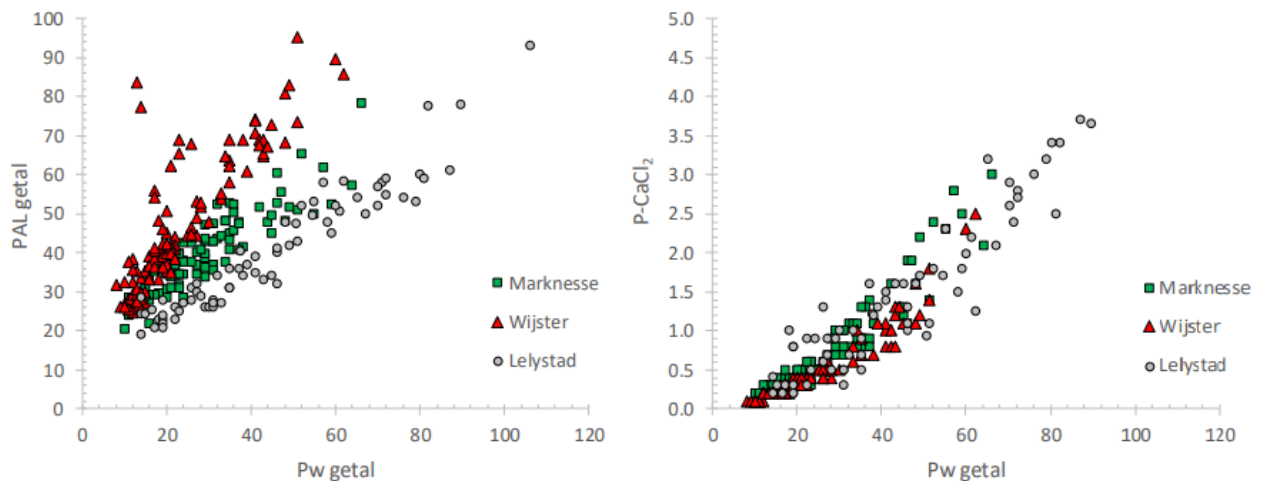
#### 4.1.2 Verloop en samenhang van agronomische fosfaat indicatoren

Wat betreft de bouwlandproef in Lelystad geven van Wijk et al. (2013) aan dat de fosfaattoestand, ondanks de temporele variatie, bij P2-bemest licht stijgend was in de periode 2002-2011 (gemeten met het Pw-getal en P-Al). Op basis van het toevoegen van de data tot en met 2020 kunnen we aannemen dat de fosfaattoestand licht steeg en daarna daalde. De metingen laten dus grote fluctuaties zien, terwijl de gemiddelde fosfaatafvoer in deze periodes niet van elkaar verschilden. Een duidelijke verklaring voor het optreden van jaar-op-jaar fluctuaties ontbreekt. Mogelijke redenen zijn verschillen in weerscondities voorafgaand aan de bemonstering (indirect effect via biologische activiteit) of verschillen in de mate van fosfaatonttrekking.

In objecten met een hogere fosfaattoestand is sprake van een hogere mate van fluctuatie in het Pw-getal en P-CaCl<sub>2</sub>. Dit is te verklaren vanuit het adsorptiegedrag van fosfaat in de bodem; in gronden met een hoge fosfaatverzadiging is de fosfaatconcentratie in het bodemvocht minder sterk gebufferd en dit uit zich in hogere fluctuaties tussen de jaren door. Regelink et al. (2021) keken al eerder naar de temporele variaties in de hoogte van de fosfaatindicatoren en de consequenties daarvan voor de hoogte van de fosfaatgebruiksnormen. De afbakening van de grenzen voor bepalingen van de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm zijn nauw ten opzichte van de temporele fluctuaties die voorkomen. Hierdoor is het mogelijk dat her-bemonstering leidt tot een verschuiving van de fosfaatgebruiksnorm naar een aanliggende klasse. Door de overgang naar de gecombineerde indicator zou de fluctuatie in de bepaling van de fosfaattoestand van de bodem af moeten nemen omdat het P-Al-getal meer stabiel is. Dit bleek inderdaad het geval te zijn voor de bouwlandproef in Lelystad.

Van oudsher was het Pw-getal de standaard indicator voor beoordeling van de fosfaattoestand op bouwland ten behoeve van de bemestingsadviezen en later ook voor de bepaling van de wettelijke fosfaatgebruiksnorm. Sinds 2021 wordt de gecombineerde indicator gebruikt voor de bepaling van de fosfaatgebruiksnormen. Het is zodoende relevant om te beschouwen hoe deze indicatoren zich tot elkaar verhouden.

P-CaCl<sub>2</sub> en het Pw-getal zijn sterk gecorreleerd met elkaar. De data voor de drie verschillende bouwlandproeven geven een vergelijkbare relatie tussen het Pw-getal en P-CaCl<sub>2</sub> wat wil zeggen dat de relatie – voor deze drie gronden – generiek is (zie Figuur 3-25). P-Al extraheert een groter deel van de fosfaatvoorraad en is eveneens gecorreleerd met het Pw-getal maar deze relatie is bodemspecifiek. Bij een gelijk Pw-getal heeft de grond uit Lelystad een lage P-Al t.o.v. de grond in Marknesse en Wijster. Hierdoor wordt de fosfaattoestand bij gebruik van de gecombineerde indicator lager beoordeeld dan o.b.v. het Pw-getal. P-Al is een agronomische indicator. Er is geen eenduidige omschrijving te geven van de fosfaatpool die met P-Al geëxtraheerd wordt. Op de grond in Lelystad extraheert P-Al ongeveer 80% van P-ox. Op de dekzandgrond in Wijster extraheert P-Al ongeveer 50% van P-ox. In de bemestingsadviezen wordt de combinatie van een lage P-Al met een hoog Pw-getal (zoals hier Lelystad) beschouwd als een grond met een lage mate van fosfaatbuffering. De grond op Wijster zou volgens dit principe een hoge mate van fosfaatbuffering kennen.

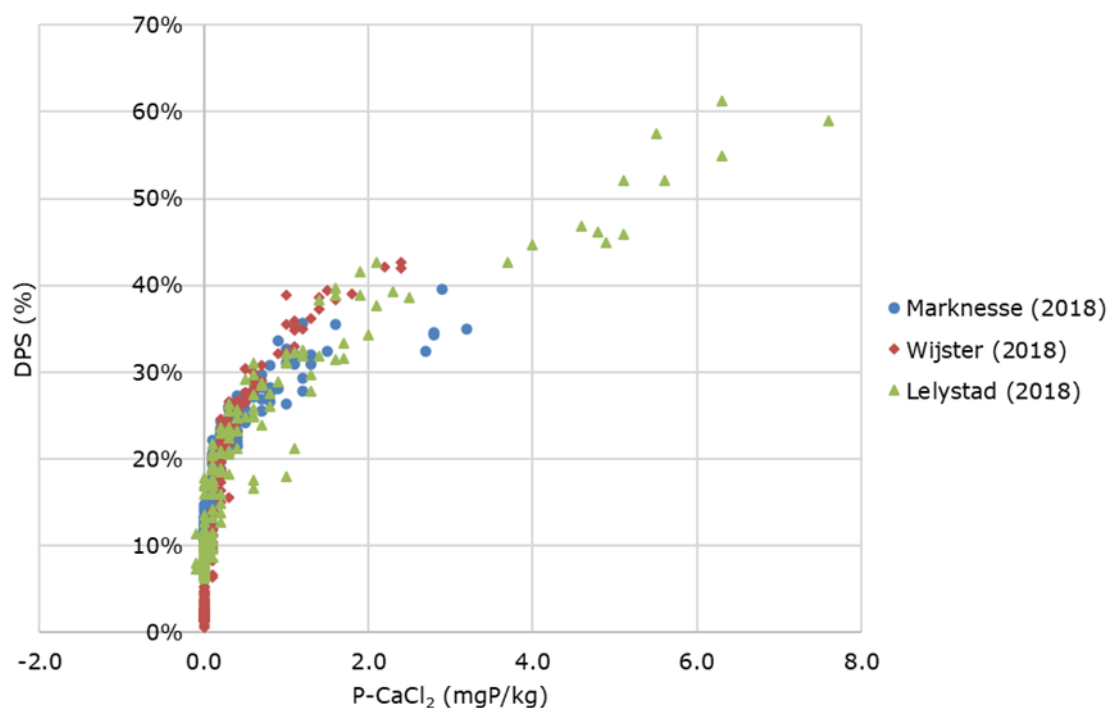


**Figuur 3-25** Relatie tussen het Pw-getal (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/l) en P-Al (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100g) en P-CaCl<sub>2</sub> (mg P/kg) in de grondmonsters van de bouwlandproeven in Lelystad, Wijster en Marknesse (data 2008, 2012 en 2019). Uit Regelink et al. (2021).

In wetenschappelijke kringen wordt de fosfaatverzadigingsgraad gebruikt als indicator voor de fosfaatbeschikbaarheid. Figuur 3-26 laat zien dat de relatie tussen de fosfaatverzadigingsgraad en P-CaCl<sub>2</sub> voor deze set gronden een generieke relatie vertoont. Het onderscheid tussen de drie bodems vervalt door over te stappen naar een indicator waarin de fosfaatvoorraad (P-ox) wordt gecorrigeerd voor de fosfaatbindingscapaciteit (Fe ox+Al ox) van de bodem. Dit suggereert dat in alle drie de gronden P-CaCl<sub>2</sub> gestuurd wordt vanuit desorptie en dat deze processen sterk vergelijkbaar zijn ondanks de grote verschillen in bodemeigenschappen. Analyses met grotere datasets laten echter zien dat de relatie met de fosfaatverzadigingsgraad zwakker wordt naarmate het aantal verschillende gronden in de dataset toeneemt. Factoren als organische stof gehalte, pH, calciumgehalte zijn van invloed op de adsorptie van fosfaat aan de minerale bodemdeeltjes en deze factoren zijn nog niet goed begrepen en niet ingebouwd in bemestingsadviezen of uitspoelingsmodellen. Ook de temporele variatie in P-CaCl<sub>2</sub> en het Pw-getal maakt dat correlaties met de fosfaatverzadigingsgraad afnemen zodra verschillende datasets gecombineerd worden.

#### 4.1.2.1 Stabilisatie van fosfaatindicatoren

Het is onduidelijk waar de fosfaattoestand zal stabiliseren bij continue hoge giften en uitmijning. In het rapport van Ehlert et al. (2018) wordt gesteld dat de fosfaattoestand bij P<sub>2</sub>-bemest is gestabiliseerd rond een Pw-getal van 42. Echter met de aanvullende data van 2017-2020 lijkt het Pw-getal te zijn gezakt naar een Pw-getal van ~35. Daardoor ontstaan grote verschillen in de relaties die worden gelegd tussen het fosfaatoverschot en waar het Pw-getal zal stabiliseren. Regelink et al. (2021) geven aan dat het Pw-getal bij een bemesting van 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> is gestabiliseerd tussen de 35 en 49. Op basis van de data kan worden betwijfeld of het Pw-getal daadwerkelijk gestabiliseerd is. Bij een Pw-getal van 51 in 2005 lijkt een bemesting met 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> in de 15 jaar daaropvolgend te leiden tot een verdere daling van het Pw-getal. Ook geven Regelink et al. (2021) aan dat P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> bij giften van 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> stabiliseren. Daarbij geven zij aan dat 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> voldoende is om een laag niveau te handhaven, maar niet voldoende om een neutraal niveau te handhaven. Dat komt overeen met onze bevindingen. Wat betreft P-CaCl<sub>2</sub> blijft de toestand bij de gift van 70kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> laag, afhankelijk van het beginniveau stabiliseert P-CaCl<sub>2</sub> zich rond 0,5-1,0 mg P kg<sup>-1</sup>. Dit is in overeenstemming met de bevindingen van Regelink et al. (2021).



**Figuur 3-26** De fosfaatverzadigingsgraad (DPS) ten opzichte van P-CaCl<sub>2</sub> voor de drie bouwlandproeven.

#### 4.1.2.2 Risico's op uitspoeling en verplaatsing van fosfaat naar de ondergrond

Fosfaat bindt in de bodem aan minerale delen waaronder ijzer- en aluminiumoxiden. Bij oververzadiging van de bindingscapaciteit neemt het risico op uitspoeling van fosfaat toe. Metingen aan fosfaat in het bodemvocht in de proef in Lelystad lieten sterk verhoogde concentraties zien bij P3 en P4, dit beperkte zich tot de meting op 35cm diepte. Op 75cm diepte was het fosfaatgehalte niet verhoogd omdat de bodem daar nog voldoende fosfaat kon binden. Echter, indien er sprake is van oppervlakkige afspoeling of uitspoeling via drains (op een diepte van 1m), kan fosfaat alsnog naar het oppervlaktewater uitspoelen.

Meting van de fosfaatindicatoren in de bodemlaag onder de bouwvoor geeft een indicatie van de mate waarin fosfaat vanuit de bouwvoor middels uitspoeling is verplaatst naar de ondergrond. Bij veldjes welke sinds 1990 jaarlijks 140 of 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> ontvangen, is sprake van verhoogde fosfaatgehalten in de ondergrond. Dit komt met name tot uiting in verhoogde waarden van P-CaCl<sub>2</sub> en Pw-getal t.o.v. de ondergrond onder de veldjes welke sinds 1990 op uitmijnen liggen. Jaarlijkse bemesting met 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> sinds 1990 had geen effect op de fosfaatindicatoren in de bodemlaag 30-60cm. Vertaald naar de fosfaatindicatoren in de bouwvoor betekent dit dat er bij een P-CaCl<sub>2</sub> getal boven 3,0 mg P/kg of een Pw-getal boven 60 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/l sprake is van een risico op verplaatsing van fosfaat naar de ondergrond. Bij lagere waarden voor de fosfaatindicatoren is er geen verschil waarneem in de ondergrond t.o.v. velden welke sinds 1990 geen fosfaatmeststof ontvangen.

Hoewel de bodems op Lelystad van nature fosfaatrijk zijn, is de oplosbaarheid van fosfaat in de ondergrond zeer laag. Er is geen sprake van verhoogde fosfaatconcentraties in het bodemvocht in de ondergrond door het van nature aanwezige fosfaat. Daar waar verhoogde fosfaatconcentraties in het bodemvocht gevonden zijn, zijn deze te relateren aan de verrijking van de bodem door (historische) fosfaatbemesting. Door uitmijnen van de verrijkte bodem daalde die concentratie weer snel.

#### 4.1.2.3 Behoeftte gewassen

Op de bouwlandproef in Lelystad wordt gewerkt met een vierjarig bouwplan. De gewasrotatie bestaat uit suikerbiet, wintertarwe/zomergerst, zaaiui/peen en aardappel. Effecten van de fosfaatbehandelingen op de gewasopbrengsten zijn een gevolg van de combinatie van de fosfaattoestand en de fosfaatgift. Deze twee effecten zijn met elkaar verstrengeld omdat de veldjes met de hoogste fosfaattoestand eveneens de hoogste verse fosfaatgift ontvangen. Door ook de data van de uitmijnveldjes te beschouwen, kunnen wel uitspraken gedaan worden over de invloed van de fosfaattoestand versus de fosfaatgift op de gewasopbrengst.

Van Wijk et al. (2013) stellen op basis van data over de periode van 2002-2011 dat er geen verschil in opbrengst was tussen de standaard (P2-bemest) en de hogere fosfaattoestanden in combinatie met hogere giften. Op basis

---

van data over de periode 2001-2016 komen Ehlert et al. (2018) tot dezelfde conclusie. Bezien over de periode 2005-2020 en gemiddeld over de gewassen blijft deze conclusie overeind. Echter, binnen gewasgroep 1 bleek aardappel sterker dan ui te reageren op de fosfaattoestand en -bemesting. Er werd een trend zichtbaar voor aardappel, waarbij een hogere fosfaattoestand en -gift gepaard ging met een hogere opbrengst, het is niet duidelijk waar het optimum ligt.

Na zes jaar uitmijnen vonden van Wijk et al. (2013) bij P2 geen significant lagere opbrengsten bij uitmijnen, met data tot en met 2020 zien we dit nu wel bij de fosfaatbehoefte gewassen (aardappel en zaaiui). Dit komt overeen met de verwachting dat door uitmijnen de fosfaattoestand van de bodem geleidelijk daalt, tot een niveau wordt bereikt waarbij opbrengstderving gaat optreden. Opbrengstderving door uitmijnen werd bij de hogere fosfaattoestanden nog niet gevonden. In het rapport van Ehlert et al. (2018) wordt wel aangegeven dat een verse fosfaatgift nodig is voor fosfaatbehoefte gewassen, enkel bij P4 leidde uitmijnen niet tot opbrengstderving. Deze conclusie werd getrokken op basis van de fosfaatobjecten, wanneer benaderd vanuit de fosfaattoestand bleek een verse bemesting boven een Pw-getal van  $\sim 40$  geen effect meer te hebben op de opbrengst van fosfaatbehoefte gewassen.

Hieruit volgt dat bij een Pw-getal hoger dan 45, een fosfaatgift niet van invloed is op de hoogte van de gewasopbrengst. Blijkbaar wordt er voldoende fosfaat uit de bodem geleverd, dit komt doordat de bodem op deze grond van nature rijk is aan fosfaat. Bij een Pw-getal onder de 45 ( $P-CaCl_2 < 1,2$  mg P/kg) is de fosfaatgift wel van invloed op de gewasopbrengst maar alleen voor fosfaatbehoefte gewassen. Om opbrengstderving van fosfaatbehoefte gewassen zoals aardappel te voorkomen, moet de fosfaattoestand van de bodem voldoende hoog (Pw-getal  $> 25$ ) gehouden worden uitgaande van een fosfaatgift van  $> 70$  kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$   $jr^{-1}$ . Bij de objecten die een gift van  $70$  kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$   $jr^{-1}$  ontvingen vond geen opbrengstderving plaats bij een voldoende hoge fosfaattoestand (P2-70), bij een lagere fosfaattoestand was de opbrengstderving maximaal 5% (P1-70). In de praktijk mag – bij de nieuwe fosfaatgebruiksnorm – een fosfaatgift van  $120$  kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$   $jr^{-1}$  gegeven worden wat voldoende is om de fosfaattoestand op peil te houden of zelfs te verhogen.

Vertaald naar de huidige systematiek van de gecombineerde indicator en de fosfaatgebruiksnormen betekent dit dat een fosfaatgebruiksnorm van  $40$  kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$   $jr^{-1}$  bij hoge fosfaattoestand op deze grond niet tot opbrengstderving leidt. Voor de landbouwpraktijk wordt een lage fosfaatgebruiksnorm echter wel als een beperking beschouwd om dit tevens de mogelijkheden beperkt om middels dierlijke mest andere nutriënten, met name stikstof en kali, en organische stof aan te voeren.

Uitmijnproeven op de eveneens van nature fosfaatrijke gronden in Marknesse tonen een vergelijkbaar beeld met de proef op Lelystad; ook op Marknesse werden redelijke opbrengsten behaald op veldjes welke sinds 1972 geen fosfaatmeststof meer ontvingen. Dit natuurlijk aanwezige fosfaat kent een lage oplosbaarheid en komt zodoende niet tot uiting in de hoogte van de fosfaatindicatoren maar het kan schijnbaar wel dienen als fosfaatpool voor gewasopname. Uitmijnproeven op van nature arme zandgrond in Wijster toonden daarentegen zeer hoge opbrengstdervingen en zelfs misoogsten op veldjes welke sinds 1987 geen fosfaatmeststof hebben ontvangen. Dit terwijl P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al vergelijkbaar laag zijn (Holwerda 2023). De langdurige nalevering van fosfaat op de gronden in Lelystad en Marknesse moet zodoende gezien worden als een specifieke eigenschap van fosfaatrijke zeelegronden en deze resultaten kunnen niet vertaald worden naar andere grondsoorten die van nature geen fosfaatmineralen bevatten.

De productkwaliteit (o.a. suikergehalte bij bieten) en maatsortering (aardappel, peen, ui) werd niet tot nauwelijks beïnvloed door de hoogte van de fosfaatgift en fosfaattoestand. Het fosforgehalte in de gewassen was gemiddeld wel hoger bij een hogere fosfaatbemesting wat duidt op luxeconsumptie i.e. extra fosfor opname door het gewas zonder dat dit leidt tot een hogere opbrengst.

## 4.2 Onzekerheden

### 4.2.1 Methodologie

Het verloop van de fosfaattoestand kon niet worden beschreven met exponentiële curves. De resultaten zijn daarom gebaseerd op de meetwaarden. Omdat deze grote jaar-tot-jaar variatie laten zien, is het lastig om in te schatten in hoeverre de fosfaattoestanden gestabiliseerd zijn. Ook om een link te leggen tussen overschotten en veranderingen in de fosfaattoestand en te berekenen verliezen is hierdoor lastig.

Wat betreft de opbrengstniveaus wordt er onderscheid gemaakt tussen wel of niet bemesten, bij het effect van bemesting moet worden benadrukt dat het uitmijnen binnen de fosfaattoestanden door de jaren heeft geleid tot verschillen in fosfaattoestand tussen de onbemeste (uitmijnen) en bemeste velden. Het bemestingseffect is daarmee mede een toestandseffect, dit maakt het lastig om harde conclusies te trekken met betrekking tot het effect van wel of niet bemesten op de gewasopbrengsten.

In plaats van bouwplanbemesting is er voor de proefopzet gekozen voor bemestingsniveaus waarbij elk jaar dezelfde hoeveelheid wordt gegeven. Bij bemesting volgens advies zou er aan de aardappelen en uien bij P1-

bemest en P2-bemest meer fosfaat zijn gegeven dan  $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ . De gegeven  $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  is dus een suboptimale gift. Dit maakt het nog lastiger om vast te stellen om een optimale fosfaattoestand vast te stellen voor het telen van aardappels.

Ook op een ander punt wijkt deze bouwlandproef af van de praktijk. In de proef wordt enkel met minerale meststoffen bemest, terwijl in de praktijk de fosfaatbehoefte grotendeels wordt ingevuld met dierlijke mest. Om tot een gerichte en precieze bemesting te komen is er in deze proef gekozen voor een bemesting met minerale meststoffen in plaats van met dierlijke mest.

#### 4.2.2 Metingen

Het gemeten fosfaat in de ondergrond (30-60cm) laat een vreemd verloop zien, waarbij in 2018 een relatief lage waarden werden gemeten en in 2019 en 2020 relatief hoge waarden. Dit was zowel het geval voor het Pw-getal, P-Al als P-CaCl<sub>2</sub>. Een goede verklaring hiervoor ontbreekt.

Veranderingen in de bulkdichtheid spelen mogelijk een rol bij de jaar-op-jaar fluctuaties in P-totaal onder de bouwvoor. Door het grote verschil in fosfaatgehalten tussen de bouwvoor en de onderliggende laag kan een kleine afwijking in de bemonsteringsdiepte al effect hebben op het fosfaatgehalte in het grondmonster. Wanneer een bouwvoor van 30 cm dikte een bulkdichtheid heeft van 1,6 kg/l en de bulkdichtheid vervolgens daalt tot 1,4 kg/l, dan stijgt het volume van deze bodemlaag tot 34 cm. Hierdoor wordt een deel van de fosfaatrijke bouwvoor meegenomen bij bemonstering van de 30-60 cm bodemlaag. Uitgaande van P-totaal gehalten van 180 en 70 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 g in respectievelijk de 0-30 en 30-60 laag (situatie bij P4), leidt dit tot een stijging van het P-totaal gehalte in de ondergrond van 70 naar 85 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 g. Indien de bulkdichtheid in de bouwvoor daalt tot 1,3 kg/l, stijgt het P-totaal gehalte in de onderlaag tot 95 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 g. Dit laat zien dat veranderingen in de bulkdichtheid een plausibele verklaring kunnen zijn voor de temporele variatie in de hoogte van de fosfaatindicatoren.

Veranderingen in de bulkdichtheid kunnen optreden door grondbewerking en door zwel/krimp als gevolg van verschillen in bodemvocht. Wat daadwerkelijk de variatie is in bulkdichtheid op deze gronden is niet bekend omdat bulkdichtheid eenmalig is bepaald. Nader onderzoek is nodig om deze verklaring verder te onderbouwen.

Bovendien is de bulkdichtheidsbepaling, welke gebruikt is om de totale fosfaatvoorraad per hectare (0-60cm) te berekenen, enkel op één moment uitgevoerd. Het resultaat hiervan is relatief hoog, voor deze zavelgronden wordt doorgaans een waarde van 1,4 g cm<sup>3</sup> aangehouden ten opzichte van de gemeten waarde van 1,6 g cm<sup>3</sup>. Bovendien is de dichtheid in de laag 30-60cm niet gemeten, en zijn de meetgegevens van de laag 0-30cm aangehouden. Dit heeft gevolgen voor de berekende fosfaatvoorraad, aangezien de bulkdichtheid in de ondergrond doorgaans groter is dan in de bouwvoor.

Deze onzekerheden hebben consequenties voor het interpreteren van de meetdata, maar ook voor berekende waarden. Met het berekende fosfaatoverschot is nagegaan hoe P-totaal in de bodem zal veranderen (verwachte toestand P-totaal). Dit wekt af van de gemeten hoeveelheid fosfaat in en onder de bouwvoor (0-60cm). Door twijfelachtige P-totaal metingen (met name in de laag 30-60cm), en gebrek aan een bulkdichtheidsbepaling op 30-60cm is het onvoldoende inzichtelijk geworden wat de verliezen zijn geweest. Het is dus niet geheel inzichtelijk in hoeverre het fosfaatoverschot is achtergebleven in het bodemprofiel (0-60cm), dit fosfaat is verplaatst naar diepere bodemlagen of het grondwater. Een andere mogelijkheid is dat er met de P-totaal niet de volledige bodemvoorraad aan fosfaat gemeten is. De gemeten concentraties ortho-fosfaat in het bodemvocht op 75 cm diepte duiden erop dat er bij de hogere toestanden wel iets meer fosfaat uitspoelt dan bij de lagere toestanden, maar dat er alleen bij P4 bemest risico is op overschrijding van de milieunorm.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### *Opbrengst*

In vergelijking met de standaard (P2-70) bleef de gemiddelde opbrengst significant achter bij het bemeste object met een lagere fosfaattoestand en bij de onbemeste objecten met een lagere tot gelijke fosfaattoestand. Dit effect was sterker voor de fosfaatbehoefte gewassen (zaaiui en aardappel). Bij hogere fosfaattoestanden en/of -bemesting werd geen significant hogere opbrengst gevonden. Enkel aardappels (en in mindere mate ook suikerbieten) bleken in enkele jaren te profiteren van een relatief hoge fosfaattoestand en -gift. Op bouwplanniveau geldt dat bij een Pw-getal van 30-45 P-Al 35-42 P-CaCl<sub>2</sub> 1,0-1,7 en een bemesting van 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> een maximale opbrengst werd behaald. Deze toestand wordt geclassificeerd als 'voldoende' tot 'ruim voldoende' op basis van de bemestingsadviezen in het HBB en als 'laag' tot 'arm' op basis van de gecombineerde indicator. Volgens de bemestingsrichtlijnen op basis van de gecombineerde indicator mag bemest worden met 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> in deze situatie. Regelink et al. (2021) geven daarom aan dat een hogere bemesting vanuit het oogpunt van gewasopbrengsten in deze situatie niet noodzakelijk is. Het in stand houden of verhogen van de fosfaattoestand kan daar wel een reden voor zijn, gezien de fosfaattoestand steeds verder terugliep. Overigens werden de proefplots met een lagere toestand (P-Al 23-35 en P-CaCl<sub>2</sub> 0,5-1,0) ook geclassificeerd als 'laag' volgens de gecombineerde indicator, terwijl hier bij een bemesting met 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> wel opbrengstderving plaatsvond en een hogere bemesting vanuit het punt van gewasopbrengst wel gewenst is.

Het verschil in opbrengsten tussen wel of niet bemesten was enkel significant voor fosfaatbehoefte gewassen en de relatief lage fosfaattoestanden. Bij een Pw-getal >40 leidde wel of niet bemesten niet tot een significant verschil in opbrengsten. Kortgezegd leidde het onthouden van een fosfaatbemesting pas tot opbrengstderving wanneer de fosfaattoestand was gedaald tot een lager niveau (Pw-getal <40, P-Al <42 en P-CaCl<sub>2</sub> <1,7). Met andere woorden, een fosfaatgift is niet noodzakelijk voor een optimale gewasopbrengst wanneer de fosfaattoestand voldoende hoog is. Een gebruiksnorm van 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> bij hoge fosfaattoestand zal op deze grond niet tot opbrengstderving leiden. Op de opbrengst van minder fosfaatbehoefte gewassen in het bouwplan (suikerbiet, peen, zomergerst en wintertarwe) had een lage dan wel hoge fosfaatbemesting of -toestand geen significant effect.

### *Fosfaatbalans en -toestand*

Bij het referentieobject (P2-70) werd in het huidige bouwplan tussen de 33-82 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> afgevoerd, gemiddeld 62 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Bij een lage fosfaattoestand zonder bemesting was deze afvoer gemiddeld genomen 20% lager dan bij de standaard, bij een hoge fosfaattoestand en -bemesting was dit 18% hoger dan bij de standaard. Het P-gehalte in het geoogste product was bij een hoge fosfaattoestand en -bemesting 16% hoger dan bij de standaard. Omdat dit niet gepaard ging met significant hogere opbrengsten duidt dit op luxe-consumptie.

Bij het standaard object was het gemiddelde overschot in de periode 2006-2020 8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>, dit past binnen de waarden die in het HBB worden aangehouden als het onvermijdbaar landbouwkundig verlies (5-20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>) voor het handhaven van respectievelijk de onderkant (Pw-getal 25) en bovenkant (Pw-getal 45) van het landbouwkundig streeftraject. De fosfaattoestand bleef echter dalen in de periode 2005-2020, de toestand bleef wel binnen het streeftraject. Geconcludeerd kan worden dat een ruime fosfaattoestand (Pw-getal van rond de 45) zal dalen bij een gemiddeld fosfaat overschot van 8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Hieruit valt af te leiden dat een overschot op de fosfaatbalans van 8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> op de kleigrond van dit proefveld onvoldoende is om een toestand aan de bovenkant van het streeftraject te handhaven. Waar de toestand zal stabiliseren is nog niet duidelijk, mogelijk is een dergelijk overschot wel voldoende om de onderkant van het streeftraject te handhaven.

Ook voor de andere objecten lijkt er nog geen sprake te zijn van stabilisatie van de fosfaattoestand bij de bemeste en onbemeste objecten. Het verloop van de fosfaattoestand per object met de drie analysemethoden (Pw, P-CaCl<sub>2</sub> en P-Al) kwam min of meer overeen. Een uitzondering daarop was een hoge fosfaattoestand en -bemesting waarbij in het Pw-getal en P-CaCl<sub>2</sub> geen verdere toename werd gevonden, terwijl deze wel zichtbaar werd in P-Al. Dit duidt erop dat het overschot aan (verse) bemesting werd vastgelegd in de bodemvoorraad. Dit past binnen de sterk bufferende werking van de kleigronden in Lelystad met daardoor een relatief laag P-CaCl<sub>2</sub> ten opzichte van P-Al, zoals ook omschreven door (Regelink et al., 2021 en Ehlert et al., 2018). Er is een indicatie dat het fosfaatoverschot wordt vastgelegd in P-Al en na ~15 jaar niet meer heeft geleid tot een toename van de fosfaattoestand onder de bouwvoor (30-60cm). De verschillen die tot dan toe zijn ontstaan onder de bouwvoor bleven daarna gehandhaafd.

Het jaarlijkse fosfaatoverschot bleek geen goede parameter om de verandering van de fosfaattoestand te beschrijven. Het cumulatieve fosfaatoverschot bleek daarvoor beter geschikt. Uit de metingen wordt zichtbaar dat een hoger fosfaatoverschot heeft geleid tot een verhoogde fosfaattoestand. Toch is een aanzienlijk deel van het cumulatieve fosfaatoverschot niet terug te vinden in de bodemvoorraad 0-30cm. Een gedeelte van dit overschot is terug te vinden onder de bouwvoor, tot op een diepte van 60cm is het verschil tussen de objecten terug te vinden. Ook is het aannemelijk dat een gering deel is uitgespoeld. De fosfaatconcentratie in het

bodemvocht, wat een indicatie is voor het risico op uitspoeling, was hoger naarmate het fosfaatoverschot groter was. Door de grote variatie tussen de jaren, de betrouwbaarheid van de P-totaal meting en de bulkdichtheidsbepaling is het lastig om de verliezen te kwantificeren. Aangenomen kan worden dat een groter overschot op de fosfaatbalans een groter risico op verliezen geeft. In vergelijking met het standaard object werd bij overschotbemesting een hogere concentratie fosfaat in het bodemvocht onder de bouwvoor gemeten gedurende de winterperiode. Dit duidt op een hoger risico op uitspoeling. Uitmijnen bij een hoge fosfaattoestand gaf een snelle reductie van de fosfaatconcentratie in het bodemvocht, waardoor het risico op uitspoeling vermindert.

Uitmijnen leidde tot een sterke afname van de fosfaattoestand in de bouwvoor, deze afname verliep sneller naarmate de initiële fosfaattoestand hoger was. Bij een initieel Pw-getal >100 duurde het 15 jaar voordat de fosfaattoestand het streeftraject bereikte, bij een Pw-getal >60 was dat 7 jaar. In ook ongeveer 7 jaar zakte bij uitmijnen een initiële fosfaattoestand aan de bovenkant van het streeftraject tot onder het streeftraject. Uitmijnen leidde in 15 jaar tot een verandering in de fosfaatklassen: van hoog naar neutraal (P4), van hoog naar arm (P3), en van ruim naar arm (P2), op basis van het Pw-getal. Voor de gecombineerde indicator was deze verandering van hoog naar neutraal (P4), van 'ruim' naar 'arm' (P3), en bij P2 bleef de toestand binnen de klasse 'arm'.

In de bouwvoor (0-30cm) werd het effect van uitmijnen het beste zichtbaar wanneer gemeten met P-CaCl<sub>2</sub>, met P-Al werd het effect minder snel en gelijkmatiger zichtbaar. Kortom, P-CaCl<sub>2</sub> toont sneller de verschillen in bemesting en de historische bemesting komt beter tot uiting in P-Al. Onder de bouwvoor leidde uitmijnen niet tot een scherpe daling van de fosfaattoestand, al was deze wel consequent lager dan bij bemesten. Dit betekent dat uitmijnen leidt tot een lagere fosfaatconcentratie onder de bouwvoor. De hoeveelheid fosfaat onder de bouwvoor gemeten met P-CaCl<sub>2</sub> was erg laag, waardoor veranderingen niet duidelijk naar voren komen. Bij P-Al werd het effect van uitmijnen bij de hogere fosfaattoestanden zichtbaar, bij een lage toestand was dit nauwelijks het geval.

#### *Organische stof*

Omdat bij lage fosfaattoestand de productie vaak achterbleef (afhankelijk van het gewas) was de vraag of daardoor ook gewasrestenmassa c.q. organische stof in de bodem achterbleef, waardoor het bodem organisch stofgehalte zou dalen. Uit metingen van 2008 en 2017-2020 lijkt dit niet het geval. Ook bij de onbemeste objecten werd geen lager bodem organisch stofgehalte gevonden dan bij de referentie. Ook in de 'early indicators' zoals de HWC, POXC en DOC lieten geen verschil zien tussen de objecten.

#### *Aanbevelingen voor de praktijk*

Zoals eerder benoemd geldt voor deze gronden dat een bemesting groter of gelijk aan de evenwichtsbemesting ( $\sim 70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ ) vanuit landbouwkundig opzicht enkel nodig is bij een fosfaattoestand gelijk of kleiner dan het landbouwkundig streeftraject. Een bemesting met  $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  is echter te laag om een toestand aan de bovenkant van het landbouwkundig streeftraject te handhaven, of een lage toestand te verhogen tot binnen het streeftraject. Binnen het huidige systeem van gebruiksnormen is hierin voorzien door een maximale bemesting van  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  bij een toestand onder het landbouwkundig streeftraject (Pw <25) en van  $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  bij een toestand aan de onderkant van het traject (Pw 25-35). Een bemesting in situaties boven het landbouwkundig streeftraject leidt tot een verdere verhoging van de fosfaattoestand, en geeft een onnodig risico op verliezen. Volgens het huidige stelsel mag in deze situatie bemest worden met  $40\text{-}60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ . Bezien vanuit fosfaat is dit meer dan voldoende om optimale gewasopbrengsten te behalen. Echter, er kunnen wel andere redenen meespelen om deze bemesting aan te houden, zoals de aanvoer van organische stof en het beperken van kunstmeststikstof en -kali. Bij een hogere norm mag namelijk meer dierlijke mest worden aangevoerd, waardoor er meer organische stof en nutriënten zoals stikstof en kali worden aangevoerd, waardoor de kunstmestgift beperkt kan worden.

#### *Aanbevelingen voor beleid*

Duidelijk is geworden dat een groter fosfaatoverschot een groter risico geeft op verliezen. Tussen de objecten was verschil te zien in de concentratie in het bodemvocht gedurende de wintermaanden. De verliezen zijn echter niet gekwantificeerd. Bovendien waren de fosfaatconcentraties in het bodemvocht op een diepte van 75cm erg laag, en vallen doorgaans binnen de milieukundige norm. Het is daarom niet aan te geven bij welk fosfaatoverschot de milieukundige norm wordt behaald. Beter inzicht in deze relatie is wel gewenst, om de risico's van fosfaatoverschotten beter te begrijpen en in te kunnen schatten.

#### *Voortzetten proef*

Vergelijkbare proeven naar de effecten van fosfaatbemestingsniveaus in de akkerbouw worden uitgevoerd in Wijster en Marknesse (zie Ehlert et al., 2018). Dat deze fosfaatproeven op drie verschillende grondsoorten wordt uitgevoerd is van grote meerwaarde, gezien er tussen de locaties grote verschillen zijn in het gedrag van fosfaat in de bodem. Dit heeft consequenties voor de interpretatie van fosfaatindicatoren in relatie tot gewasopbrengsten, en het gebruik van de fosfaatindicatoren voor gebruiksnormen. Het belang van het in stand houden van de huidige proef is daarom breder dan de interpretatie van de objecten aangelegd in deze proef.

---

Bovendien is de fosfaattoestand van enkele objecten (nog) niet gestabiliseerd. Zo is het de vraag waar de fosfaattoestand bij evenwichtsbemesting (P2-bemest en P1-bemest) zal stabiliseren. Daarnaast zijn de fosfaattoestanden van de uitmijnobjecten nog niet allen gestabiliseerd. Om vast te stellen hoeveel tijd dit kost, dienen deze objecten nog langer gevolgd moeten worden.

Overigens hebben de hoge fosfaatgiften geleid tot een bijzonder hoge fosfaattoestand in de bodem. Deze komen in de praktijk niet of nauwelijks meer voor. Voorgesteld is daarom om de huidige behandelingen met 140 en 280 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> om te zetten naar een behandeling met respectievelijk 60 en 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Dit zal inzicht geven in de snelheid waarmee de hoge toestanden bij een praktijkgift ter hoogte van de gebruiksnorm zullen dalen naar klasse Neutraal.

#### *Aanbevelingen voor vervolgonderzoek*

Op basis van metingen is gebleken dat de milieukundige en onvermijdelijke verliezen niet eenvoudig vast te stellen zijn. Voorgesteld wordt om vervolgonderzoek te richten op het nauwkeurig vaststellen van verliezen en uitspoeling, bijvoorbeeld door het gebruik van modellering.

Zoals hierboven al genoemd reageert elke bodem anders op fosfaatbemesting en uitmijning. Een dergelijke proef met uitmijnobjecten ontbreekt vooralsnog in de regio waar deze hoge fosfaattoestanden veelvuldig voorkomen (het zuidoostelijk zandgebied). Onderzoek naar de effecten van uitmijnen in een dergelijke regio is gewenst.



## 6 Literatuur

Ehlert, P.A.I., Burgers, S.L.G.E., en Steenhuizen, J.W. (1996). Verandering van de beschikbaarheid van fosfaat in grond onder invloed van bemesting. Observationeel statistisch onderzoek naar het voorkomen van 'onvermijdbare fosfaatverliezen' op basis van gegevens van veeljarige bemestingsproeven. Rapport 51, AB DLO, Haren/Wageningen, 74 pp. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/333926>

Ehlert, P.A.I., van Wijk, C.A.P., en Dekker, P.H.M. (2003). Fosfaatbalansen op perceelsniveau; scan van de resultaten van vier veeljarige veldproeven op bouwland. Publicatie 305, PPO, Wageningen, 2003. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/354124>

Ehlert, P.A.I., Curth-van Middelkoop, J.C., van der Salm, C., en Dekker, P.H.M. (2008). Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op langere termijn: stand van zaken 2007. Wageningen: Alterra, (Alterra-rapport 1665) - 90 p. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/42397>

Ehlert, P.A.I., van Middelkoop, J.C., van Geel, W.C.A., de Haan, J.J., en Regelink, I. (2018). Veeljarige fosfaatveldproeven op gras- en bouwland: syntheserapport. Wageningen Environmental Research, rapport nr. 2906. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/460816>

Holwerda, H. (2023). Trends in fosfaattoestanden op basis van lange-termijn proeven [thesis].

de Haan, J.J., Korthals, G.W., Hanegraaf, M.C., Postma, J., van Egmond, F.M., Olijve, A.J., van Asperen, P., Vervuurt, W., Rombout, S., Zijnenburg, A., Tolhoek, J., Simonse, D., Schierholz, R., Teuling, K., Kurm, V., Brinkman, P., Bongiorno, G., Zwetsloot, M., van Tintelen, W., Bloem, J., Visser, J., Jansen, S., Ramaker, A., Gaastra, S., Spoor, M. en Schilder, M.T. (2021). Bodemkwaliteitsmetingen 2019 in Bedrijvennetwerk Bodemmetingen: eerste analyse van de meetresultaten 2019 van integrale bodemkwaliteit op 16 akkerbouwbedrijven. Wageningen University and Research, nr. WPR-888. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/554216>

Regelink, I., van Middelkoop, J.C., van Geel, W.C.A., en Ehlert, P.A.I. (2021). De enkelvoudige versus de gecombineerde indicator voor bepaling van de fosfaattoestand van de bodem. Wageningen Environmental Research, rapport nr. 3129. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/557176>

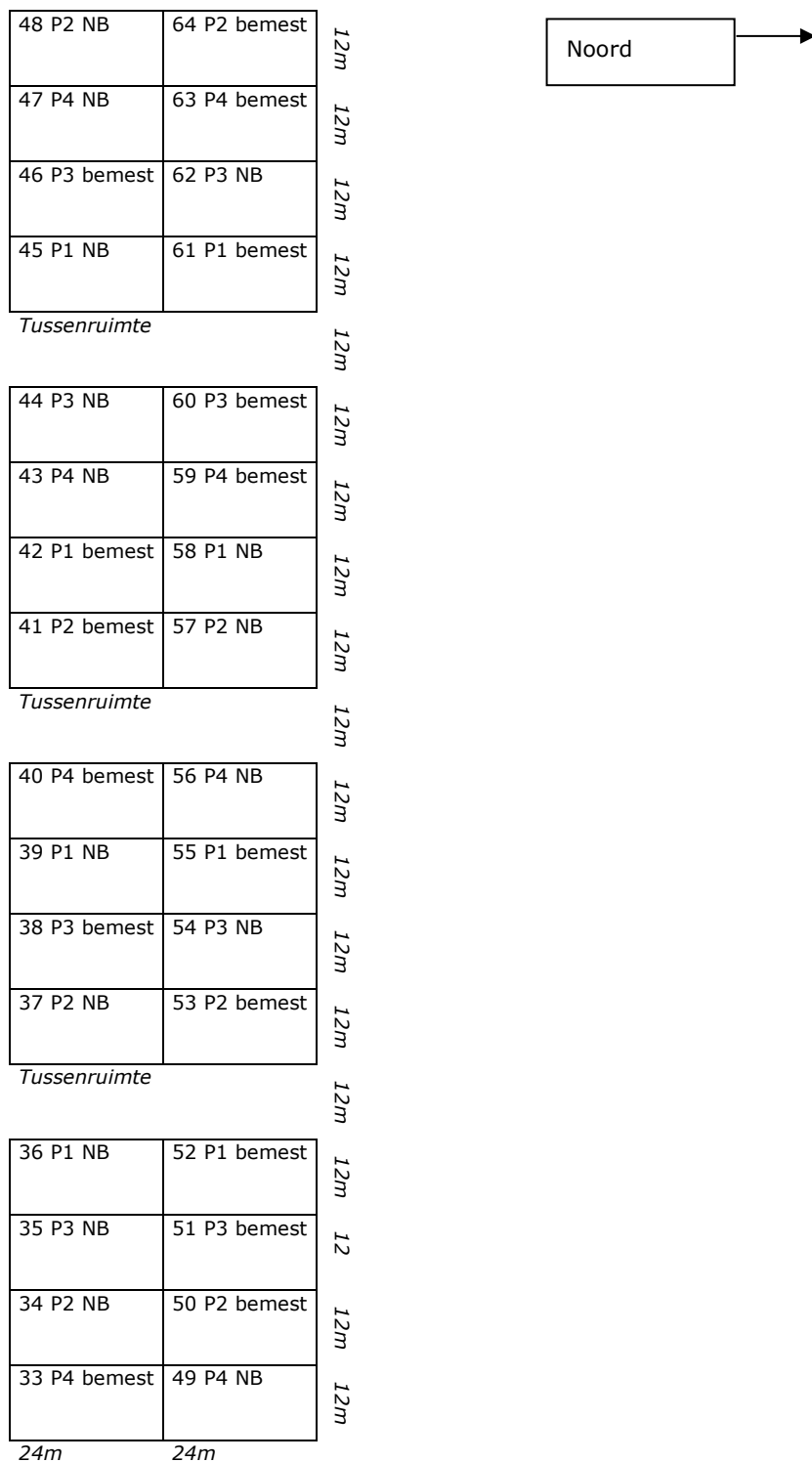
Schoumans, O.F. (2015). Phosphorus leaching from soils: process description, risk assessment and mitigation [PhD thesis]. Alterra, Wageningen. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/351120>

Schröder, J.J. en Corré, W.J. (2000). Actualisering N- en P-deskstudies, PRI rapport 22. Plant Research International, Wageningen.

TCB [Technische Commissie Bodembescherming]. (1990). Advies parameters ten behoeve van het protocol fosfaatverzadigde gronden. S/90-09, 6 maart 1990.

Van Wijk, C., de Haan, J., Ehlert, P.A.I., en van den Berg, W. (2013). Lange termijn effecten van fosfaatbalansen op bouwland; fosfaatrappen proefveld Lelystad. Wageningen UR: Praktijkonderzoek Plant & Omgeving. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/264018>

# Bijlage 1 Schema Proefveld Lelystad



*NB = niet bemest*

## Bijlage 2 Berekening van de fosfaatafvoer

De jaarlijkse fosfaatafvoer is berekend op basis van de opbrengst en het bijbehorende P-gehalte. Om de relatie tussen het jaarlijkse fosfaatoverschot en de veranderingen in de bodem fosfaattoestand te bepalen, heeft het de voorkeur om de totale fosfaatafvoer te bepalen op basis van het product dat van het perceel wordt afgevoerd. In vrijwel alle jaren is hiervoor de totale opbrengst van het geoogste product genomen (zonder de grondtarra in geval van de rooivruchten). Hierop zijn een aantal uitzonderingen. In 2013 is de netto opbrengst van de zaaiuien bepaald, dit betreft het totaal gewicht van gezonde uien in alle sorteringen exclusief de uitval. De uitval was overigens erg gering, dit betrof 0,3% van de totale opbrengst. Voor de overige jaren is voor de uien uitgegaan van de netto opbrengst plus de uitval. In 2015 en 2019 is voor de aardappelteelt de netto opbrengst meegenomen in de berekening van de fosfaatafvoer, dit is het totale gewicht van alle sorteringen exclusief de uitval. De uitval bedroeg gemiddeld in de proef 1,14% in 2015 en 3,3% in 2019. In 2005 is er voor de aardappelteelt een covariantieanalyse uitgevoerd vanwege de sterke wateroverlast. Als covariabele zijn hoogteverschillen in het proefveld opgenomen, welke hebben geleid tot lokale plasvorming in het veld. De fosfaatafvoer is daardoor niet op de werkelijke opbrengsten gebaseerd, maar op de gefitte waarden uit de analyse.

## Bijlage 3 Jaarlijkse opbrengsten en fosfaatafvoer

De jaarlijkse opbrengsten worden weergegeven in marktbaar opbrengst in ton per hectare, voor wintertarwe is dat de korrelopbrengst gecorrigeerd voor 15% vocht.

**Tabel 16** Jaarlijkse opbrengst (t/ha) in de periode 2005-2020.

Jaar	Gewas	P1		P2		P3		P4	
		0	70	0	70	0	140	0	280
<b>2005</b>	Aardappel	24	-	38	28	31	37	39	36
<b>2006</b>	Suikerbiet	89	84	88	91	90	90	88	90
<b>2007</b>	Wintertarwe	9	9	10	11	10	10	10	10
<b>2008</b>	Zaaiui	87	91	92	92	92	93	95	94
<b>2009</b>	Peen	125	124	129	128	130	131	131	127
<b>2010</b>	Aardappel	62	66	64	69	67	73	75	77
<b>2011</b>	Suikerbiet	85	92	84	91	89	91	92	94
<b>2012</b>	Zomergerst	8	8	8	8	8	8	8	8
<b>2013</b>	Zaaiui	30	38	36	44	40	42	42	41
<b>2014</b>	Wintertarwe	8	8	8	9	8	8	8	8
<b>2015</b>	Aardappel	42	58	48	62	55	61	62	63
<b>2016</b>	Suikerbiet	102	106	101	100	106	104	103	109
<b>2017</b>	Zaaiui	73	92	89	94	91	94	94	92
<b>2018</b>	Wintertarwe	11	11	11	11	11	12	11	12
<b>2019</b>	Aardappel	56	67	57	69	68	71	70	74
<b>2020</b>	Suikerbiet	98	113	117	118	106	113	122	117

## Bijlage 4 Maatsortering van aardappel, ui en peen

**Tabel 17** Het aandeel uien (op basis van gewicht) per maatsortering, gemiddeld over van de jaren 2008, 2013 en 2017.

Maat	P1		P2		P3		P4	
	0	70	0	70	0	140	0	280
	<i>Absoluut (in ton/ha)</i>							
<35 mm	0,7	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5
35-40 mm	1,0	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9
40-60 mm	32,8	28,3	31,1	29,0	29,4	28,3	30,2	27,4
60-80 mm	27,7	41,4	38,1	44,1	41,7	44,5	43,1	44,2
>80 mm	0,7	1,9	1,4	1,5	1,7	1,9	1,9	1,8
	<i>Relatief (in %)</i>							
<35 mm	1,1	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,7
35-40 mm	1,6	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,2
40-60 mm	52,1	38,8	43,2	38,1	39,7	37,2	39,5	36,7
60-80 mm	44,0	56,8	52,9	58,0	56,3	58,6	56,5	59,1
>80 mm	1,2	2,6	1,9	1,9	2,3	2,5	2,5	2,4

**Tabel 18** Het aandeel aardappels (op basis van gewicht) per maatsortering, gemiddeld over van de jaren 2010, 2015 en 2019.

Maat	P1		P2		P3		P4	
	0	70	0	70	0	140	0	280
	<i>Absoluut (in ton/ha)</i>							
<35 mm	1,8	1,6	1,7	1,5	1,7	1,7	1,5	1,7
35-55 mm	27,4	27,5	30,1	27,6	29,2	27,5	27,8	27,4
>55 mm	24,1	34,6	24,9	37,8	32,6	39,2	39,8	42,1
	<i>Relatief (in %)</i>							
<35 mm	3,5	2,5	3,0	2,2	2,6	2,4	2,2	2,3
35-55 mm	52,2	43,5	53,2	41,4	46,4	39,9	40,0	38,2
>55 mm	44,3	54,0	43,8	56,4	51,0	57,6	57,8	59,5

**Tabel 19** Het aandeel peen (op basis van gewicht) per maatsortering, data van 2009.

Maat	P1		P2		P3		P4	
	0	70	0	70	0	140	0	280
	<i>Absoluut (in ton/ha)</i>							
<21 mm	4,2	3,9	4,5	4,6	4,7	4,2	4,0	5,4
21-40 mm	108,1	103,3	110,0	105,5	105,2	103,0	104,4	99,7
>40 mm	9,7	13,3	12,7	14,9	16,3	20,5	17,9	19,3
	<i>Relatief (in %)</i>							
<21 mm	3,5	3,2	3,6	3,7	3,7	3,3	3,1	4,3
21-40 mm	88,6	85,7	86,5	84,4	83,4	80,7	82,7	80,2
>40 mm	7,9	11,1	9,9	11,9	12,9	16,1	14,2	15,5

## Bijlage 5 Fosfaatafvoer

**Tabel 20** P-gehalte van de gewassen geteeld in de periode 2005-2020.

Jaar	Gewas	P1		P2		P3		P4	
		0	70	0	70	0	140	0	280
2005	Aardappel								
2006	Suikerbiet	1,2	1,2	1,4	1,3	1,5	1,5	1,4	1,5
2007	Wintertarwe	3,3	3,4	3,5	3,4	3,5	3,6	3,6	3,4
2008	Zaaiui	2,6	2,7	2,7	2,7	2,9	2,9	3,0	3,2
2009	Peen	2,0	2,2	2,2	2,4	2,4	2,7	2,6	3,0
2010	Aardappel	2,0	2,2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,7	2,9
2011	Suikerbiet	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
2012	Zomergerst	3,3	3,3	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,6
2013	Zaaiui	2,5	2,8	3,0	3,0	3,0	3,2	3,1	3,2
2014	Wintertarwe	3,5	3,5	3,7	3,7	3,8	3,7	3,7	3,7
2015	Aardappel	1,0	1,2	1,1	1,3	1,1	1,6	1,3	2,2
2016	Suikerbiet	0,9	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
2017	Zaaiui	1,9	2,2	2,2	2,3	2,2	2,5	2,2	2,9
2018	Wintertarwe	2,7	2,6	2,6	2,9	2,6	3,0	2,9	3,5
2019	Aardappel	1,7	1,4	1,4	1,3	1,6	1,4	1,6	1,6
2020	Suikerbiet	1,0	1,5	1,3	1,5	1,6	1,6	1,7	1,6
2006-2020 <sup>4</sup>		90	96	98	100	102	107	107	117

**Tabel 21** Jaarlijkse fosfaatafvoer met marktbaar product (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /ha).

Jaar	Gewas	P1		P2		P3		P4	
		0	70	0	70	0	140	0	280
2005	Aardappel <sup>5</sup>	19	14	34	25	30	36	52	48
2006	Suikerbiet	55	54	66	64	70	70	68	73
2007	Wintertarwe	57	62	66	74	66	69	67	64
2008	Zaaiui	61	67	67	68	71	71	74	78
2009	Peen	66	73	76	82	85	98	92	106
2010	Aardappel	50	55	53	60	62	68	81	86
2011	Suikerbiet	59	68	63	67	67	67	68	69
2012	Zomergerst	51	52	54	55	55	55	54	57
2013	Zaaiui	21	28	29	33	32	36	35	34
2014	Wintertarwe	58	58	61	63	63	61	62	60
2015	Aardappel	24	37	28	44	35	56	46	79
2016	Suikerbiet	51	57	62	58	59	66	63	68
2017	Zaaiui	44	64	60	68	59	74	66	83
2018	Wintertarwe	56	56	57	63	59	67	65	79
2019	Aardappel	47	49	43	47	55	51	56	56
2020	Suikerbiet	43	74	72	82	71	82	91	87

<sup>4</sup> Gestandaardiseerd gemiddelde over de periode 2006-2020, P2-bemest is 100%.

<sup>5</sup> In 2005 waren de aardappelopbrengsten, net als de fosfaatafvoer, laag vanwege wateroverlast. Deze cijfers worden niet meegenomen als het gaat om de opbrengsten, omdat de verschillen niet toe te schrijven zijn aan de objecten. Deze cijfers worden wel meegenomen in het kader van de verandering van de fosfaattoestand van de bodem omdat het de gerealiseerde fosfaatafvoer betreft.

## Bijlage 6 Gewasresten

**Tabel 22** Bovengrondse gewasresten (ton vers product per hectare)

		P1		P2		P3		P4	
		0	70	0	70	0	140	0	280
2005	Aardappel		12,9		28,7		22,7		39,4
2006	Suikerbiet		36,9		38,9		41,4		46,2
2007	Wintertarwe								
2008	Zaaiui								
2009	Peen		21,0						21,3
2010	Aardappel								
2011	Suikerbiet		44,7		41,2		39,7		42,2
2012	Zomergerst		4,9		4,6		4,9		6,4
2013	Zaaiui		25,3		25,2		25,7		24,9
2014	Wintertarwe		5,7		5,8		5,0		5,7
2015	Aardappel		14,3		23,8		19,0		23,8
2016	Suikerbiet		60,0		42,8		44,0		43,3
2017	Zaaiui		6,8		3,6		2,7		2,2
2018	Wintertarwe		9,0		9,2		10,1		11,4
2019	Aardappel		32,5		48,4		43,7		65,7
2020	Suikerbiet	14,6	17,5	21,9	21,6	16,4	18,1	21,0	18,8

**Tabel 23** Bovengrondse gewasresten (ton droog product per hectare)

		P1		P2		P3		P4	
		0	70	0	70	0	140	0	280
2005	Aardappel		2,2		3,1		2,3		3,3
2006	Suikerbiet		5,8		5,7		5,9		6,4
2007	Wintertarwe	4,1	4,8	5,2	4,6	5,1	5,2	4,8	5,0
2008	Zaaiui								
2009	Peen		1,0						1,1
2010	Aardappel								
2011	Suikerbiet		5,3		5,1		5,1		5,2
2012	Zomergerst		3,6		2,5		2,9		3,4
2013	Zaaiui		2,2		2,1		2,1		2,1
2014	Wintertarwe		4,5		4,9		4,1		4,6
2015	Aardappel		2,0		2,6		2,1		2,4
2016	Suikerbiet		8,8		5,2		6,1		5,5
2017	Zaaiui		1,4		1,4		1,3		1,4
2018	Wintertarwe		7,9		7,4		8,5		9,0
2019	Aardappel		4,3		5,8		5,1		7,2
2020	Suikerbiet	2,5	2,9	3,2	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2
Totaal*			55,7		53,6		54,0		58,9

\* Excl. 2009

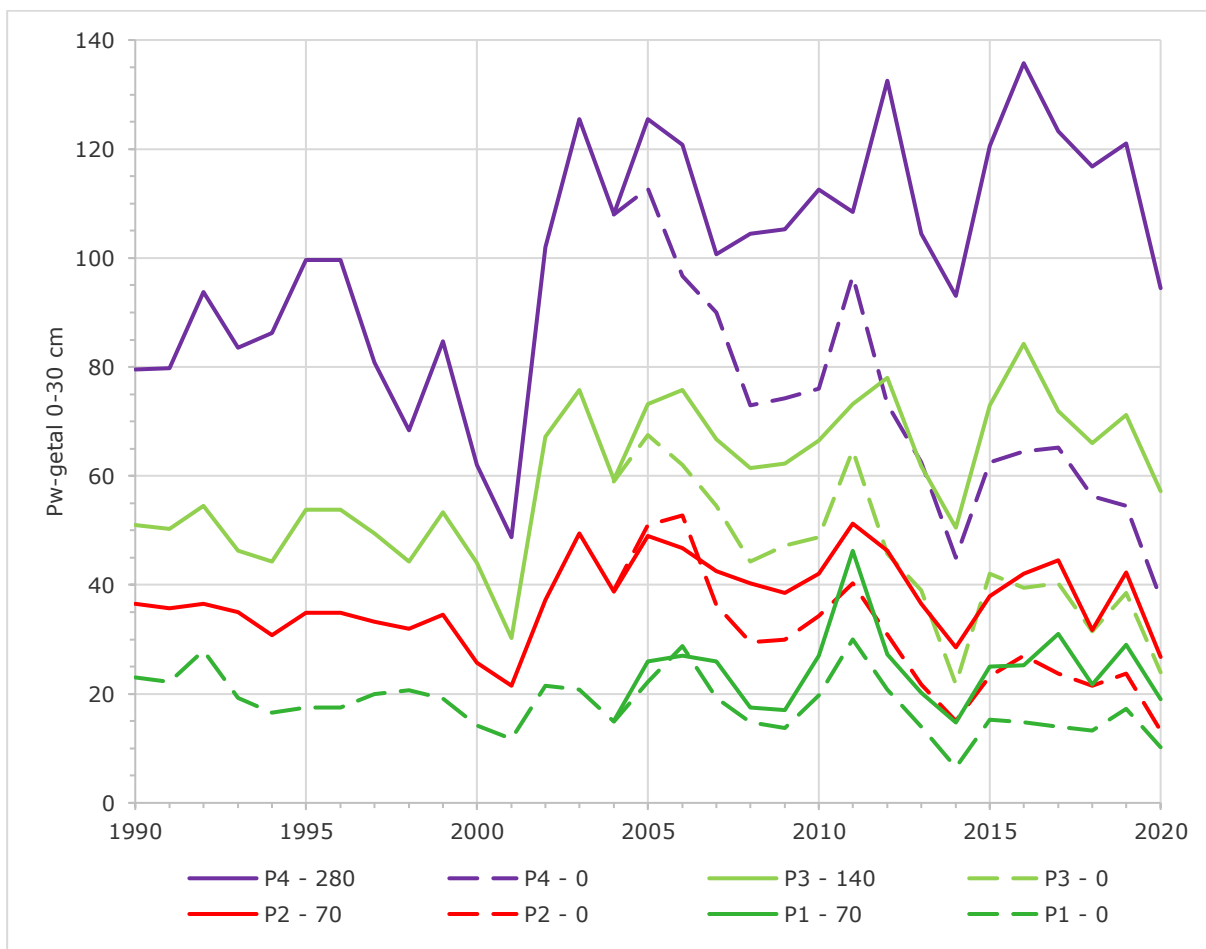
# Bijlage 7 Verloop fosfaattoestand in de bodem

**Tabel 24** Gemeten fosfaattoestand in de laag 0-30cm in de periode 2005-2020 bepaald als Pw-getal (mg P2O5/L), P-Al-getal (mg P2O5/100 g), P-CaCl2 (mg P/kg).

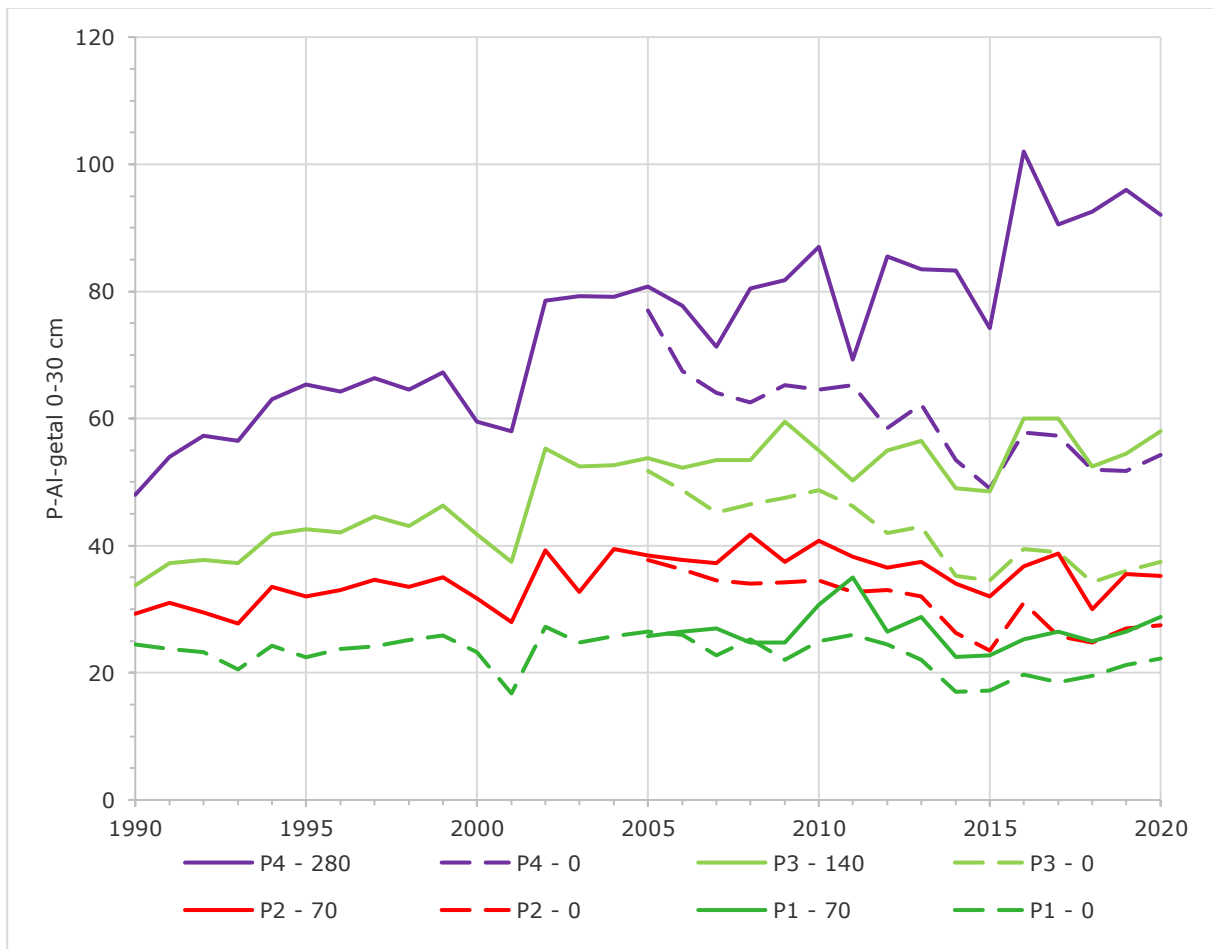
		<b>P1</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P4</b>
		<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>140</b>	<b>0</b>	<b>280</b>
Pw-getal	2005	22	26	51	49	68	73	113	126
	2006	29	27	53	47	62	76	97	121
	2007	19	26	36	43	55	67	90	107
	2008	15	18	30	40	44	62	73	105
	2009	14	17	30	39	47	62	74	105
	2010	20	27	34	42	49	67	76	113
	2011	30	46	40	51	65	73	97	109
	2012	21	27	31	46	46	78	73	130
	2013	11	20	22	37	39	50	63	105
	2014	7	15	15	29	22	51	45	93
	2015	15	20	23	38	42	73	63	121
	2016	15	25	22	42	40	84	65	136
	2017	15	31	24	45	40	71	65	123
	2018	13	22	22	32	32	66	56	117
2019	17	29	19	42	39	71	55	98	
2020	10	19	13	27	24	57	38	95	
P-CaCl2	2005	0,5	0,6	1,4	1,6	2,6	3,0	5,3	6,2
	2006	0,6	0,8	1,4	1,7	2,5	3,2	4,8	6,9
	2007	0,6	0,9	1,3	1,4	2,1	3,0	4,0	6,5
	2008	0,4	0,5	1,2	1,7	1,7	2,9	3,3	6,3
	2009	0,3	0,4	0,7	1,4	1,3	3,0	3,5	7,2
	2010	0,4	0,6	0,8	1,3	1,4	2,5	2,8	5,9
	2011	0,5	1,0	0,7	1,1	1,7	2,0	3,2	4,2
	2012	0,9	1,0	1,3	1,6	1,6	3,2	2,8	6,8
	2013	0,3	0,6	0,7	1,2	1,4	2,3	2,7	7,1
	2014	0,3	0,4	0,4	0,8	0,6	2,2	1,7	5,8
	2015	0,5	0,6	0,9	1,3	1,1	2,8	2,1	6,7
	2016	0,2	0,5	0,4	1,0	0,9	2,9	1,7	6,9
	2017	0,3	0,6	0,5	1,0	0,8	2,3	1,7	5,8
	2018	0,2	0,5	0,5	1,0	0,8	2,7	2,3	6,9
2019	0,3	0,5	0,3	1,1	0,9	2,6	2,8	5,0	
2020	0,4	0,7	0,6	1,2	1,0	2,9	1,7	6,1	
P-Al	2005	27	26	38	39	52	54	77	81
	2006	26	27	36	38	49	52	68	78
	2007	23	27	35	37	45	54	64	74
	2008	25	25	34	42	47	54	63	81
	2009	22	25	34	38	48	60	65	82
	2010	25	31	35	41	49	55	65	87
	2011	26	35	33	38	46	50	65	69
	2012	25	27	33	37	42	55	59	86
	2013	19	29	32	38	43	47	62	84
	2014	17	23	26	34	35	49	54	83
	2015	17	19	24	32	35	49	49	74



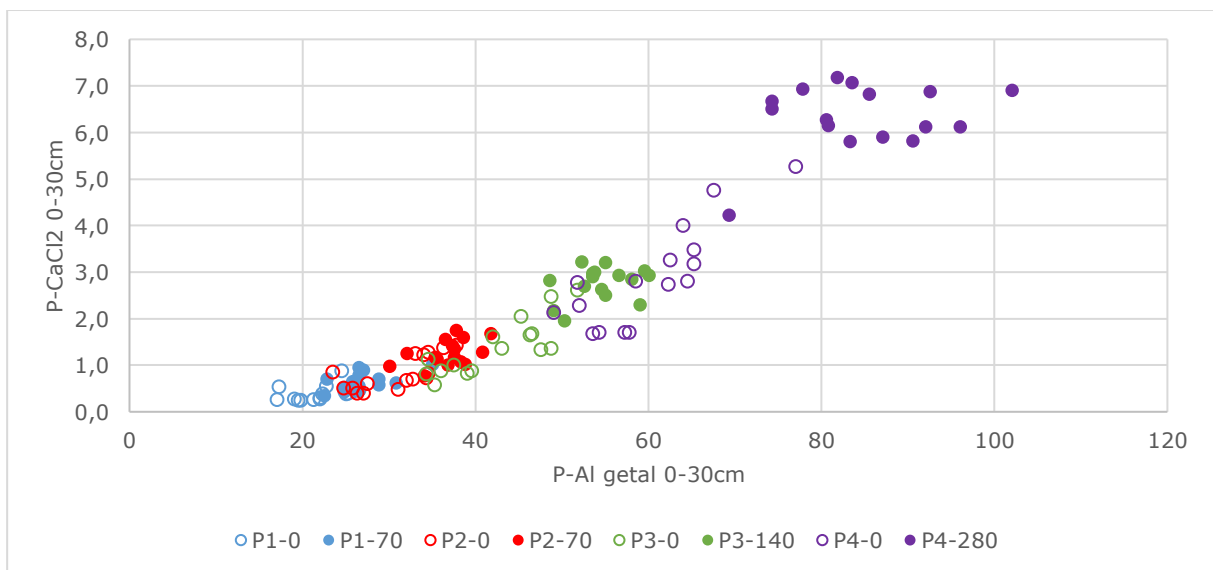
	2016	20	25	27	37	40	60	58	102
	2017	19	27	26	39	39	59	57	91
	2018	20	25	25	30	34	53	52	93
	2019	21	27	24	36	36	55	52	75
	2020	22	29	28	35	38	58	54	92



**Figuur 3-27** Verloop van het Pw-getal (0-30cm) in de periode 1990-2020.



**Figuur 3-28** Verloop van het P-AI getal (0-30cm) in de periode 1990-2020.



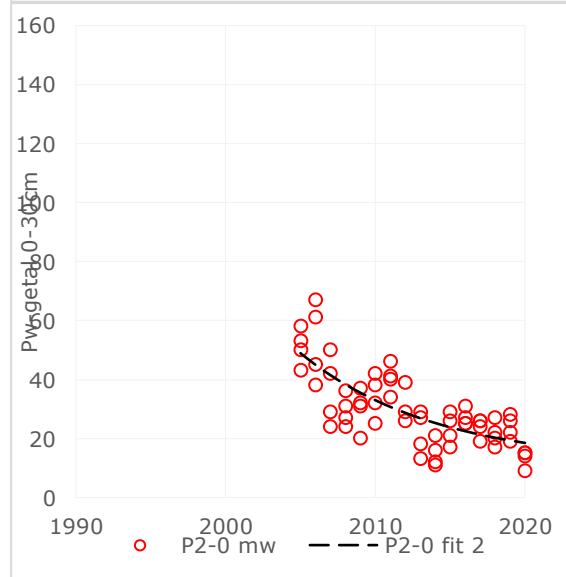
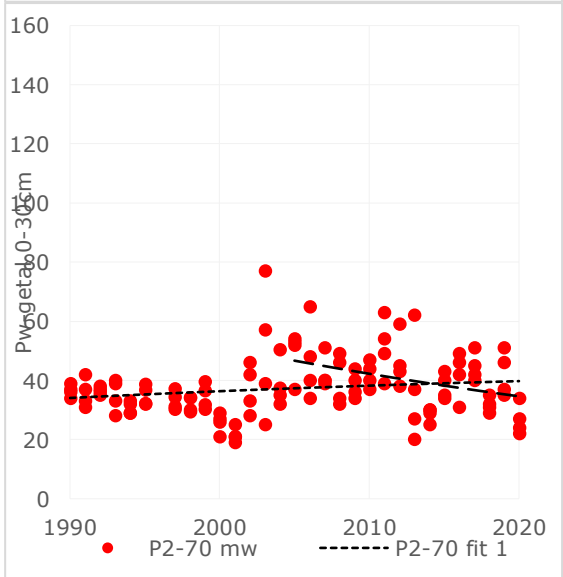
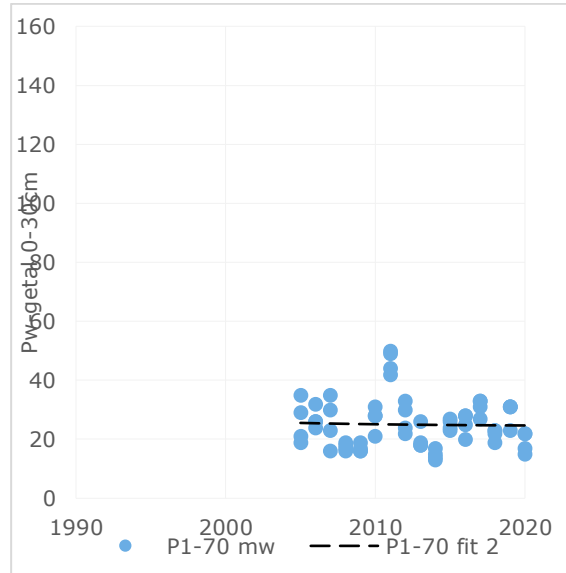
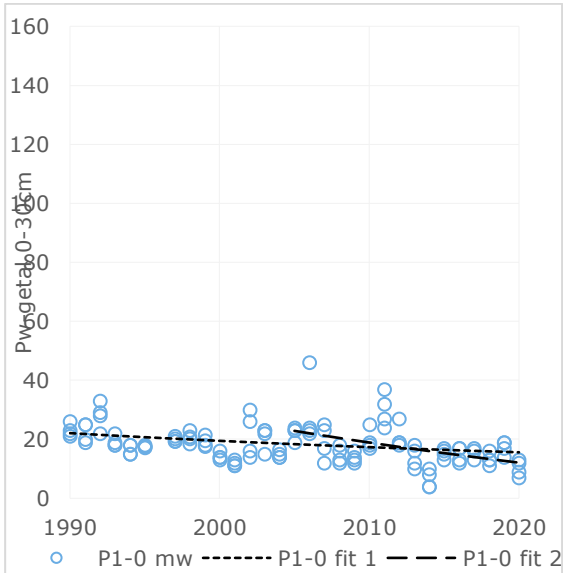
**Figuur 3-29** P-CaCl<sub>2</sub> uitgezet tegen P-AI over de periode 2005-2020.

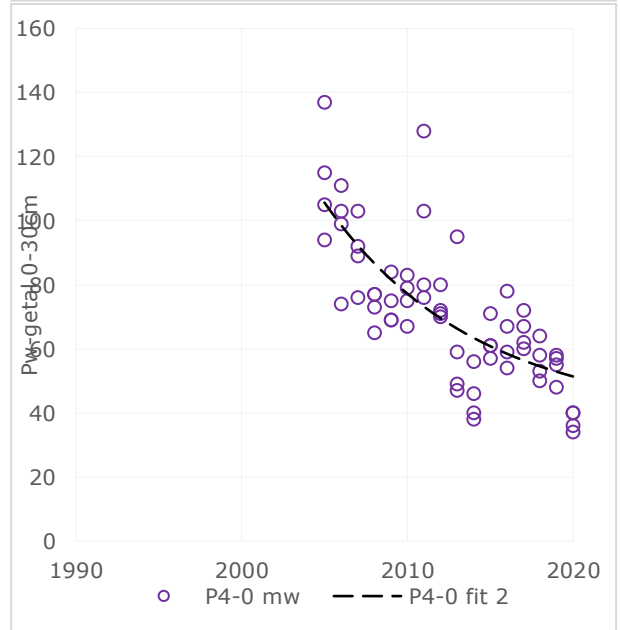
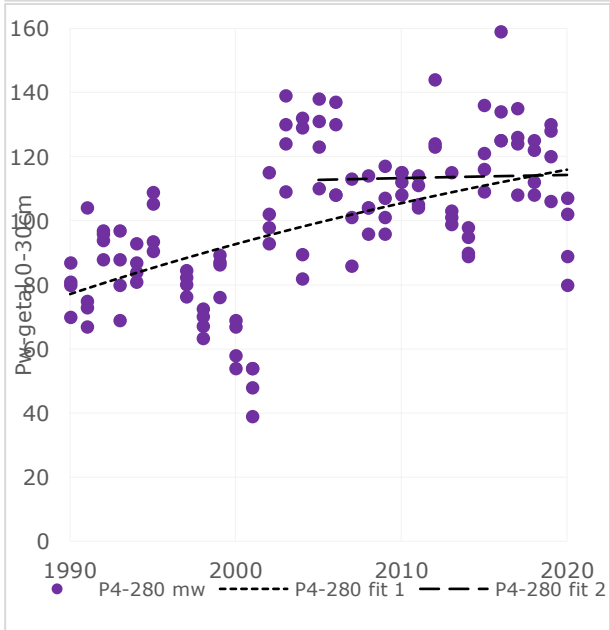
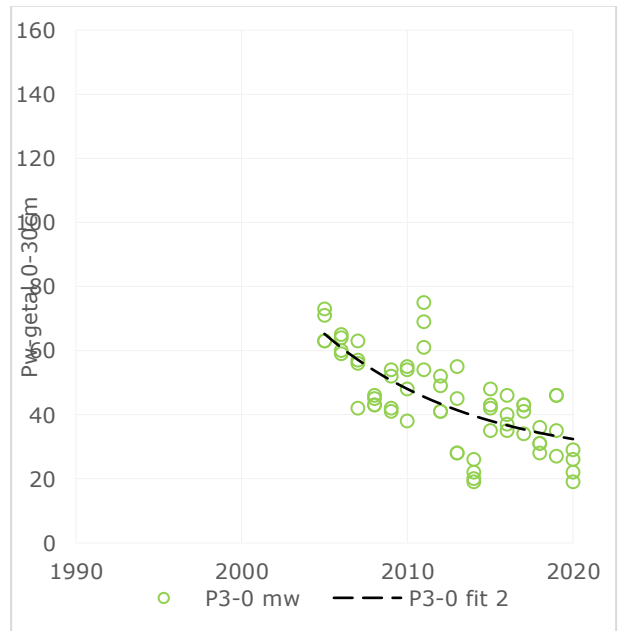
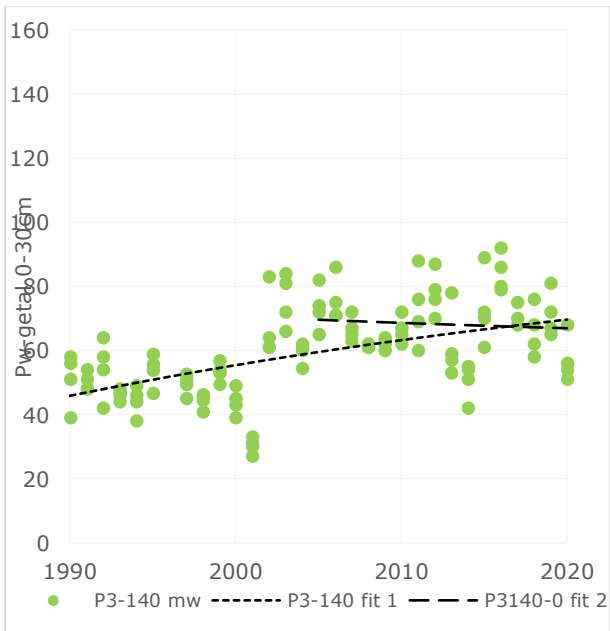
## Bijlage 8 Trendlijnen verloop fosfaattoestand

Het verloop van de fosfaattoestand is gefit op twee verschillende manieren: voor de periode 1990-2020 (fit 1) en voor de periode 2005-2020 (fit 2). Het verschil in benadering heeft invloed op de gevonden trend. Beide benaderingen zijn weergegeven in onderstaande tabel en figuren.

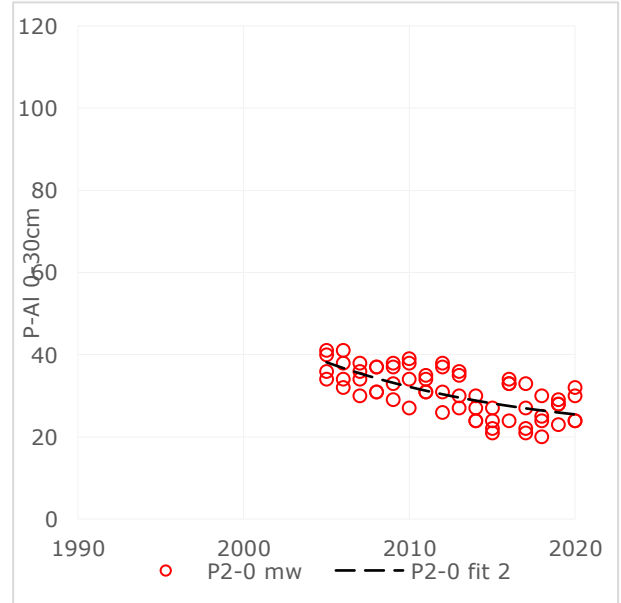
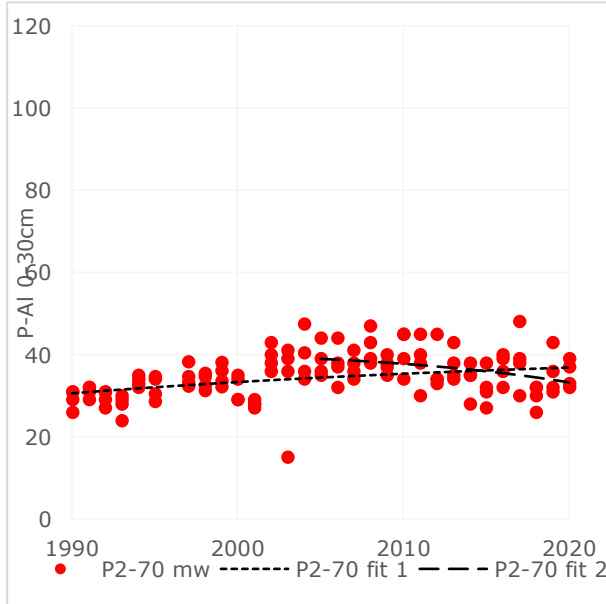
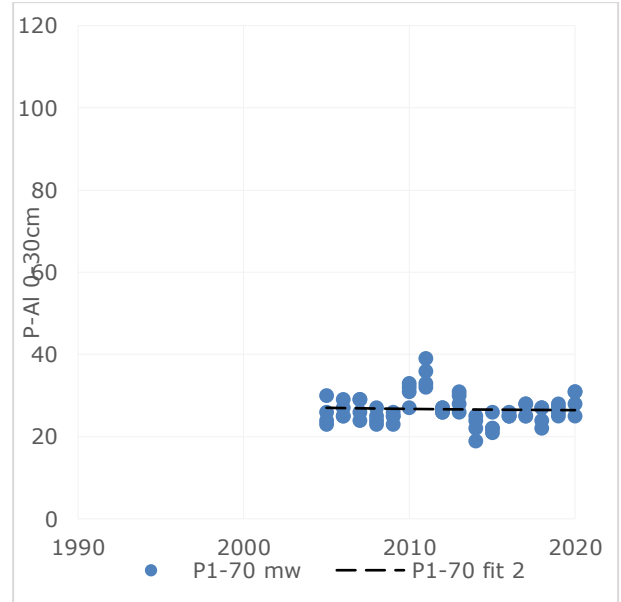
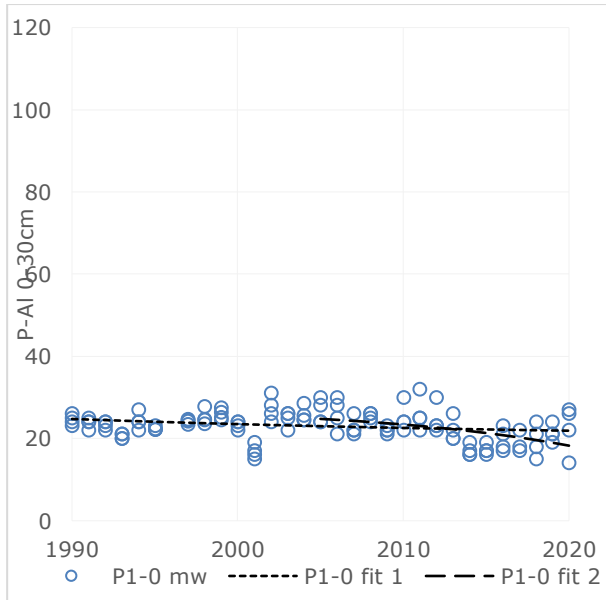
	c	a				b			
<i>Fit 1</i>									
		P1-0	P2-70	P3-140	P4-280	P1-0	P1-0	P3-140	P4-280
Pw (0-30cm)	0,02	7,70	46,71	98,59	163,13	14,38	-12,63	-52,67	-86,03
P-Al (0-30cm)	0,03	19,94	41,13	69,9	113,26	4,83	-10,55	-33,71	-62,33
Pw (30-60cm)	0,16	5,79	9,66	16,23	32,46	5,11	3,05	-5,18	-19,74
P-Al (30-60cm)	0,39	10,06	12,18	15,97	24	-1,82	-3,38	-8,87	-16,15
<i>Fit 2</i>									
		P1-0	P2-70	P3-140	P4-280	P1-0	P1-0	P3-140	P4-280
Pw (0-30cm)	0,02	-18,71	0,16	59,38	118,70	41,56	46,54	10,27	-5,97
P-Al (0-30cm)	-0,08	27,60	41,44	52,29	67,58	-2,81	-2,47	1,12	8,77
P-CaCl <sub>2</sub> (0-30cm)	0,16	0,31	0,97	2,56	6,33	0,24	0,76	0,52	-0,19
Pw (30-60cm)	0,68	4,54	8,19	14,78	30,33	5,77	6,70	7,58	16,79
P-Al (30-60cm)	0,35	8,49	10,04	14,43	23,41	3,66	4,40	7,63	6,27
P-CaCl <sub>2</sub> (30-60cm)	-1,37	0,24	0,27	0,46	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00
		P1-70	P2-0	P3-0	P4-0	P1-70	P1-0	P3-0	P4-0
Pw (0-30cm)	0,11	24,48	11,28	24,62	38,52	1,07	37,64	40,62	67,11
P-Al (0-30cm)	0,08	26,20	20,00	27,92	42,31	0,81	18,15	23,80	29,64
P-CaCl <sub>2</sub> (0-30cm)	0,21	0,58	0,49	0,78	1,78	0,18	1,06	1,89	3,48
Pw (30-60cm)	0,35	5,89	5,23	8,07	17,35	2,57	8,76	12,69	21,24
P-Al (30-60cm)	0,30	9,39	8,63	11,05	16,51	2,00	5,59	8,01	12,51
P-CaCl <sub>2</sub> (30-60cm)	0,22	0,22	0,23	0,22	0,43	0,13	0,10	0,41	0,93

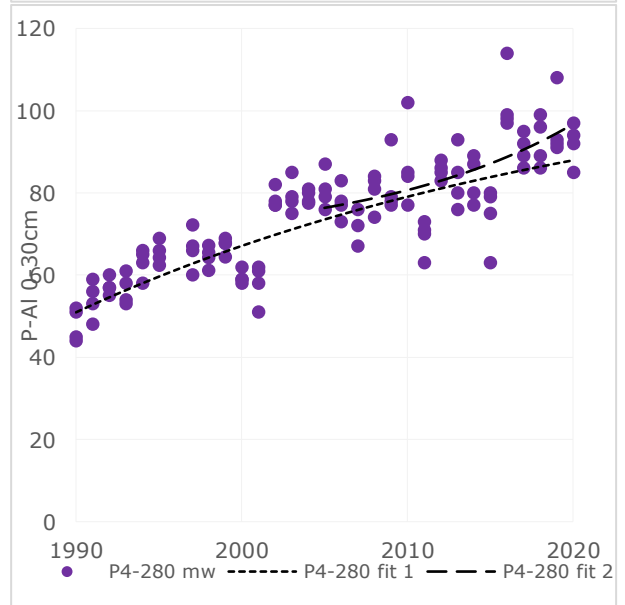
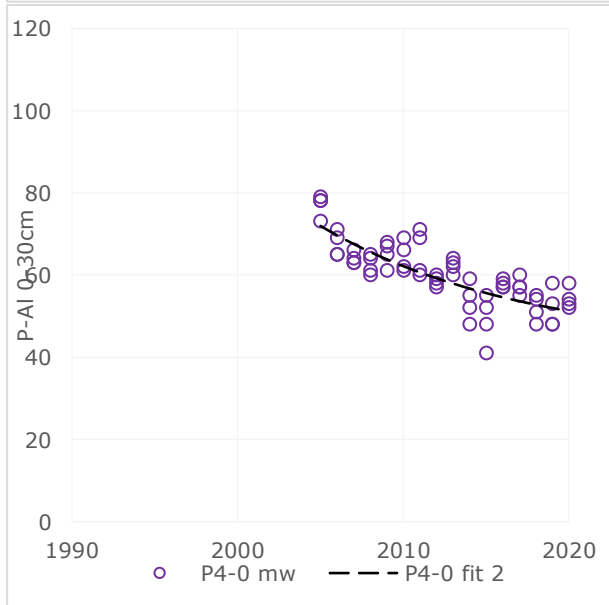
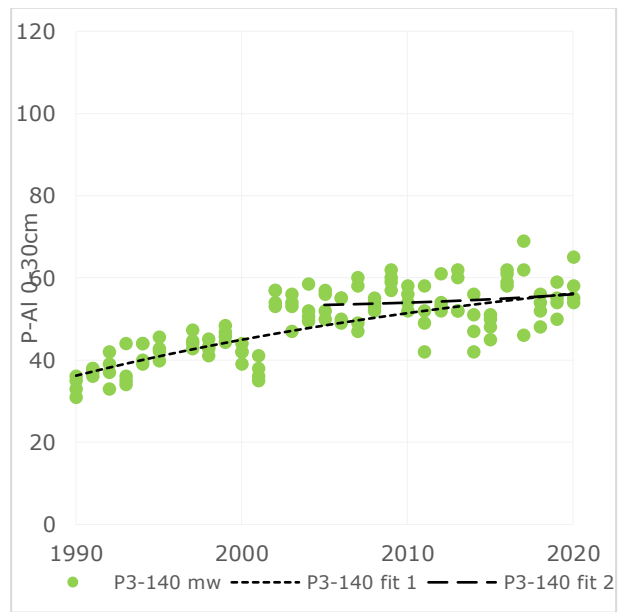
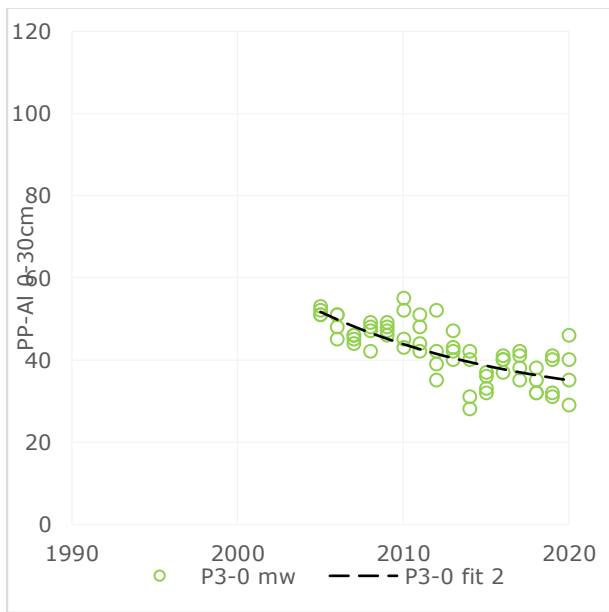
# 1.1 Pw-getal



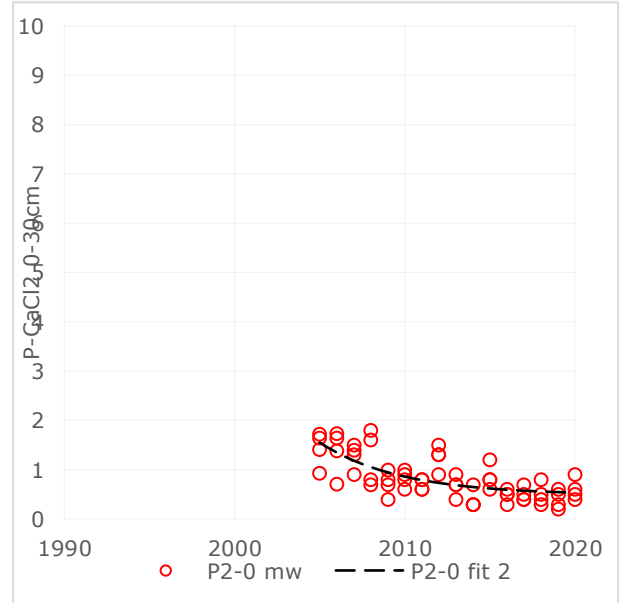
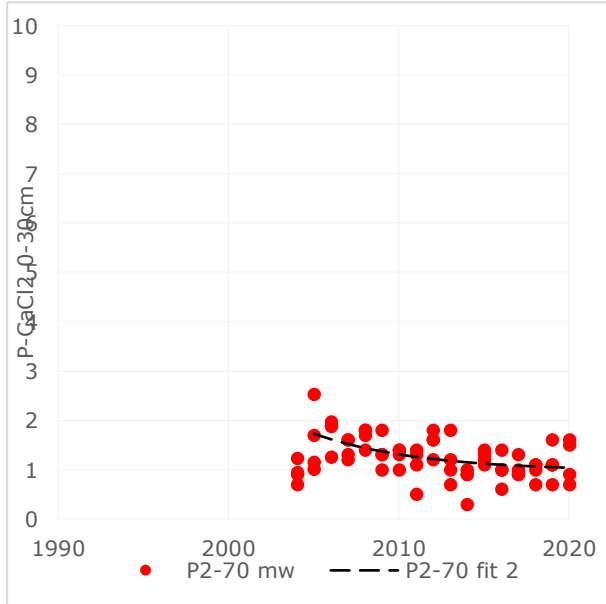
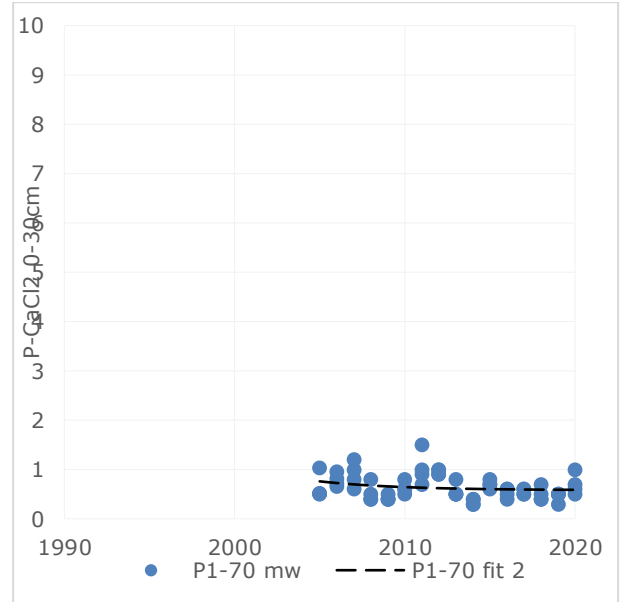
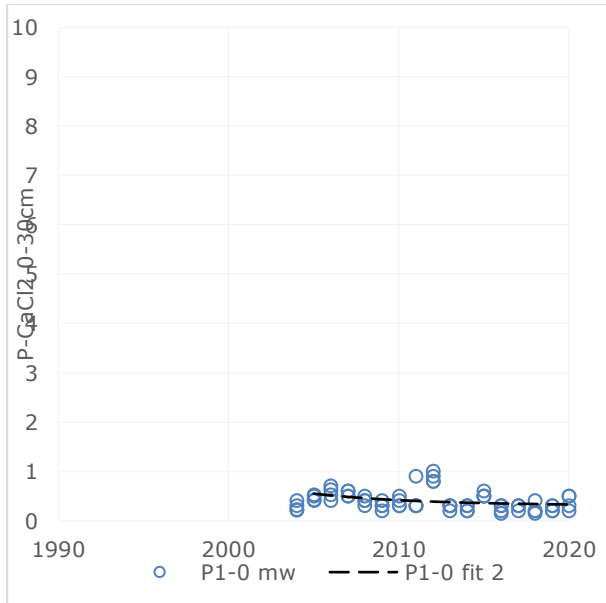


## 1.2 P-AI

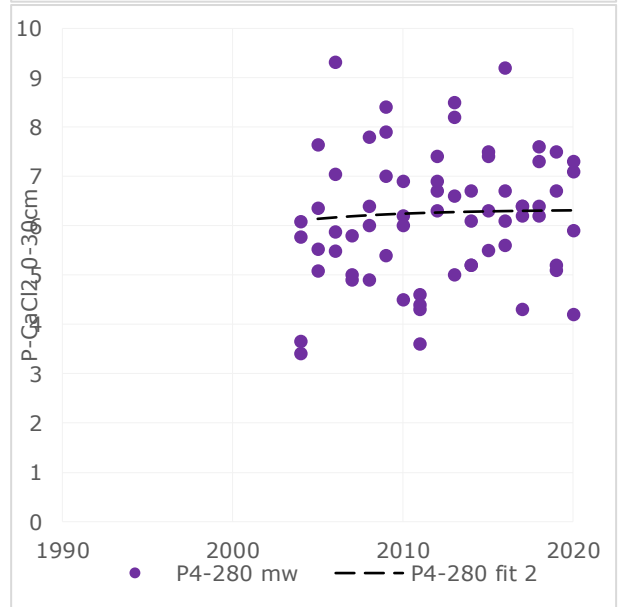
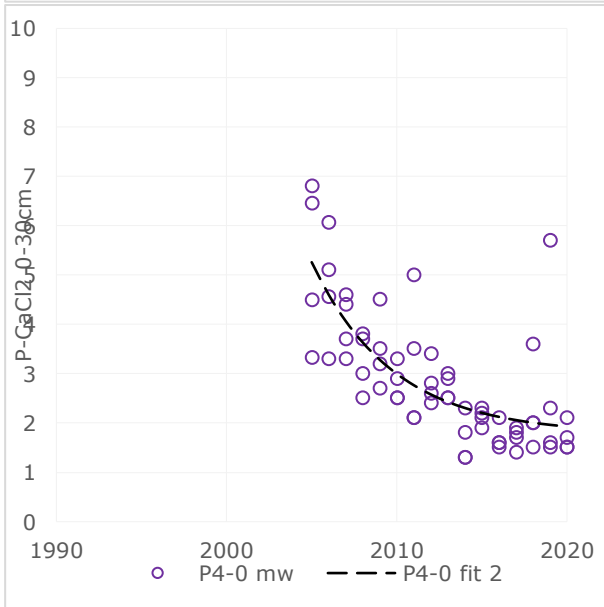
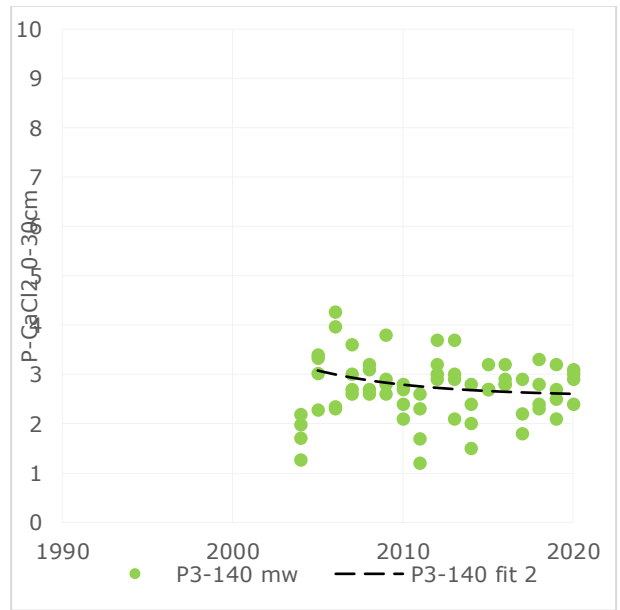
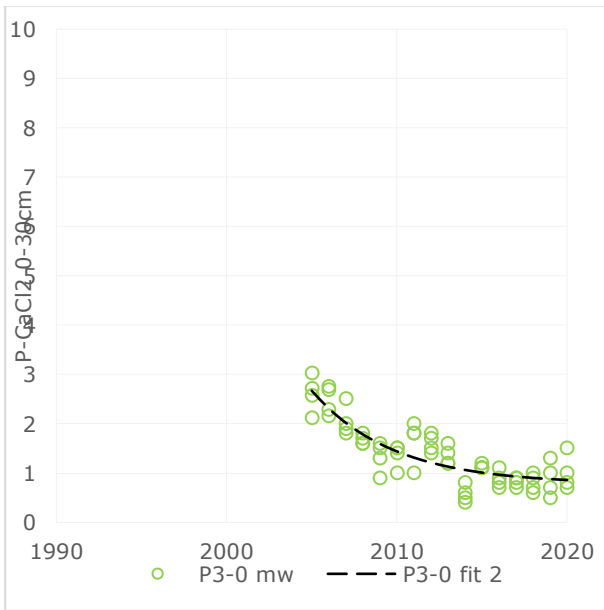




### 1.3 P-CaCl<sub>2</sub>



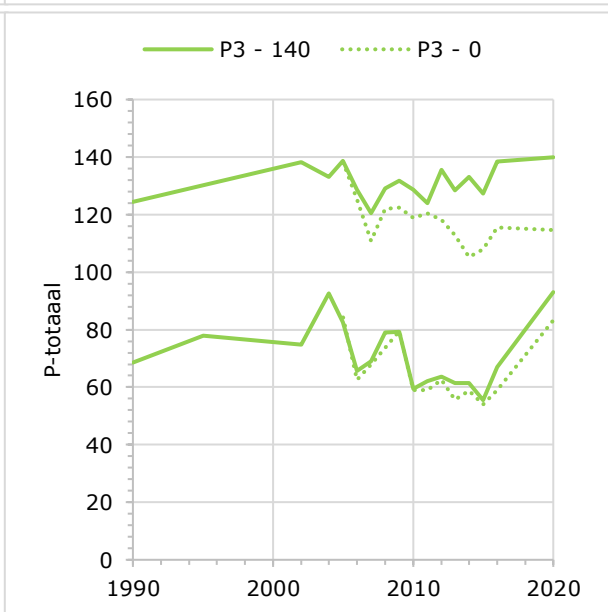
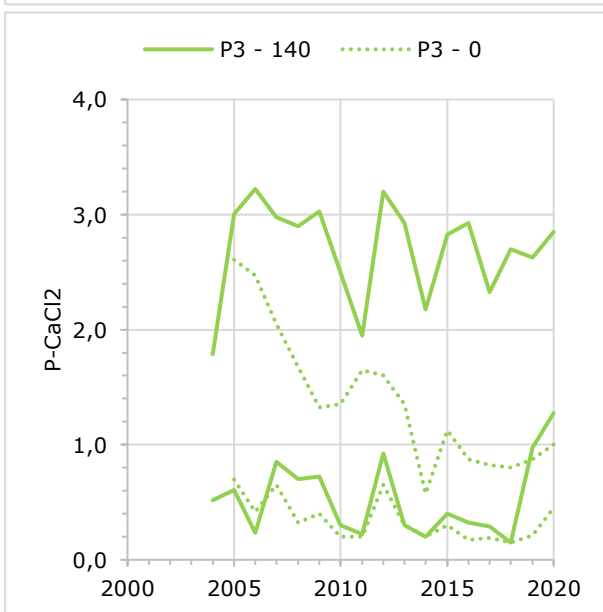
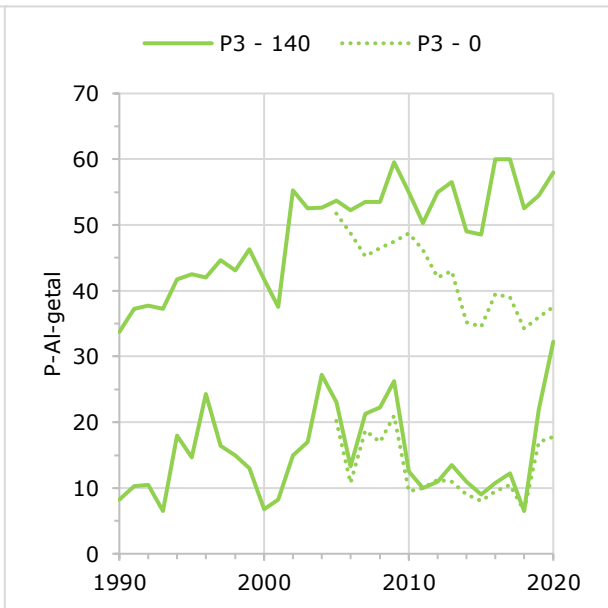
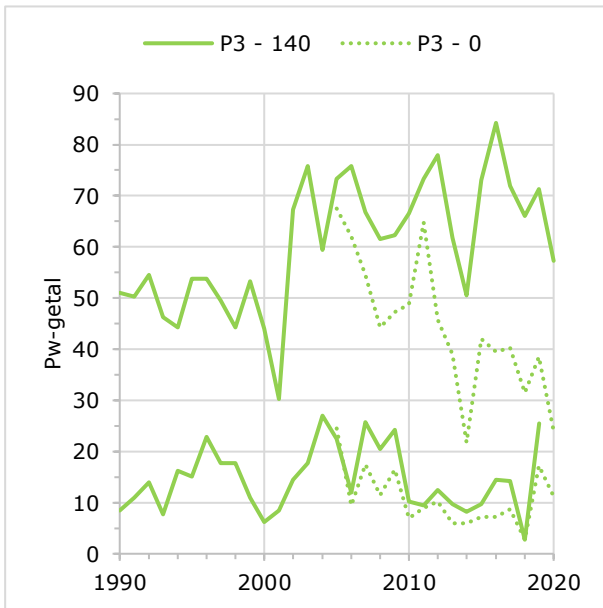


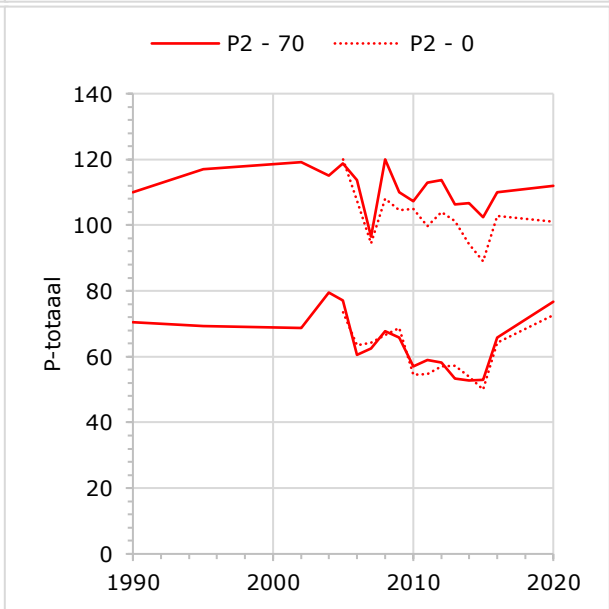
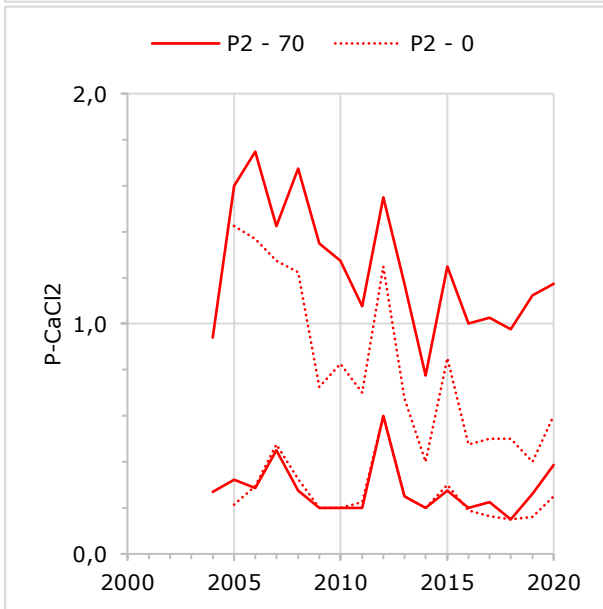
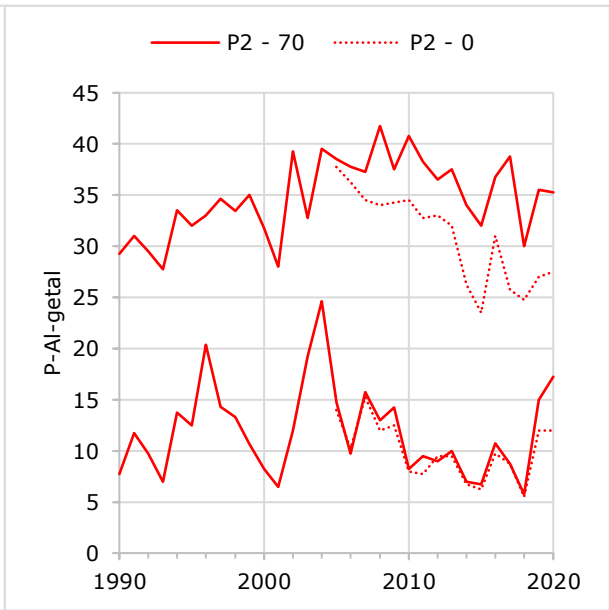
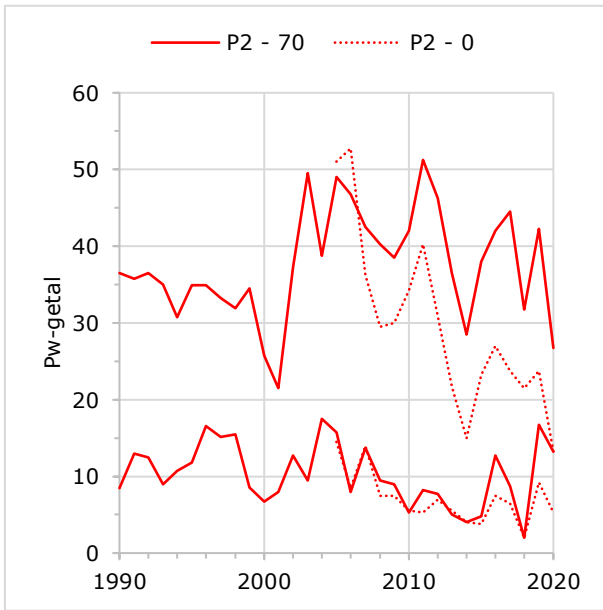


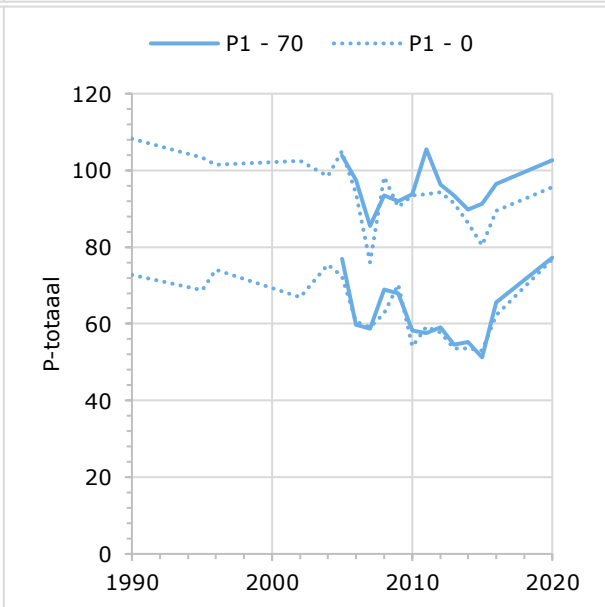
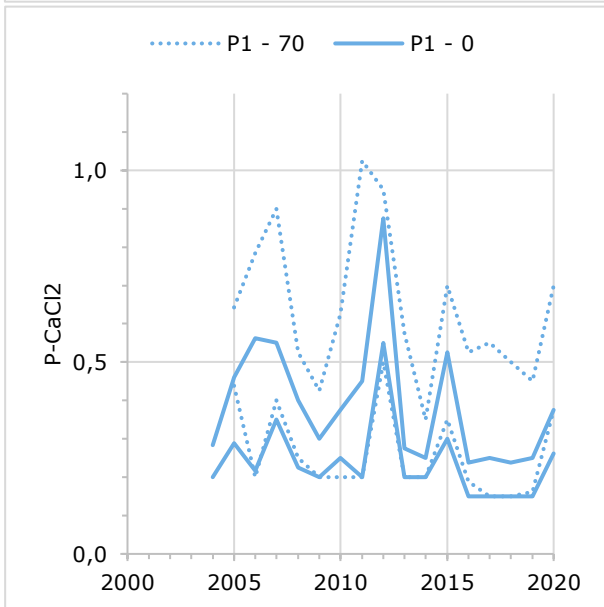
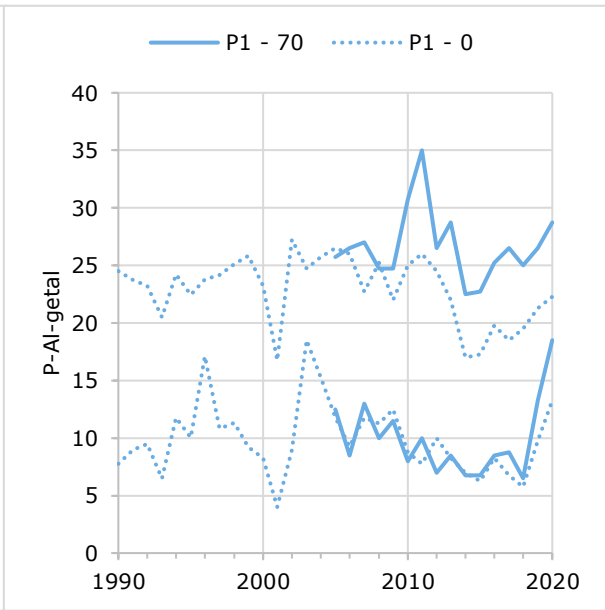
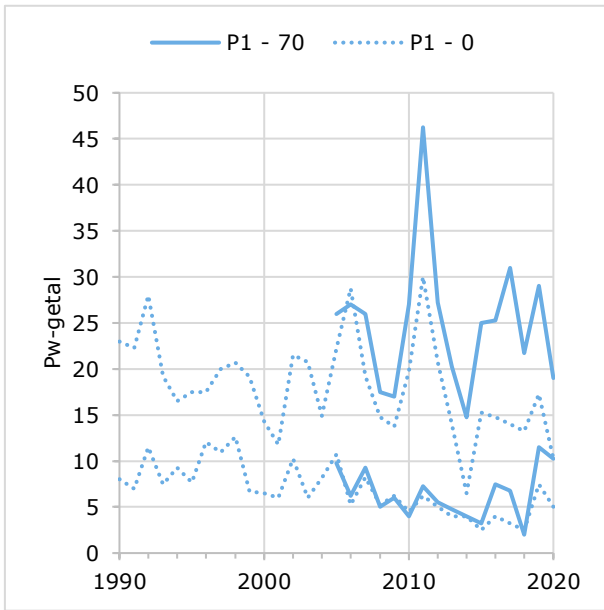
## Bijlage 9 Samenhang in fosfaatmetingen in en onder de bouwvoor

In onderstaande figuren hebben de bovenste twee lijnen betrekking op de laag 0-30 cm, en de onderste twee lijnen op 30-60 cm.



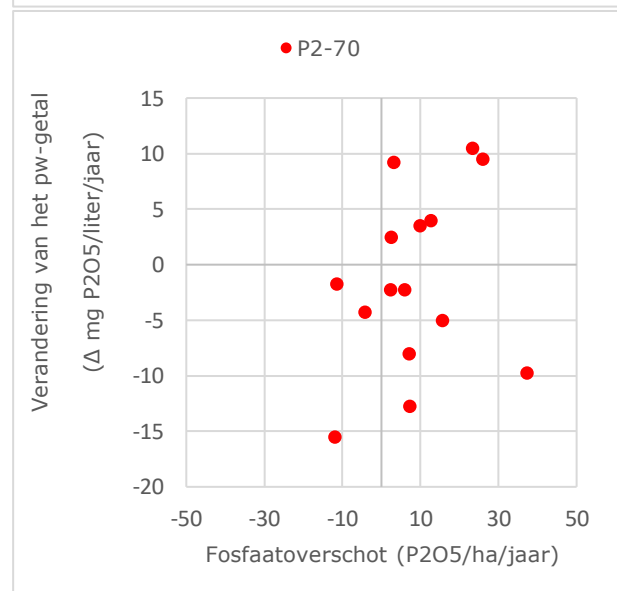
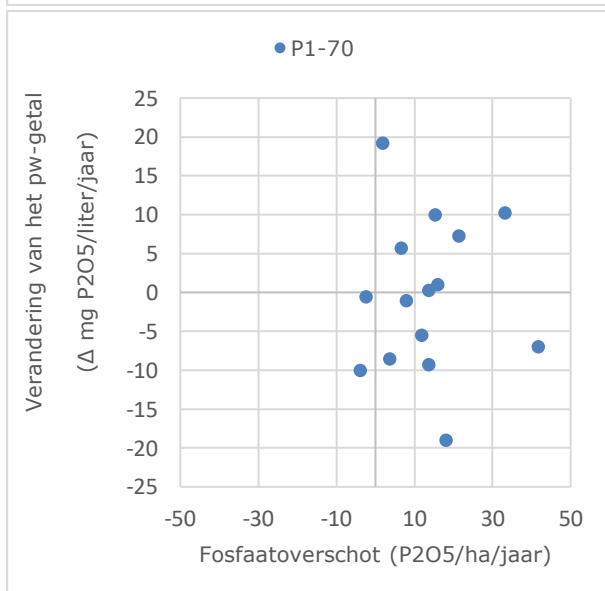
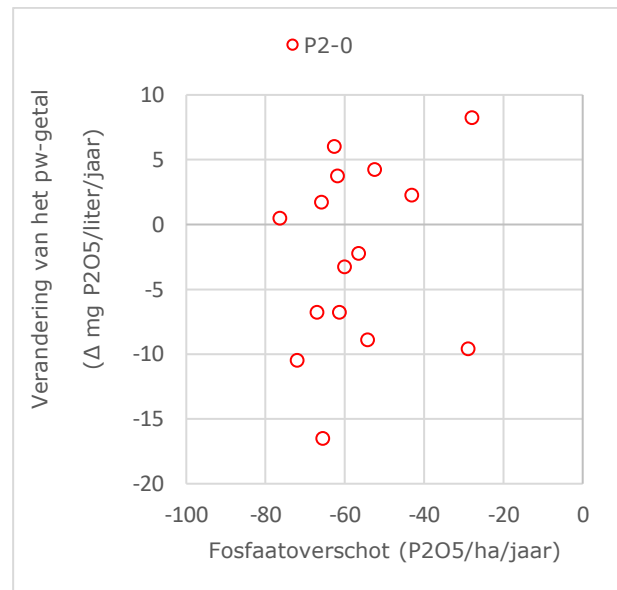
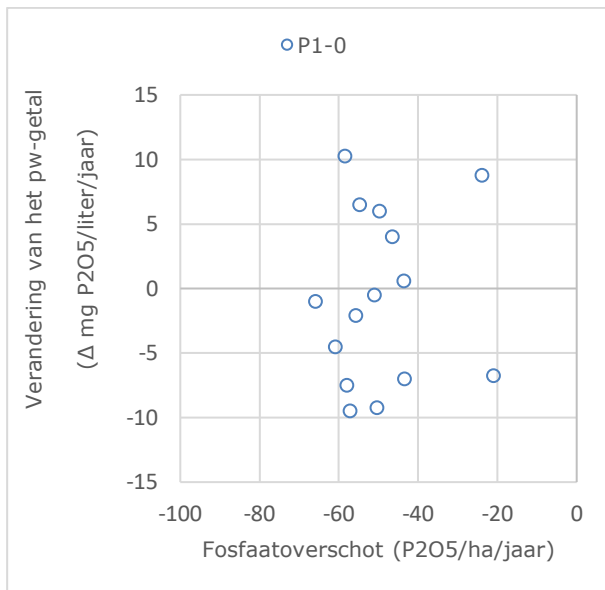


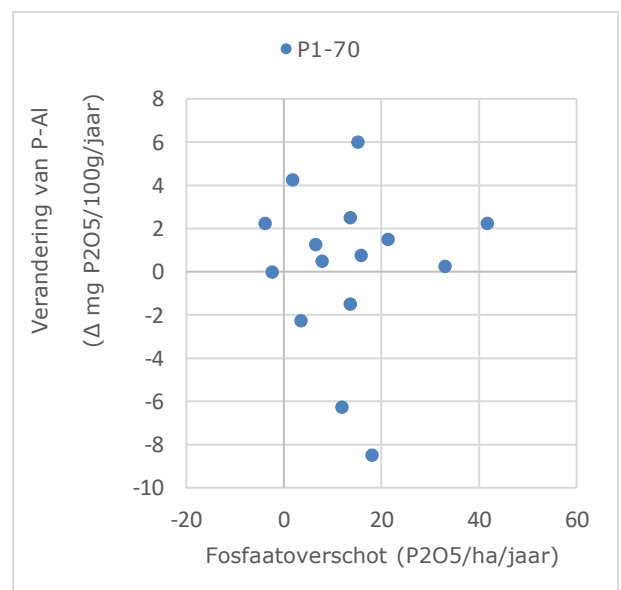
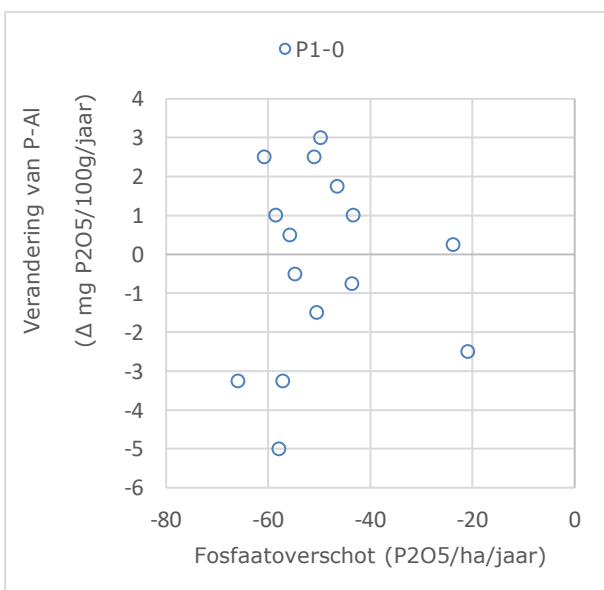
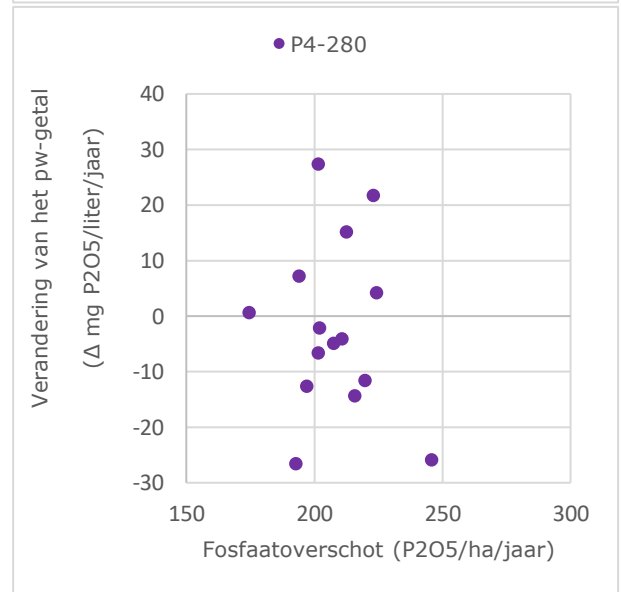
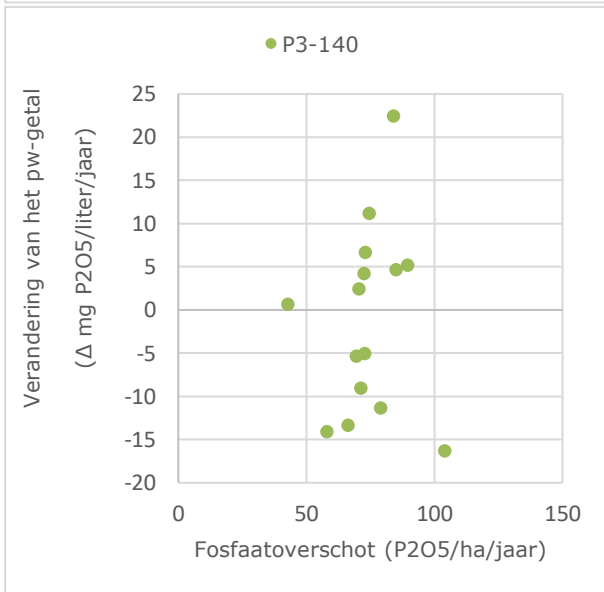
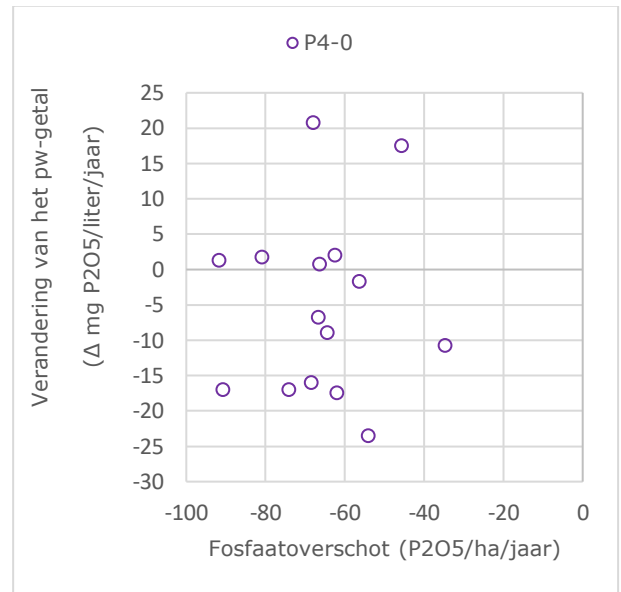
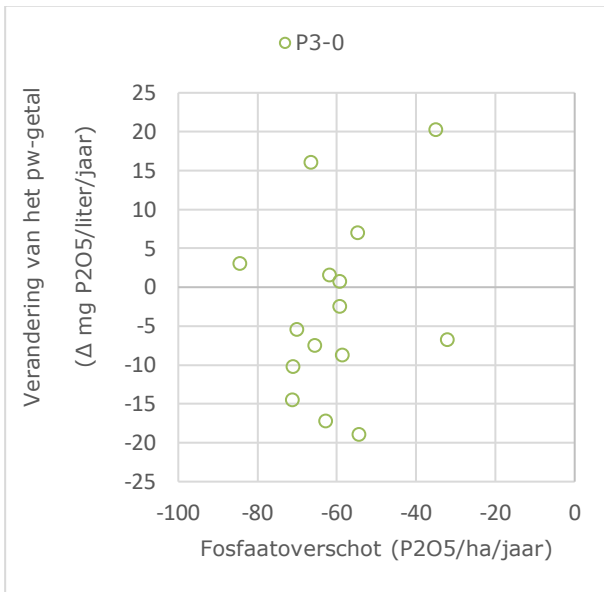


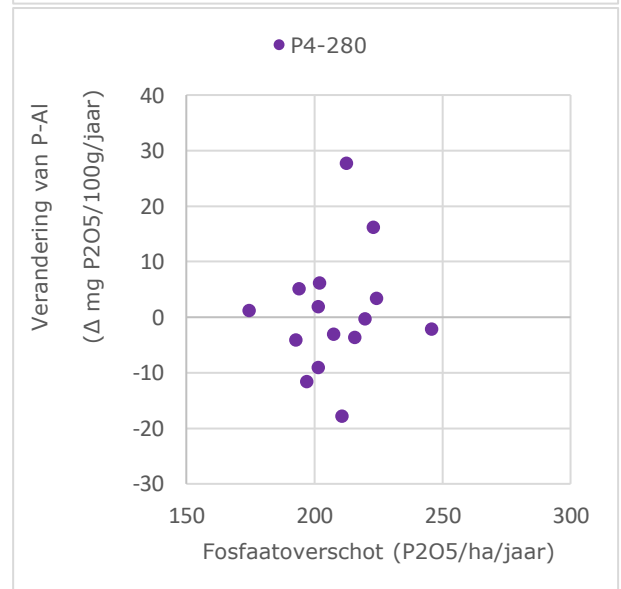
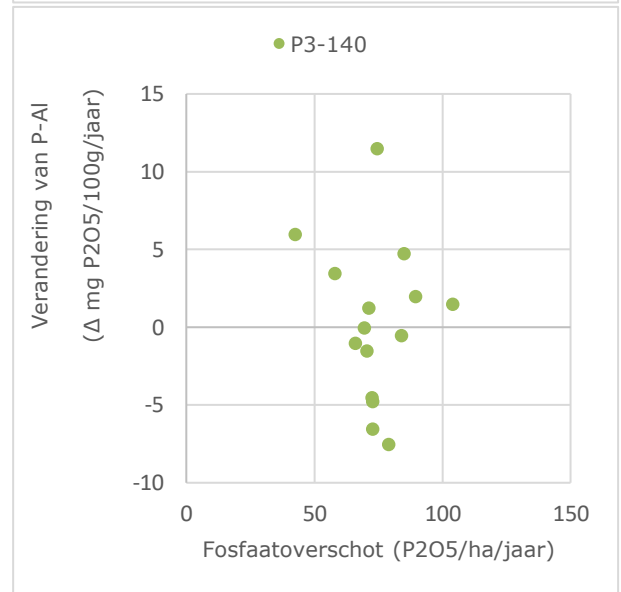
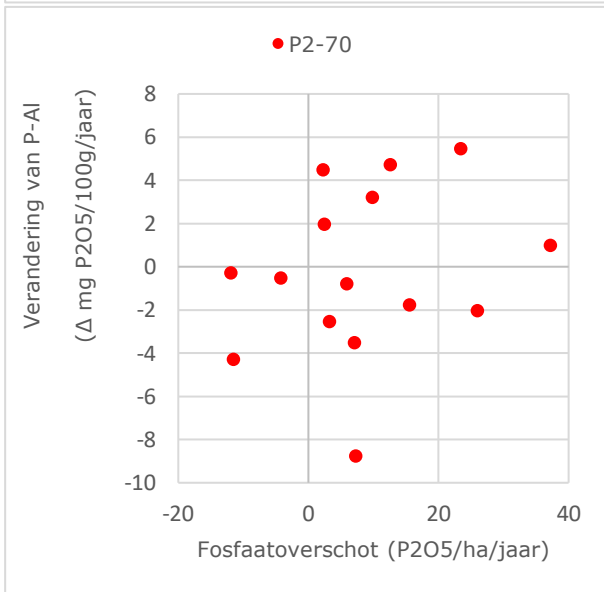
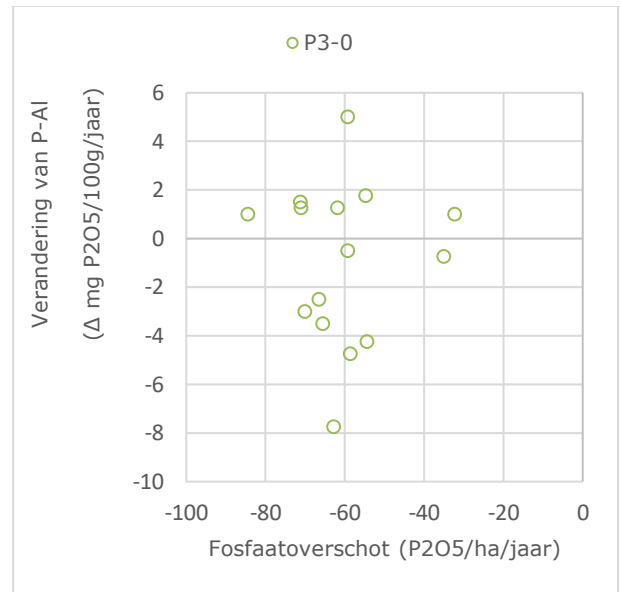
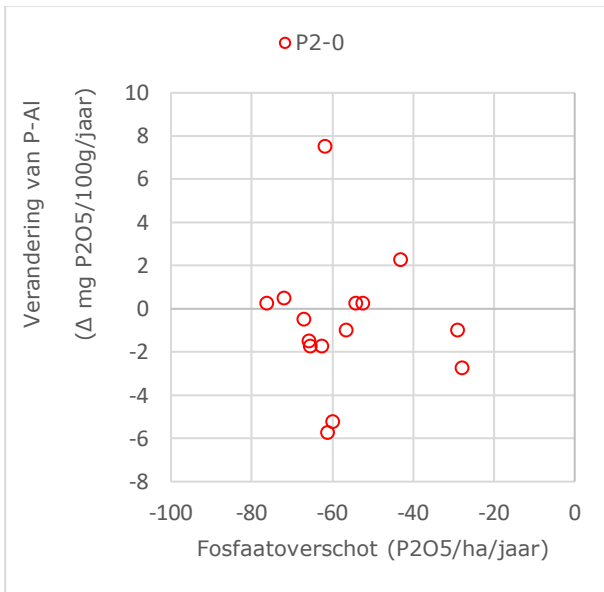


## Bijlage 10 Verandering van de fosfaattoestand in relatie tot het fosfaatoverschot

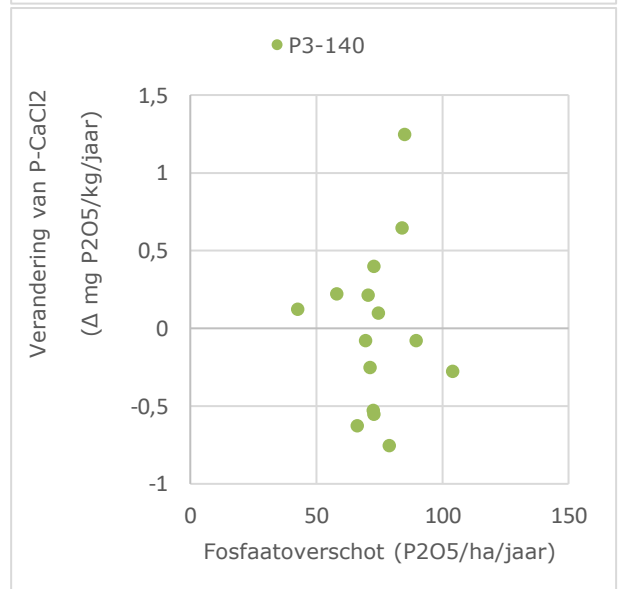
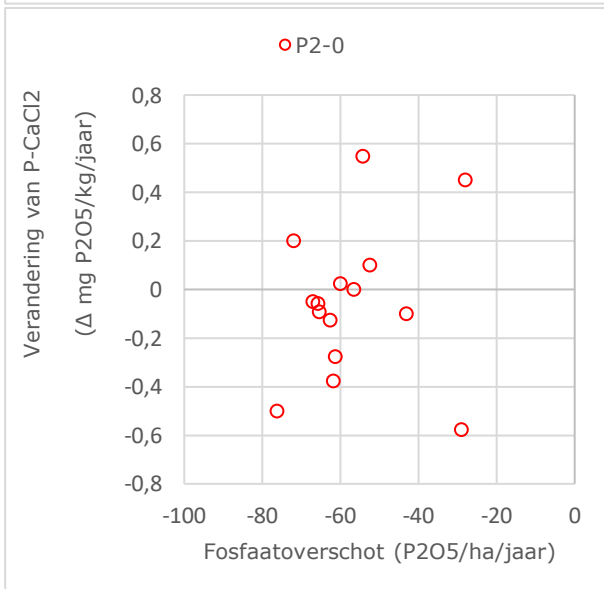
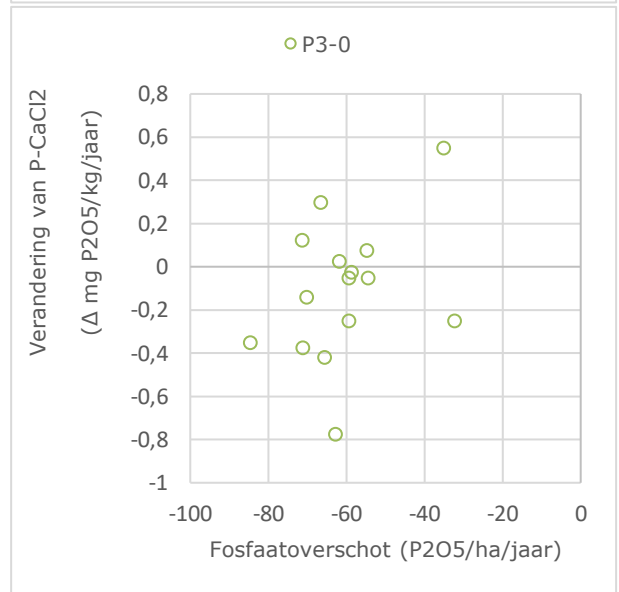
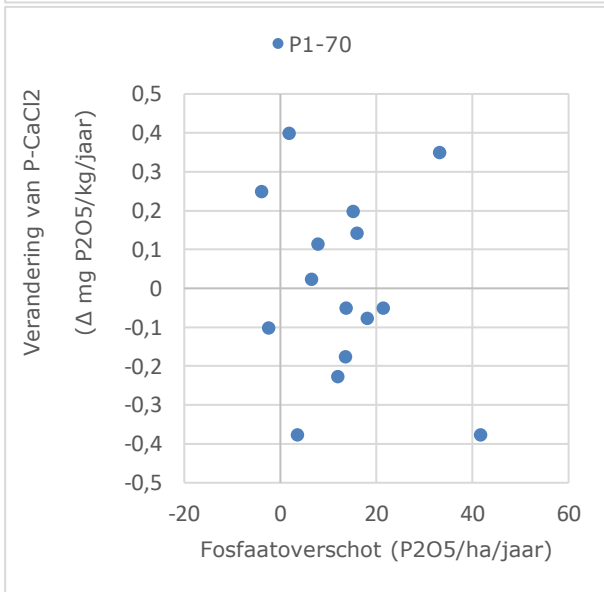
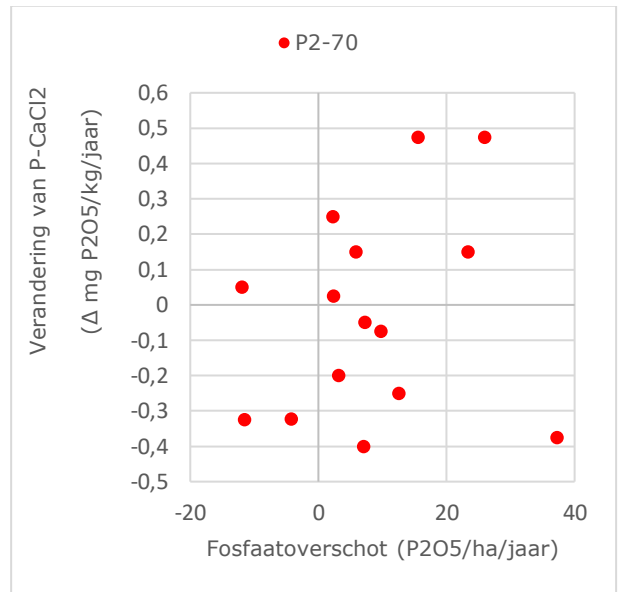
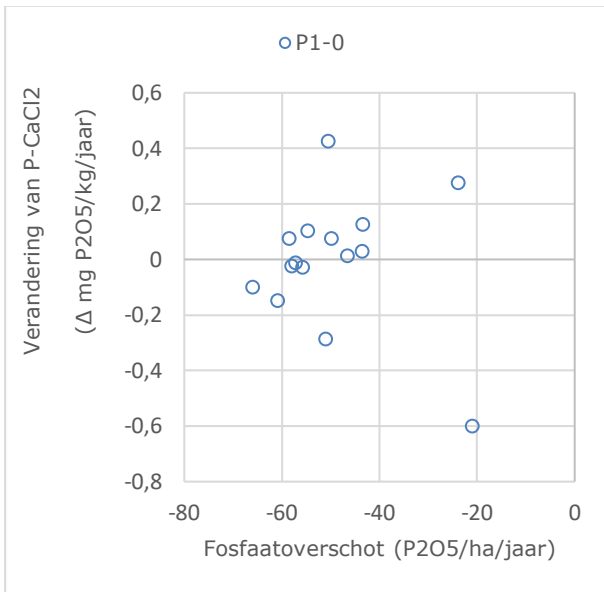
In de figuren hieronder is de jaarlijkse verandering in de fostaattoestand (voor zowel het Pw-getal, P-Al en P-CaCl2) uitgezet tegen het jaarlijkse fosfaatoverschot.

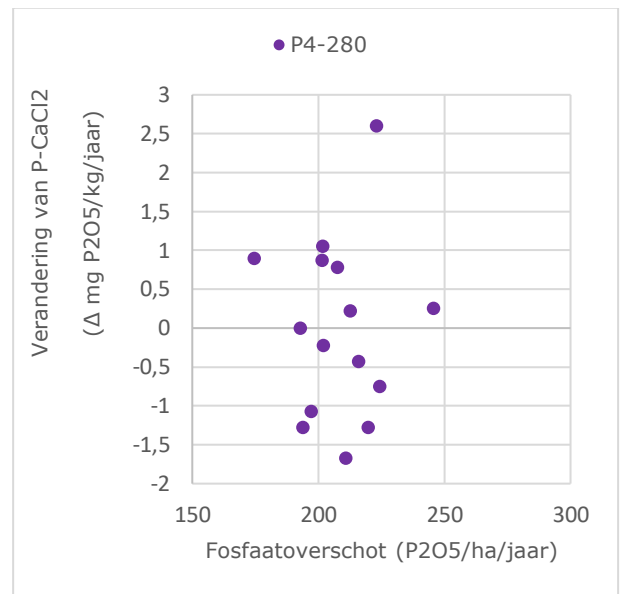
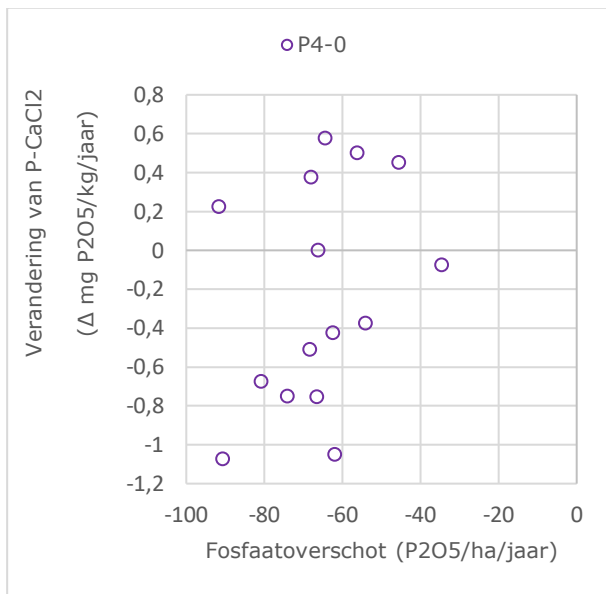






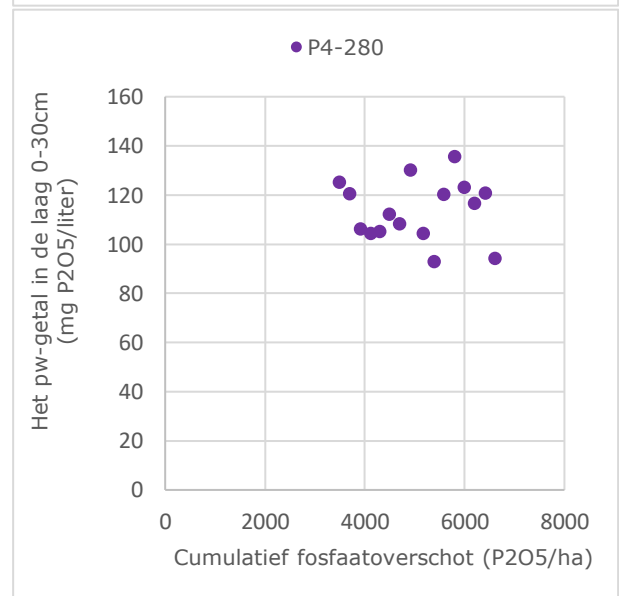
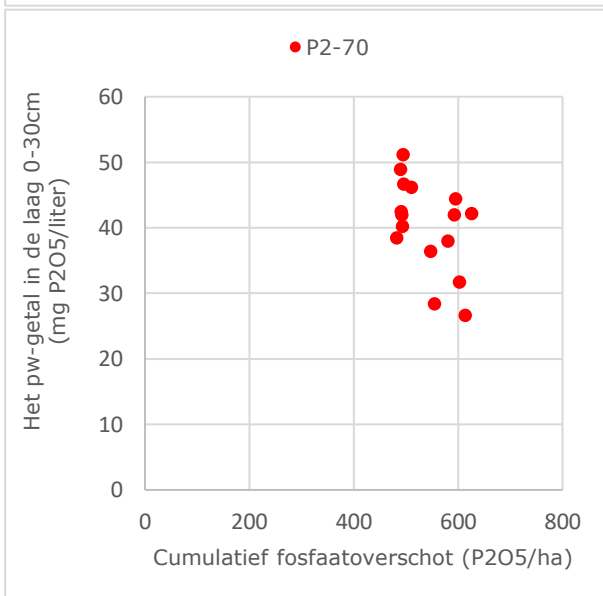
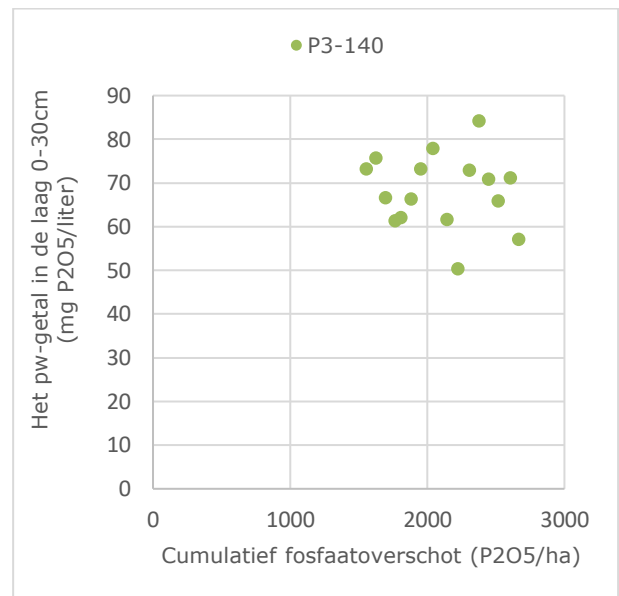
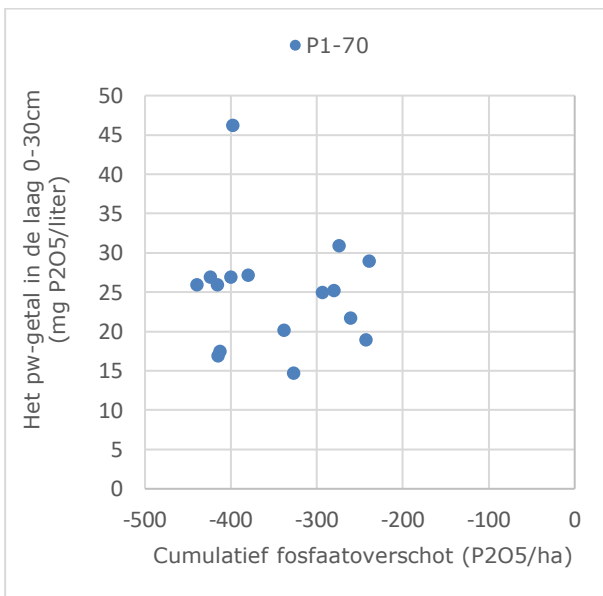


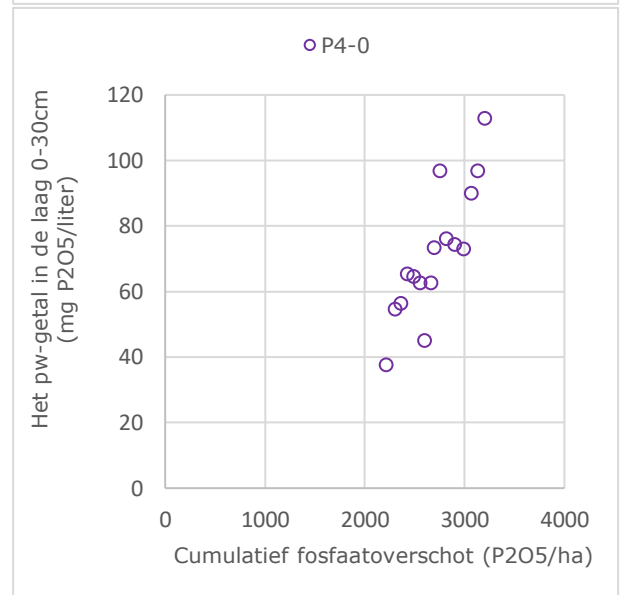
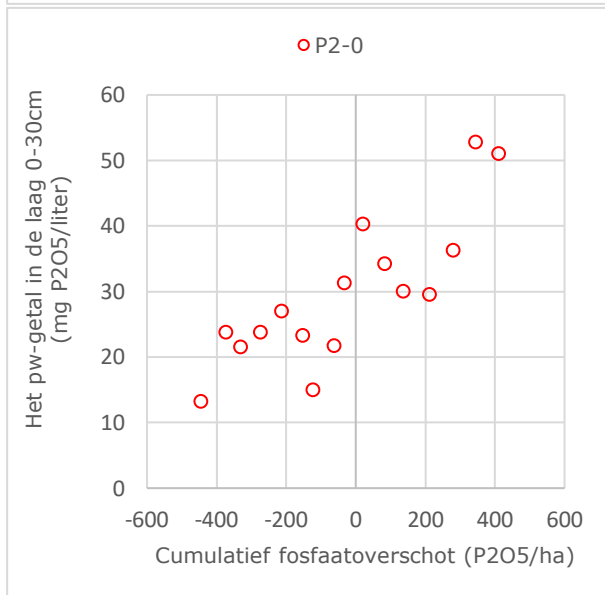
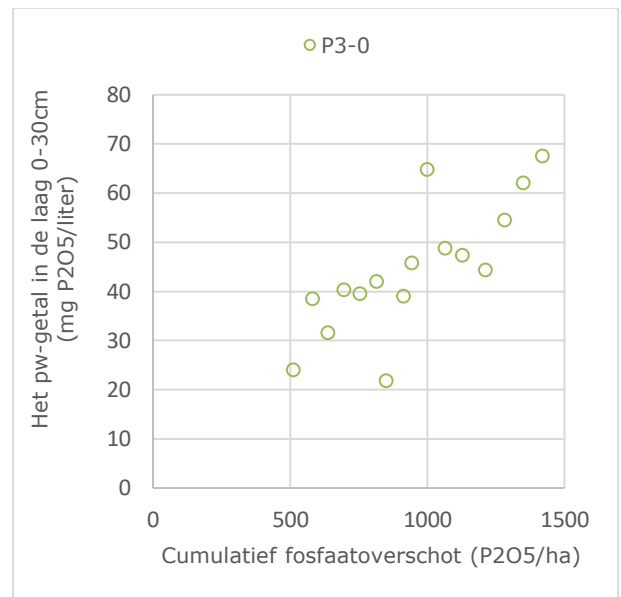
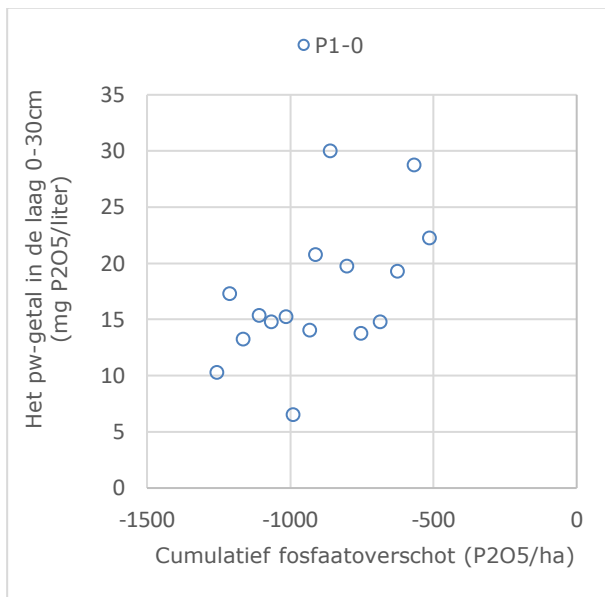




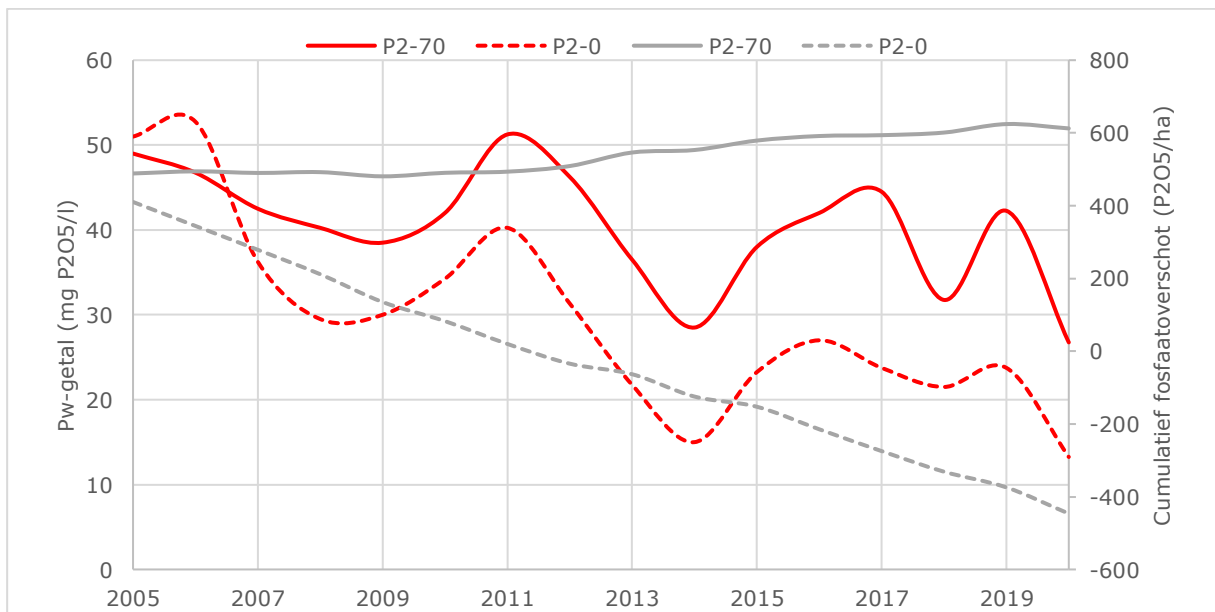
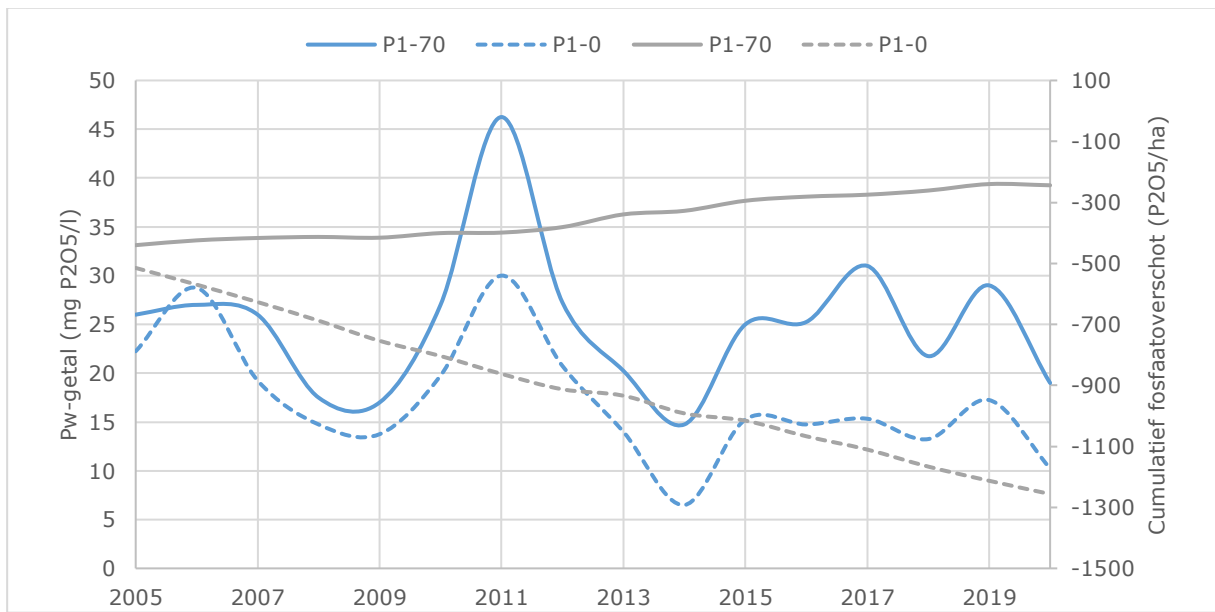
# Bijlage 11 De fosfaattoestand in relatie tot het cumulatieve fosfaatoverschot

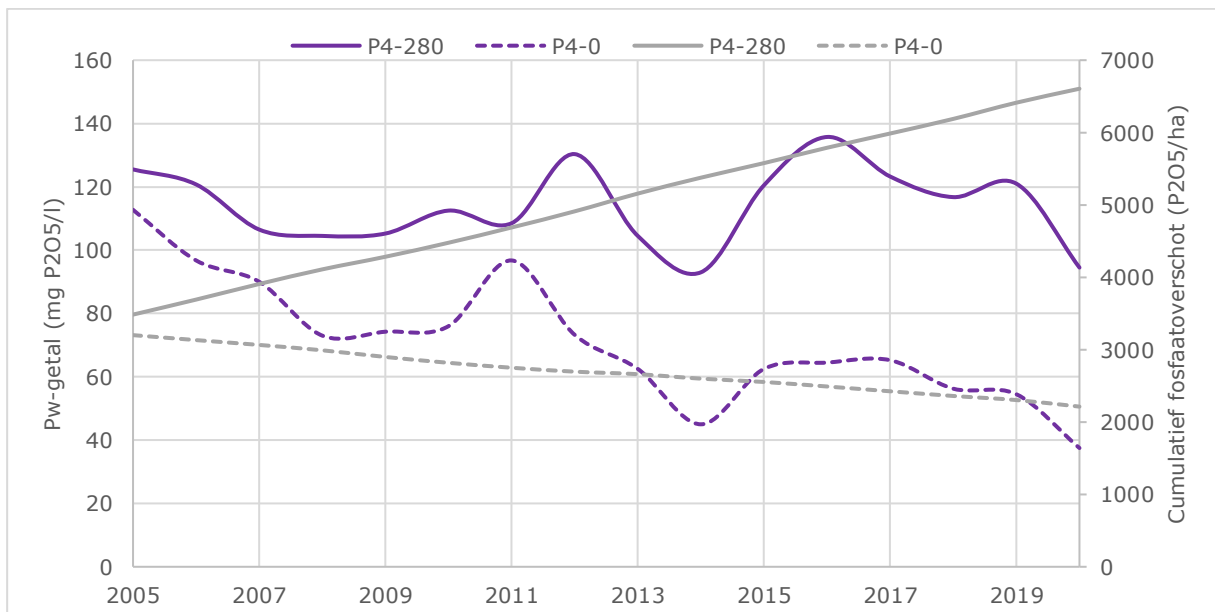
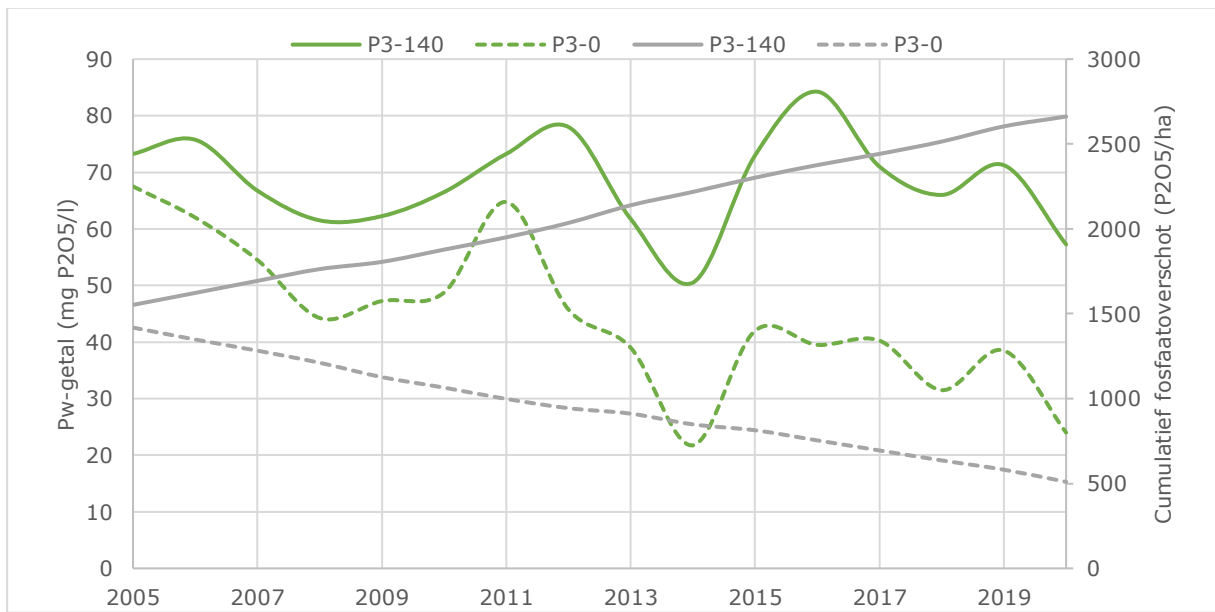
In de figuren hieronder is de fosfaattoestand (voor het Pw-getal) uitgezet tegen het cumulatieve fosfaatoverschot. Bij de onbemeste objecten is het Pw-getal gerelateerd aan het cumulatieve overschot, waarbij het meest rechtse datapunt van 2005 is en het meest linkse datapunt van 2020.





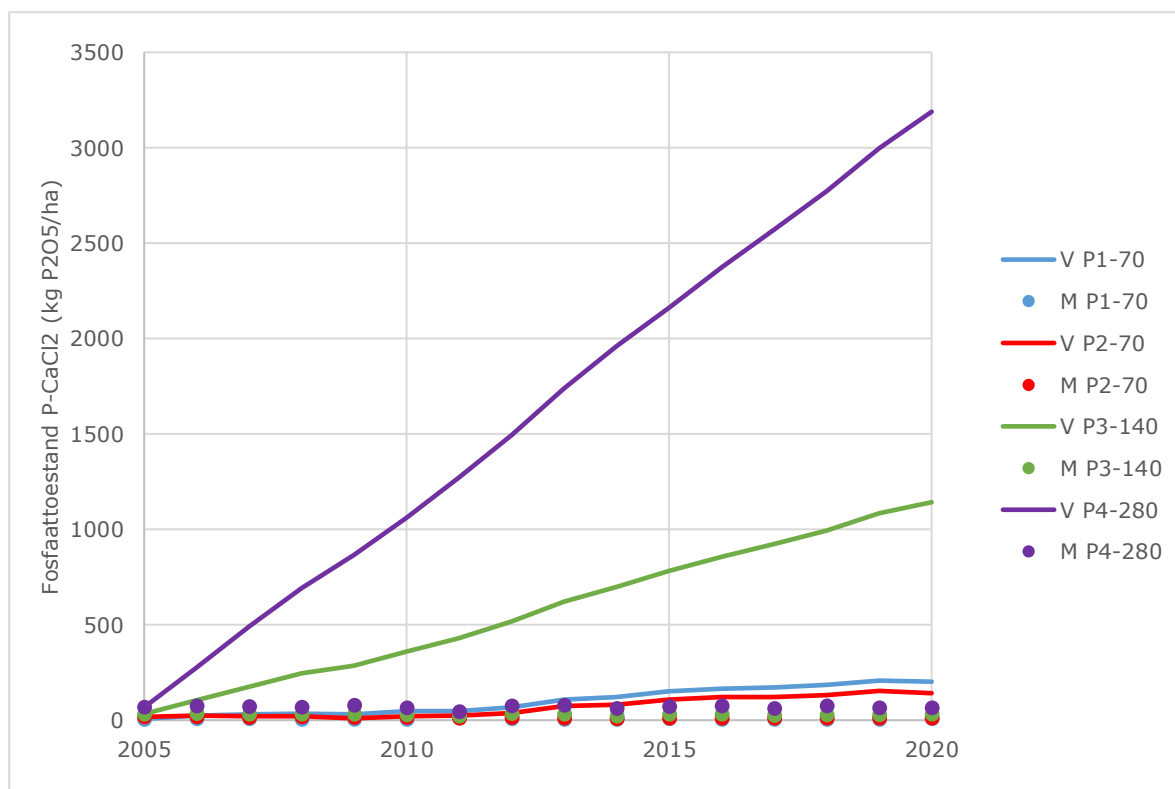
In de figuren hieronder is het verloop van de fosfaattoestand (gekleurde lijn) en het cumulatieve fosfaatoverschot (grijze lijn) geplot per fosfaattoestand.

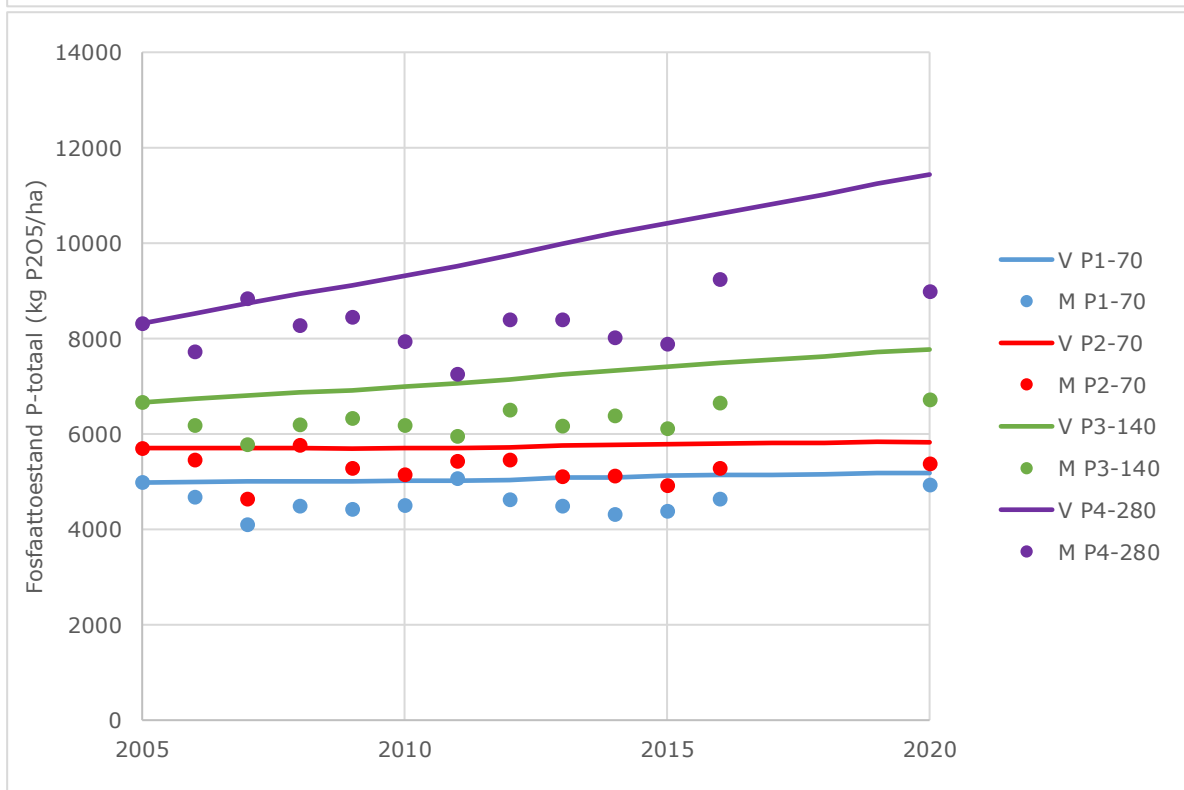
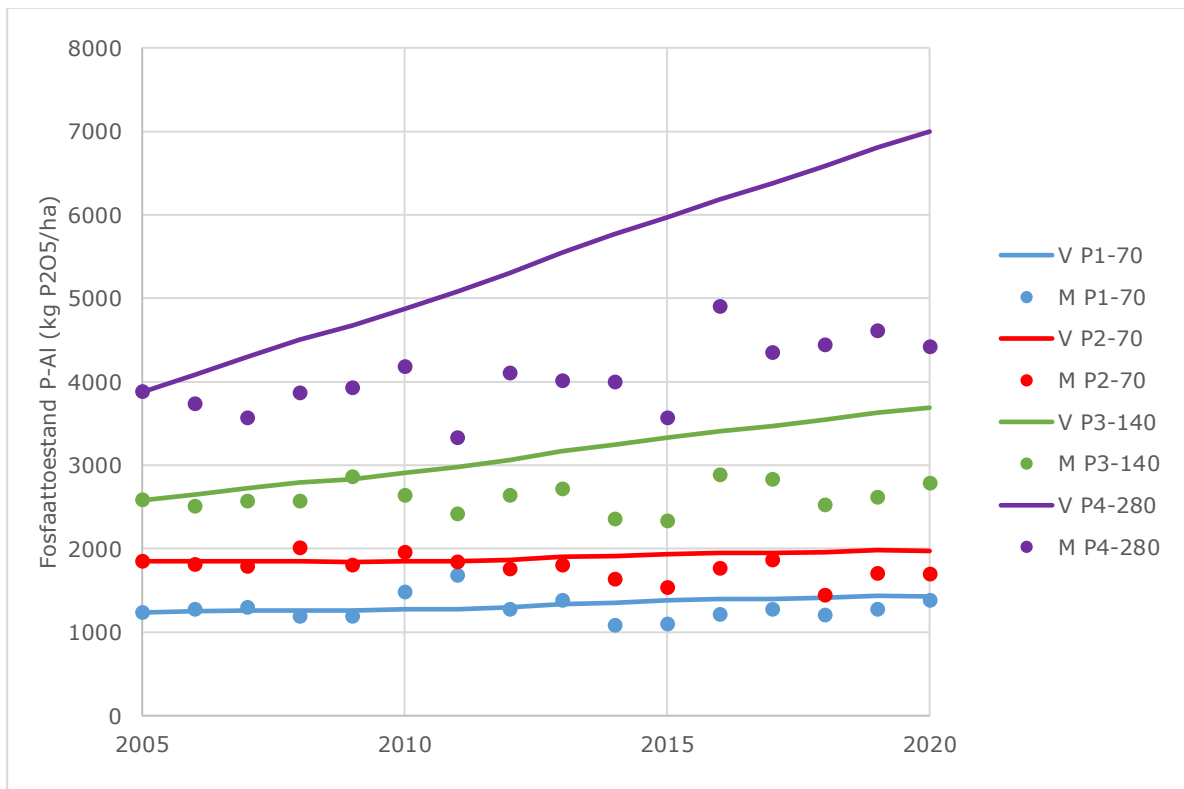




## Bijlage 12 Verwachtte en gerealiseerde verandering van P-CaCl<sub>2</sub>, P-Al en P-totaal

In onderstaande figuren worden de meetwaarden (M) en de verwachtte waarden (V) op basis van de initiële in 2005 met daarbij opgeteld het jaarlijkse fosfaatoverschot, gebaseerd op de laag 0-30cm.

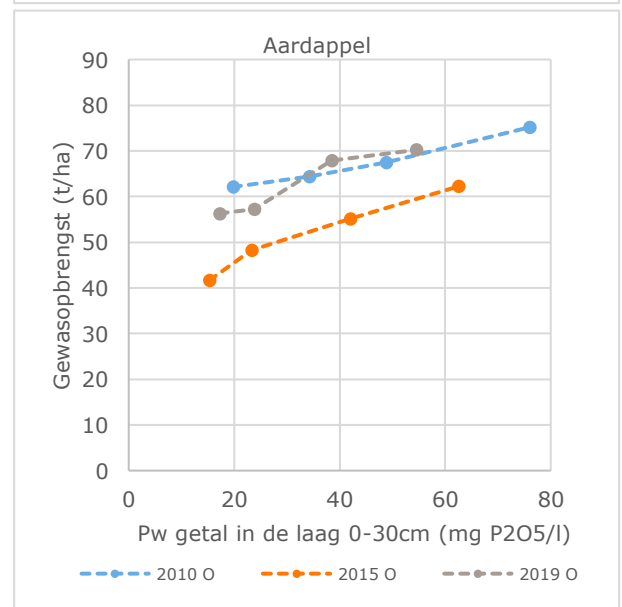
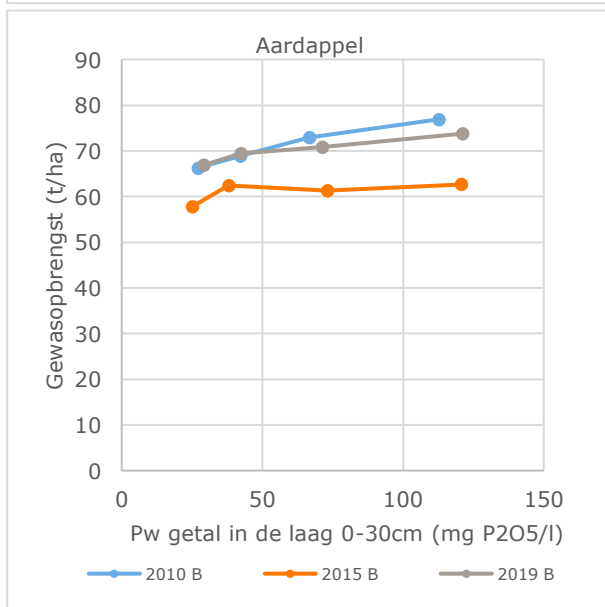
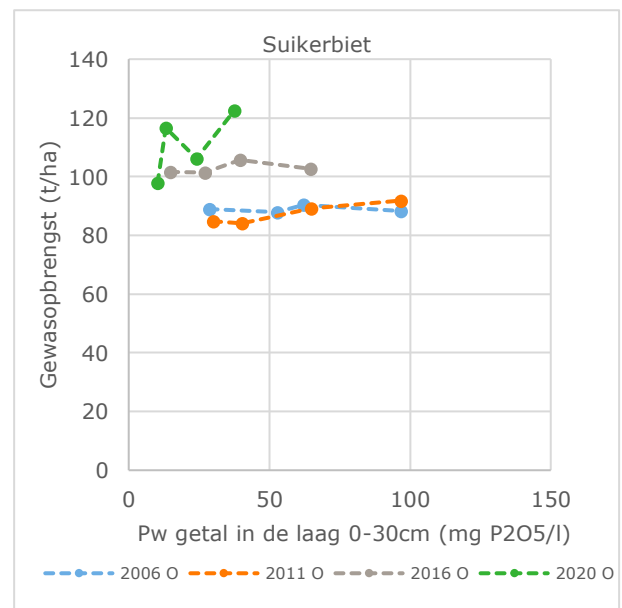
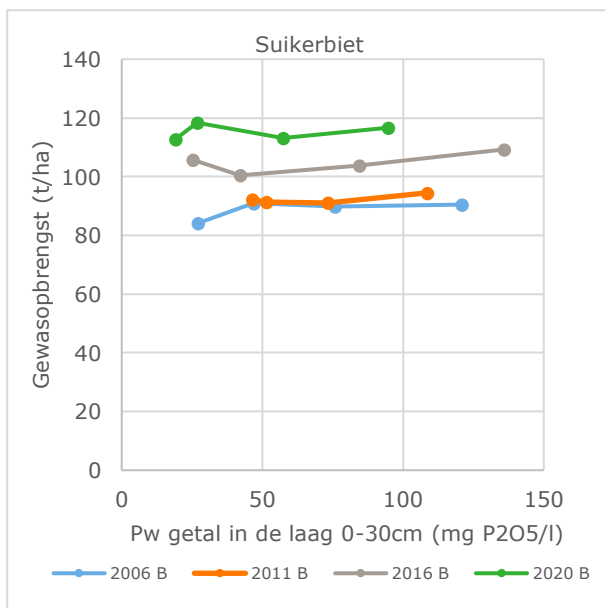


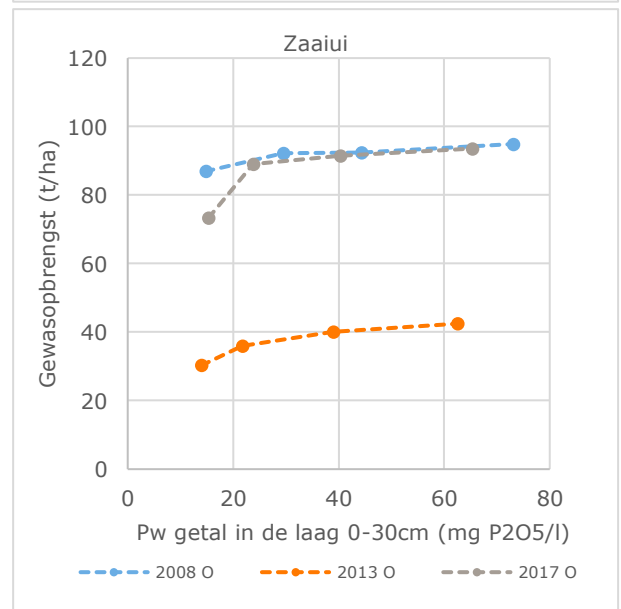
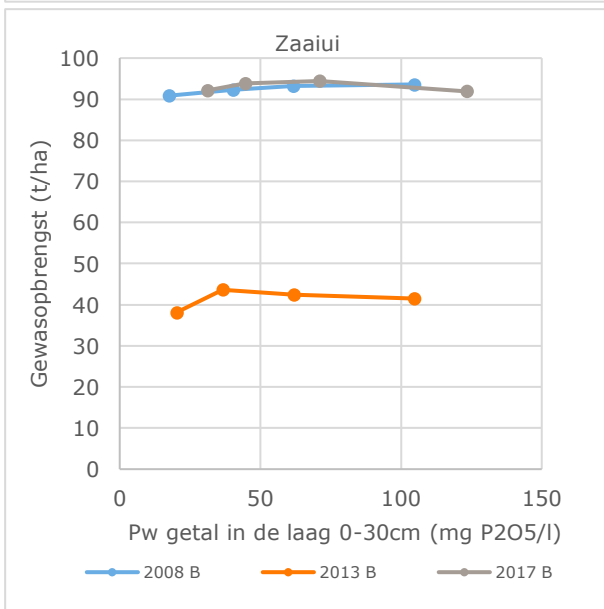
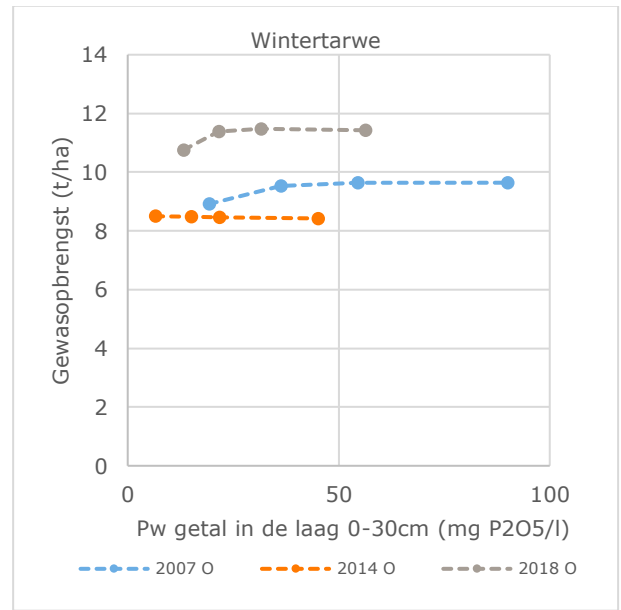
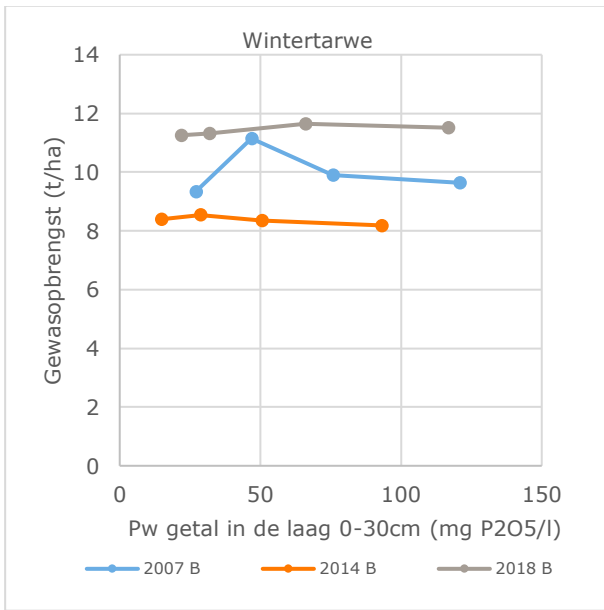


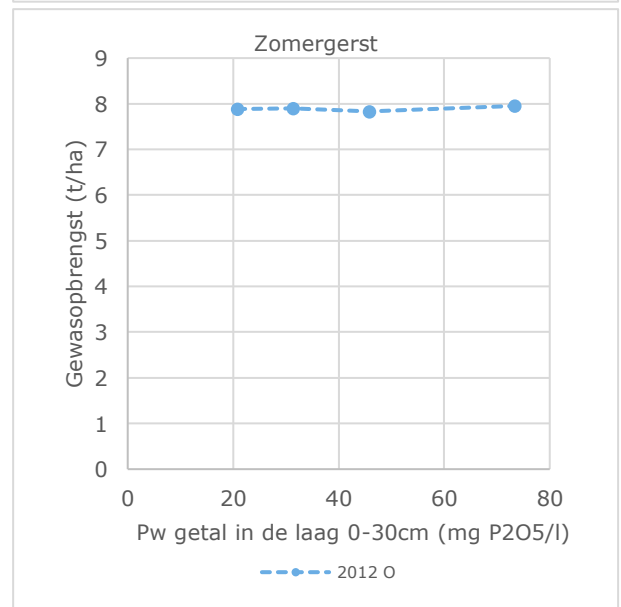
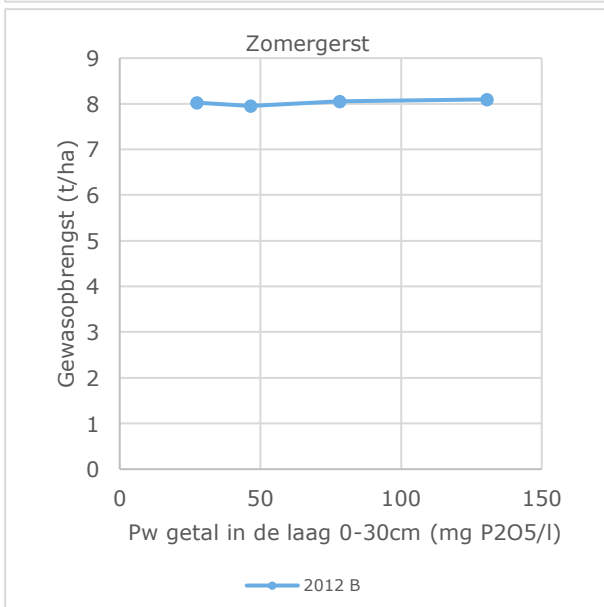
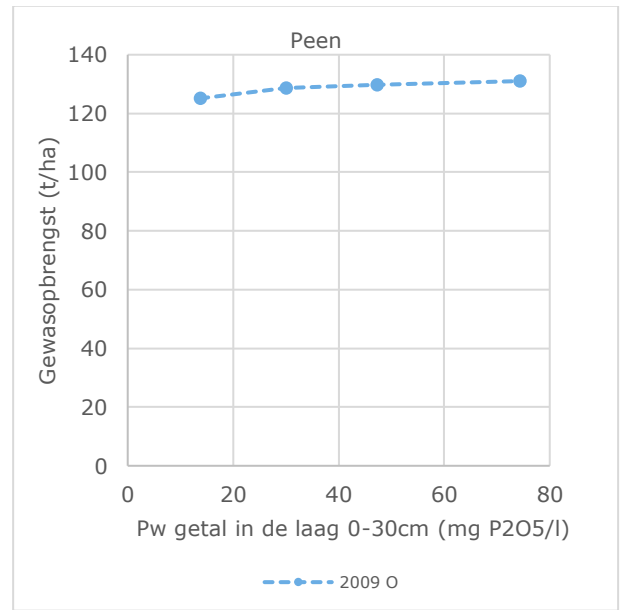
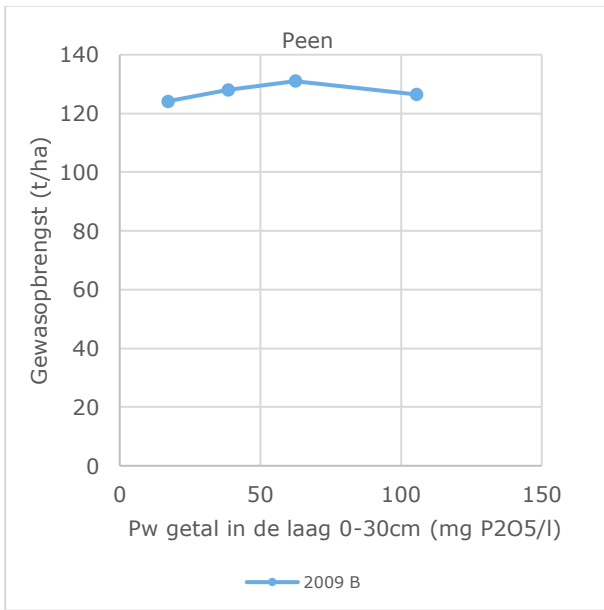


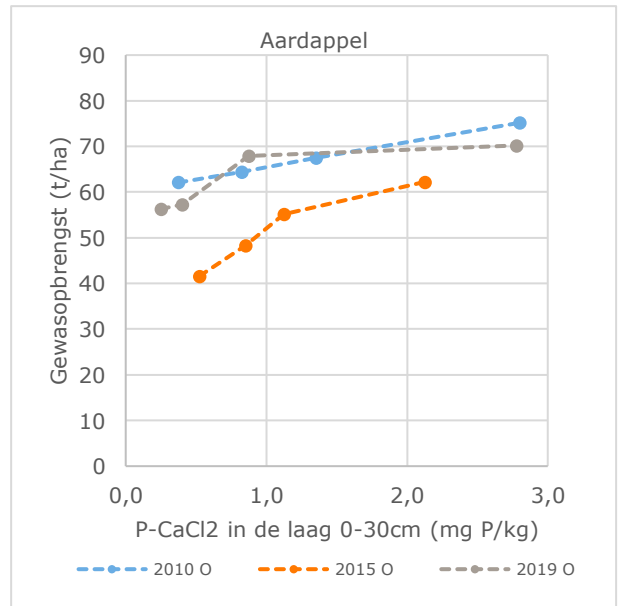
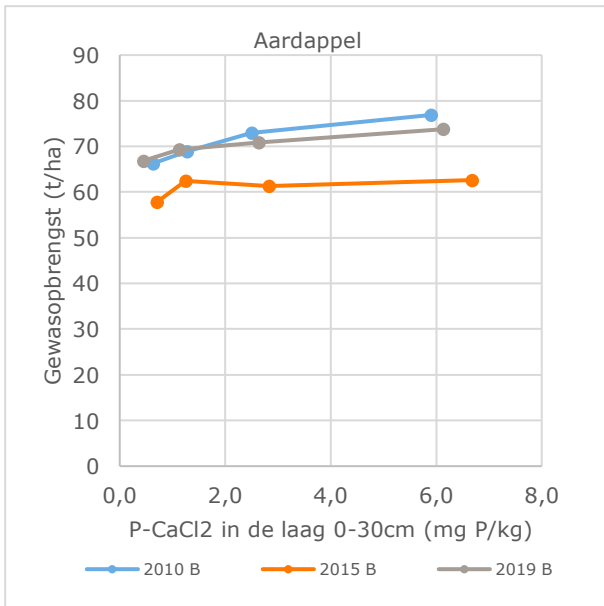
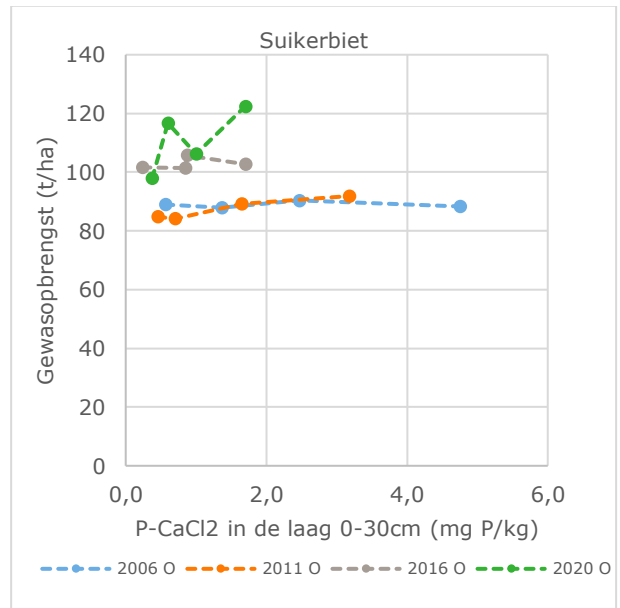
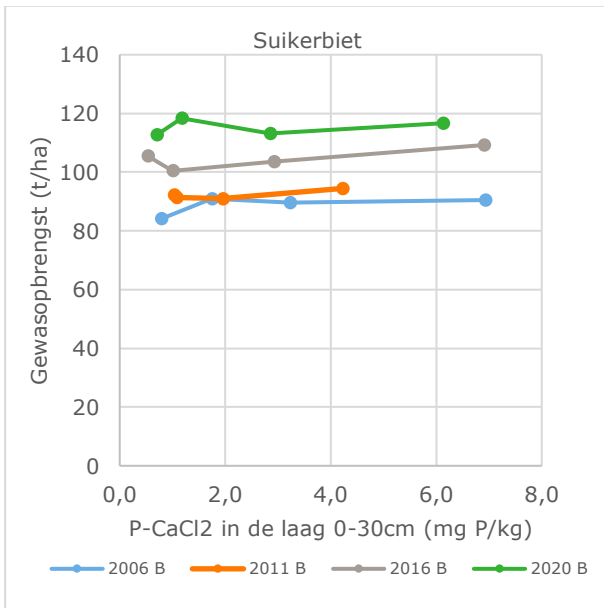
## Bijlage 13 De samenhang tussen de fosfaattoestand en gewasopbrengst

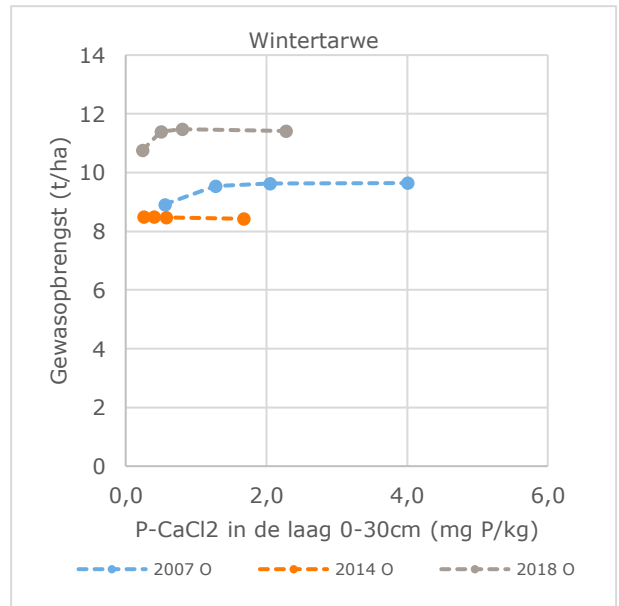
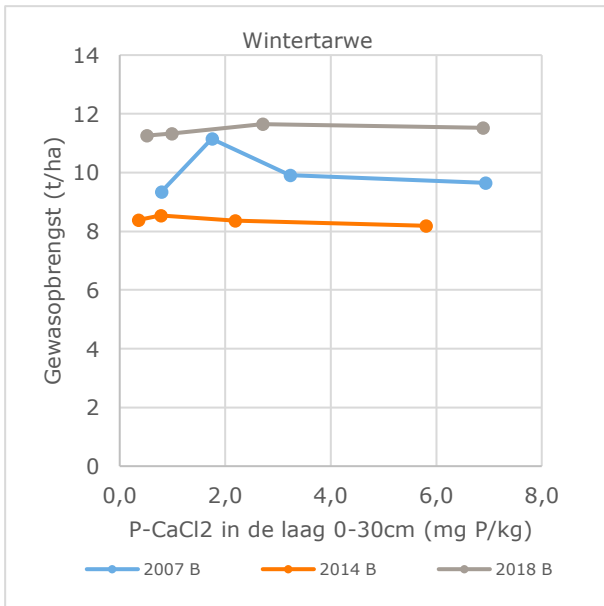
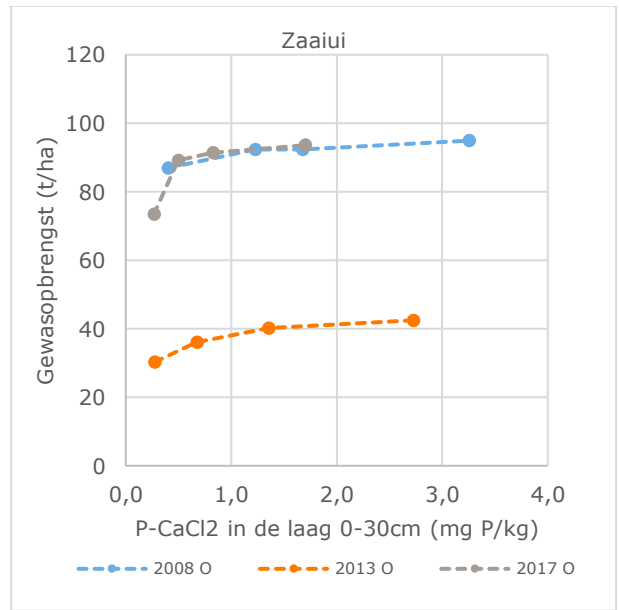
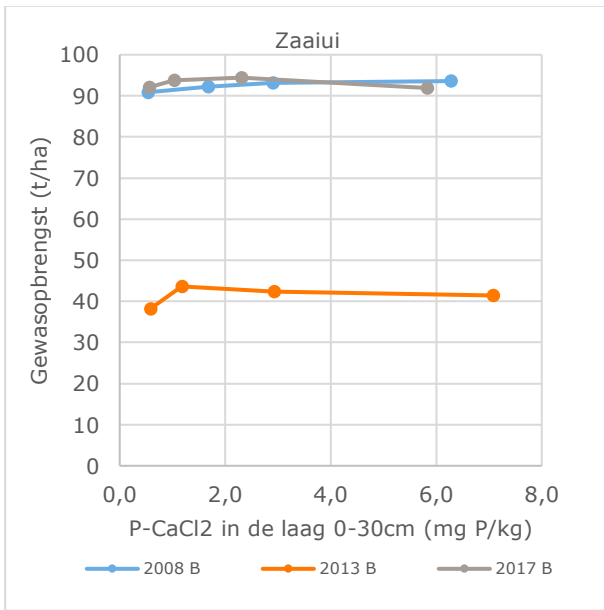
In de onderstaande figuren wordt de samenhang tussen de fosfaattoestand en gewasopbrengst apart gepresenteerd voor de onbemeste en bemeste objecten, per gewas en per jaar. Per jaar is het eerste datapunt van P1, het tweede van P2, het derde van P3 en het vierde van P4. In de eerste 12 figuren is de fosfaattoestand uitgedrukt in het Pw-getal, de volgende 12 in P-Al en de laatste 12 in P-CaCl<sub>2</sub>.

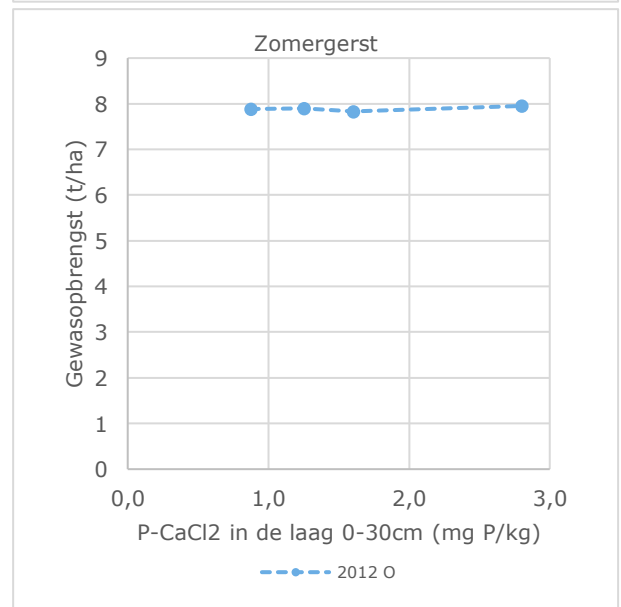
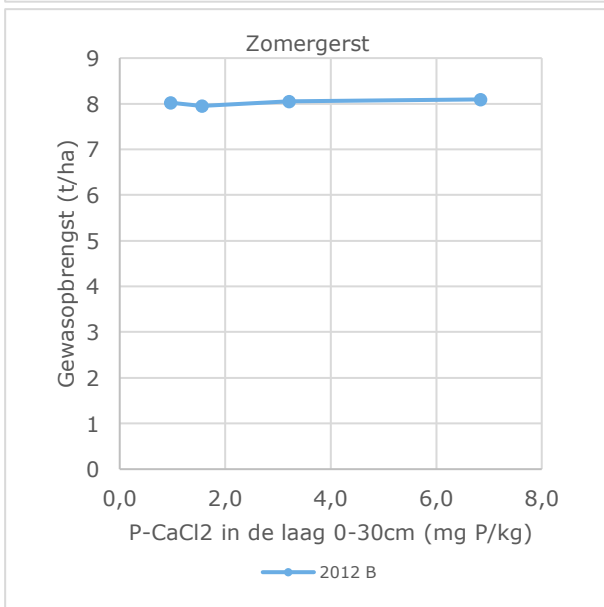
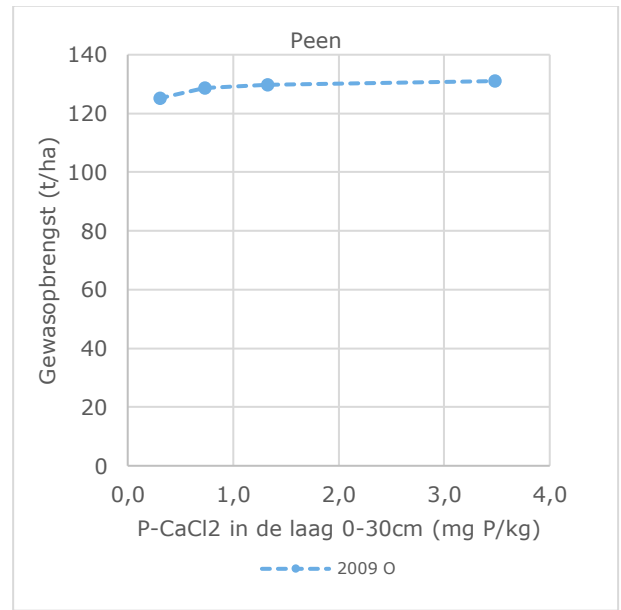
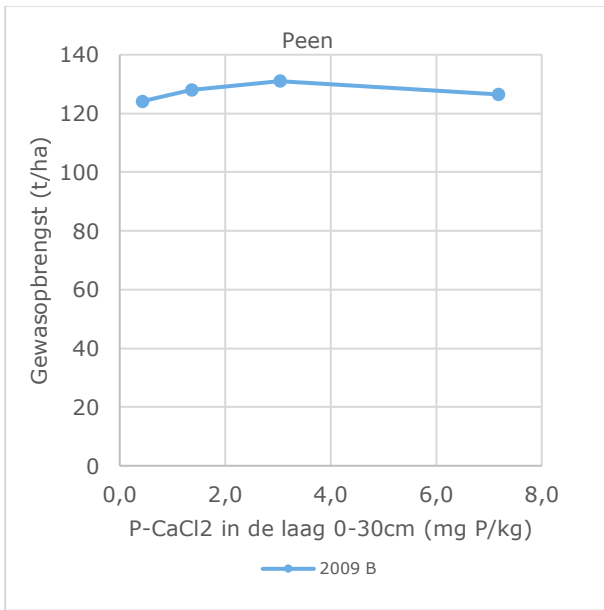


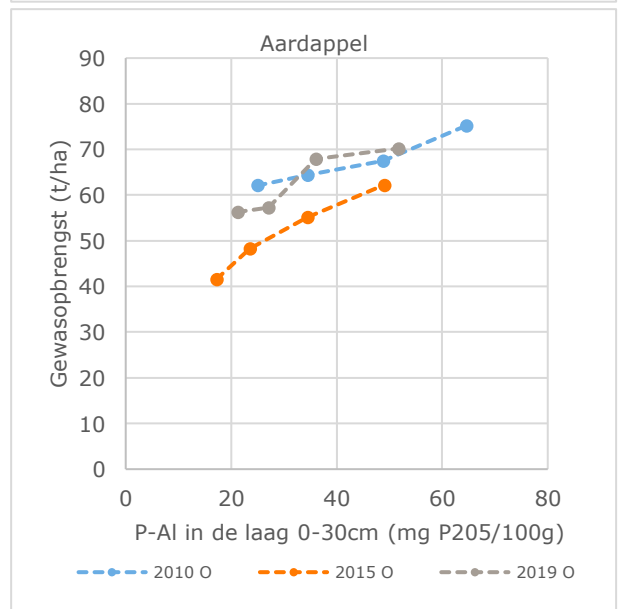
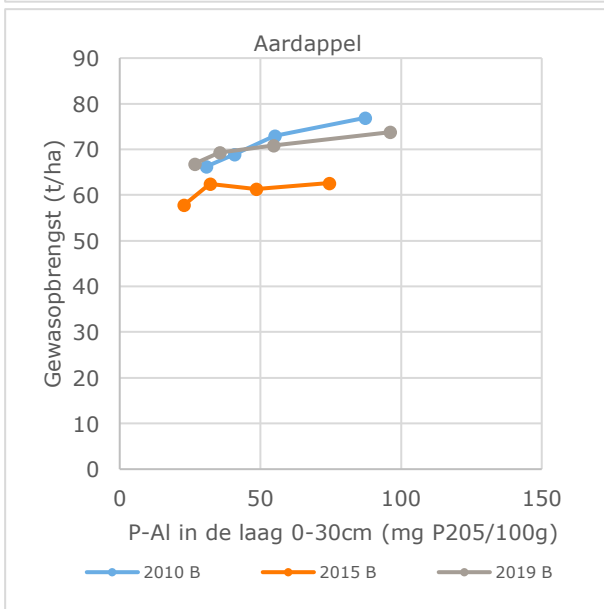
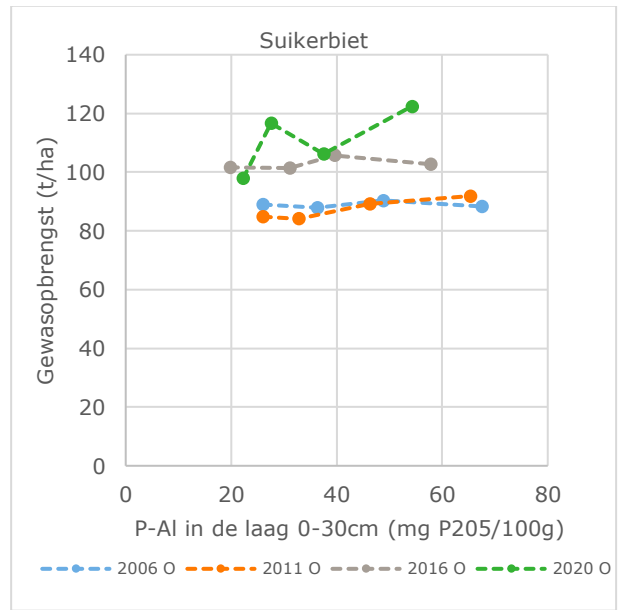
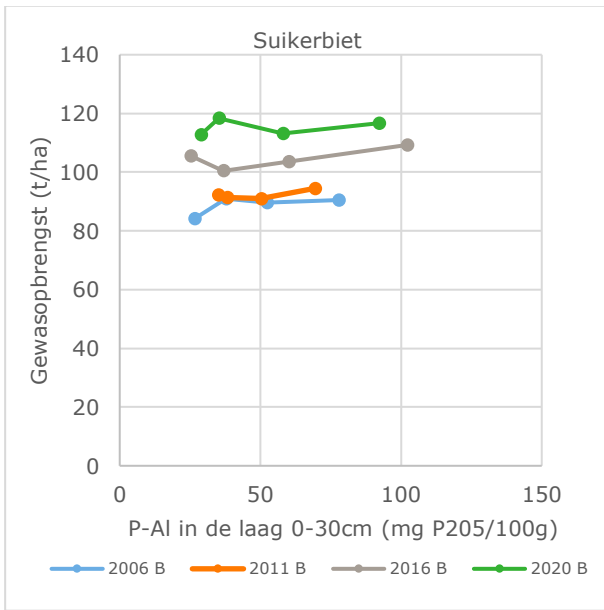


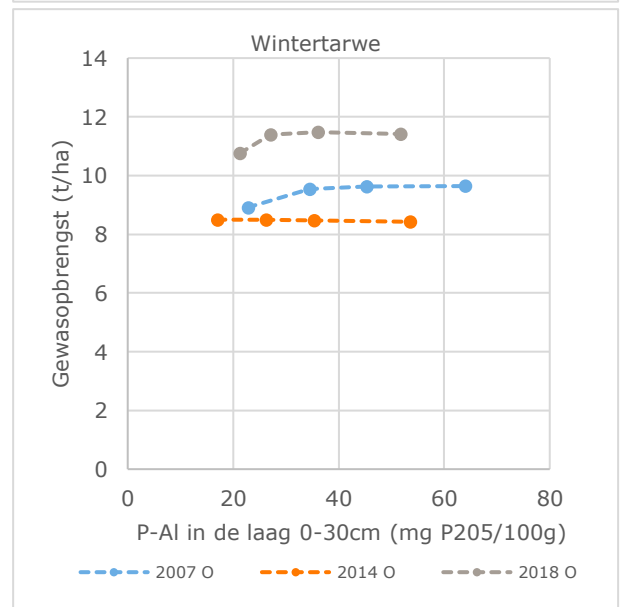
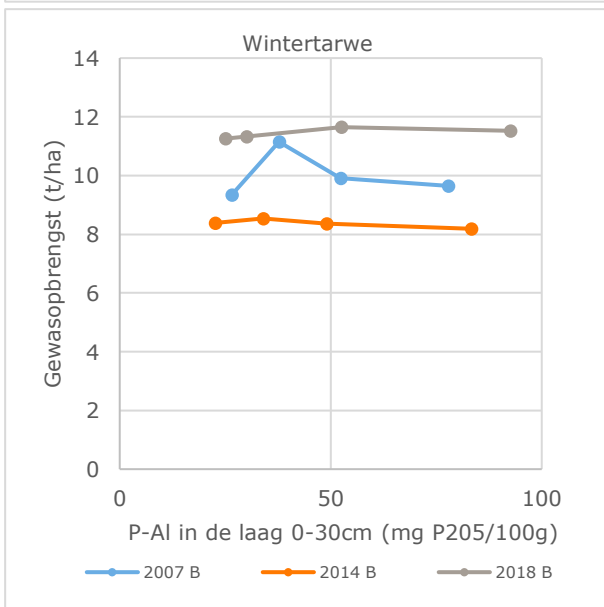
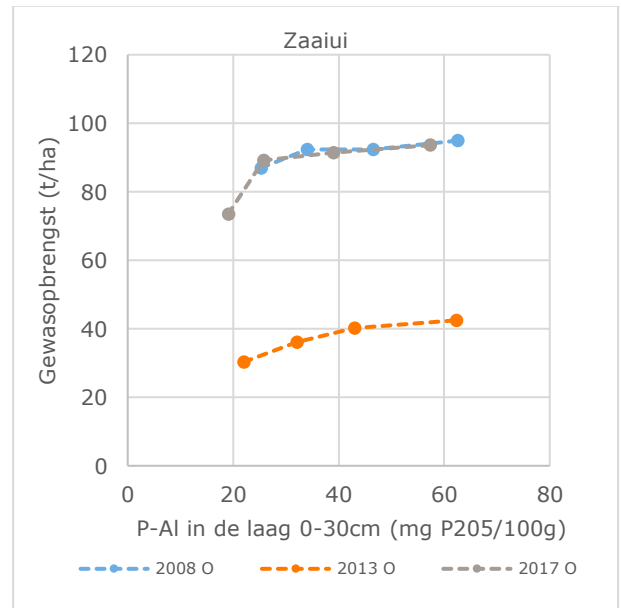
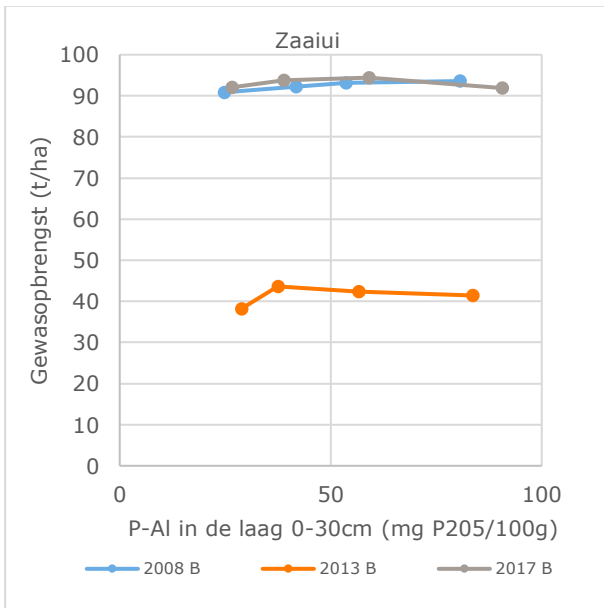




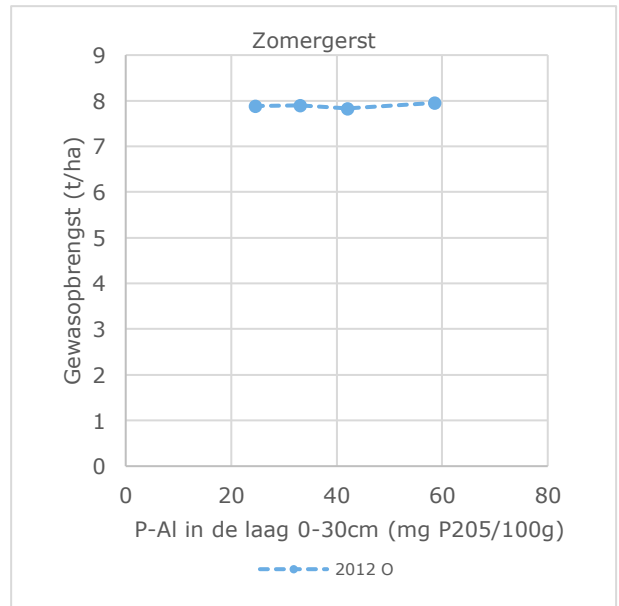
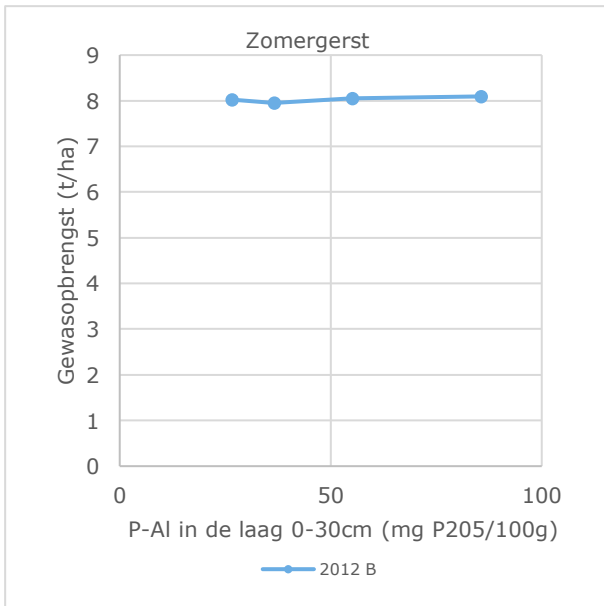
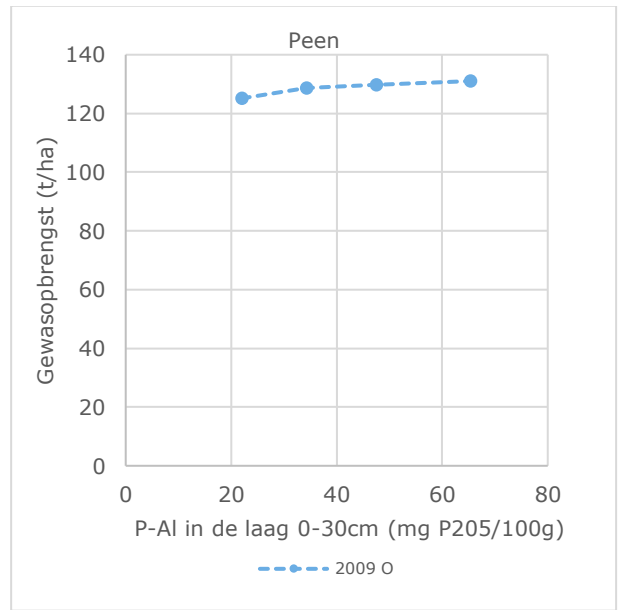
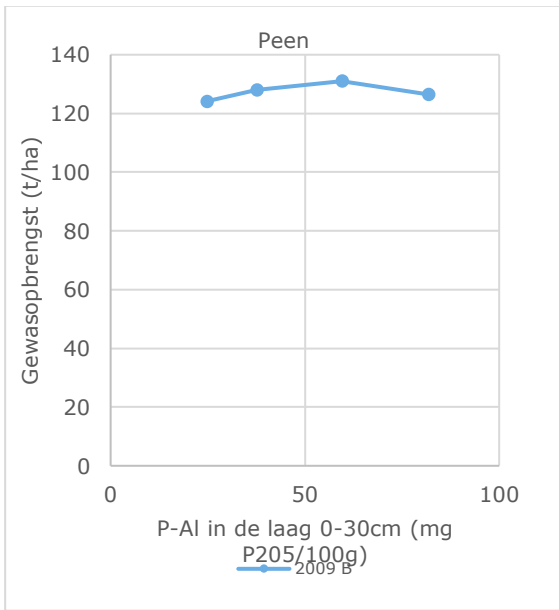












To explore  
the potential  
of nature to  
improve the  
quality of life



---

Wageningen University & Research

**Open Teelten**

Edelhertweg 1

Postbus 430

8200 AK Lelystad

T (+31)320 29 11 11

**[www.wur.nl/openteelten](http://www.wur.nl/openteelten)**

**[info.openteelten@wur.nl](mailto:info.openteelten@wur.nl)**

Rapport WPR-OT 1000

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

---