



De enkelvoudige versus de gecombineerde indicator voor bepaling van de fosfaattoestand van de bodem

Toetsing op data van veeljarige veldproeven op grasland en bouwland

Inge Regelink, Jantine van Middelkoop, Willem van Geel, Phillip Ehlert



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

De enkelvoudige versus de gecombineerde indicator voor bepaling van de fosfaattoestand van de bodem

Toetsing op data van veeljarige veldproeven op grasland en bouwland

Inge Regelink¹, Jantine van Middelkoop², Willem van Geel³, Phillip Ehlert¹

1 Wageningen Environmental Research

2 Wageningen Livestock Research

3 Wageningen Plant Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research in opdracht van en gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij (LNV) in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema '6^{de} Actieprogramma Nitraat' (projectnummer BO-43-101-016).

Wageningen Environmental Research

Wageningen, november 2021

Gereviewd door:

Lotte Veenemans, onderzoeker (team Duurzaam Bodemgebruik, Wageningen Environmental Research)

Akkoord voor publicatie:

Gert Jan Reinds, teamleider van team Duurzaam Bodemgebruik

Rapport 3129

ISSN 1566-7197

Regelink, I.C., J. van Middelkoop, W. van Geel, P. Ehlert, 2021. *De enkelvoudige versus de gecombineerde indicator voor bepaling van de fosfaattoestand van de bodem; Toetsing op data van veeljarige veldproeven op grasland en bouwland*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3129. 78 blz.; 18 fig.; 21 tab.; 8 ref.

In de Nederlandse landbouw wordt de aanvoer van fosfaat naar landbouwgronden gereguleerd met een stelsel van fosfaatgebruiksnormen, waarvan de hoogte afhankelijk is van de fosfaattoestand van de bodem. De fosfaattoestand werd tot en met 2020 afgeleid aan de hand van enkelvoudige indicatoren; het Pw-getal voor bouwland en het P-AL-getal voor grasland. Vanaf 2021 is dit vervangen door een stelsel op basis van de gecombineerde indicator (P-AL-getal en P-CaCl₂-getal) voor zowel grasland als bouwland. Met data van veeljarige fosfaatveldproeven op grasland en bouwland wordt onderzocht wat de effecten van deze overgang zijn 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.

In the Netherlands, the application of phosphorus (P) from fertilising products is regulated through application rate limits targeting equilibrium fertilisation and a neutral P status of the soil meaning that a higher P application rate limit is assigned to soils with a low P status and vice versa. Until 2021, the soil P status was derived based on one single soil P indicator namely P-AL-value for grassland and Pw-value for arable land. From 2021 onwards, the soil P status will be derived from the combination of P-AL-value(indicator for the P capacity) and P-CaCl₂ -value (indicator for P intensity) enabling to differentiate based on the P buffering capacity of the soil. Data from long term field trials supply valuable data on trends in soil P indicators in relation to crop uptake and P application rate. This report assesses trends in the single P indicator (Pw-value or P-AL-value) and combined indicator (P-AL-value and P-CaCl₂-value) in relation to P fertilisation rate and P uptake rate using data from long term field experiments on grassland and arable land.

Trefwoorden: Fosfaatgebruiksnorm, gecombineerde fosfaatindicator, fosfaatindicator, intensiteit, capaciteit, bufferend vermogen, calciumchloride, ammoniumlactaat azijnzuur

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/557176> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2021 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E info.alterra@wur.nl, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem.

In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Inhoud

	Verantwoording	5
	Woord vooraf	7
	Samenvatting	9
1	Inleiding	13
	1.1 Achtergrond	13
	1.2 Onderzoeksvragen	15
2	Beschrijving datasets	16
	2.1 Grasland	16
	2.1.1 Veeljarige grasproef	16
	2.1.2 Additionele bemonstering op praktijklocaties (2019-2021)	18
	2.1.3 Reproduceerbaarheid P-CaCl ₂ -getal	18
	2.1.4 Data-analyse	19
	2.2 Bouwland	20
	2.2.1 Fosfaattoestandenproef Lelystad	21
	2.2.2 Fosfaathoeveelhedenproef Marknesse	21
	2.2.3 Fosfaathoeveelhedenproef Wijster	22
	2.2.4 Data-analyse	22
3	Gecombineerde indicator & grasland	23
	3.1 Effect van bemonsteringsdiepte	23
	3.2 Veeljarige monitoring fosfaatindicatoren	24
	3.2.1 P-AL-getal	24
	3.2.2 P-CaCl ₂ -getal	27
	3.2.3 Trends in de fosfaattoestand bij de enkelvoudige en gecombineerde indicator	29
	3.3 Gewasopbrengst en fosfaatopname	32
	3.4 Fosfaat in bodemvocht	35
	3.5 Monitoring fosfaatindicatoren op praktijkpercelen op zand	36
	3.6 Relaties tussen fosfaatindicatoren	37
	3.7 Reproduceerbaarheid van het P-CaCl ₂ -getal bij twee laboratoria	40
	3.8 Synthese grasland	42
	3.9 Conclusies grasland	45
4	Gecombineerde indicator & bouwland	47
	4.1 Trends in fosfaattoestanden	47
	4.1.1 Lelystad (jonge zeeklei)	47
	4.1.2 Marknesse (jonge zeekleigrond)	50
	4.1.3 Wijster (zandgrond) fosfaathoeveelheden fosfaatvormen veldproef	54
	4.2 Relaties tussen fosfaatindicatoren	57
	4.3 Gewasopbrengst in relatie tot fosfaatgebruiksnorm	59
	4.3.1 Lelystad	59
	4.3.2 Marknesse	60
	4.3.3 Wijster	61
	4.4 Fosfaat in bodemvocht	62
	4.5 Synthese bouwland	63
	4.6 Conclusies bouwland	65

5	Beantwoording onderzoeksvragen	67
	Literatuur	70
	Bijlage 1	71

Verantwoording

Rapport: 3129

Projectnummer: 5200046111

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord Referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Onderzoeker

naam: Lotte Veenemans

datum: 23-09-2021

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Gert Jan Reinds

datum: 23-09-2021

Woord vooraf

Het project met de veeljarige fosfaatveldproeven onderzoekt de effecten van verschillende vormen van fosfaatmanagement van grasland en bouwland. Het project geeft uitvoering aan acht veeljarige veldproeven die in verschillende jaren werden aangelegd. Een drietal veldproeven op bouwland op zand- of kleigrond werd in 1972 aangelegd, een andere bouwlandproef op kleigrond in 1986. De proeven worden nog immer gecontinueerd, zij het met aanpassingen in de fosfaatgiften en frequentie van monitoring. In 1997 werden op vier locaties met grasland op zand-, klei- of veengrond veldproeven aangelegd. Van de vier grasproeflocaties zijn twee locaties door externe factoren niet meer in gebruik, maar de proef wordt op de klei- en veengrond nog altijd voortgezet. Door hun ontwerp wordt uitsluitend verkregen over veeljarige effecten van fosfaatbemesting op opbrengst en kwaliteit van het gewas, over het verloop van de fosfaattoestand in de bodem op de lange termijn en over milieukundige effecten op de lange termijn. Een belangrijk onderwerp is evenwichtsbemesting. Over de resultaten van de veldproeven is en wordt gepubliceerd in wetenschappelijke rapporten en artikelen, maar ook in vakbladen. Voor het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselveiligheid werd in 2018 een synthese uitgevoerd van de resultaten verkregen over de periode 2000-2016. Die synthese heeft geleid tot het identificeren van onderwerpen die verdere verdieping vragen. Dit rapport is een uitwerking van een van de vragen, namelijk: wat is de consequentie van de overgang van de enkelvoudige fosfaatindicator naar de gecombineerde fosfaatindicator op de hoogte van de fosfaatgebruiksnormen? De vraag ondersteunt aanpassingen in het fosfaatgebruiksnormenstelsel.

Samenvatting

In Nederland wordt de toegestane fosfaatbemesting bepaald door een stelsel van fosfaatgebruiksnormen, waarbij de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm is gedifferentieerd naar de fosfaattoestand van de bodem. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen grasland en bouwland. Tot en met 2020 werd de fosfaattoestand afgeleid op basis van de enkelvoudige indicatoren: het P-AL-getal (grasland) en het Pw-getal (bouwland). Sinds 2021 wordt de fosfaattoestand op grasland en bouwland bepaald door de gecombineerde indicator, bestaande uit de combinatie van het P-AL-getal en het P-CaCl₂-getal.

De invoering van deze nieuwe indicator leidt tot de volgende onderzoeksvragen:

- Welke verschuivingen in de fosfaatklassen treden op bij de overgang van de enkelvoudige indicator naar de gecombineerde indicator voor grasland en bouwland?
- Wat is de mate van temporele variatie in de gecombineerde indicator voor grasland en bouwland?
- Is de gecombineerde indicator beter in staat om veldjes met verschillen in de hoogte van de historische fosfaatgift te onderscheiden?
- Hoe verhoudt de fosfaattoestand op basis van de gecombineerde indicator zich tot de gewasopbrengsten op gras- en bouwland en tot het fosforgehalte van gras?
- Is de gecombineerde indicator een betere voorspeller van de fosfaatconcentratie in het bodemvocht onder de bouwvoor ten opzichte van de enkelvoudige indicator?

Dit rapport beantwoordt de onderzoeksvragen aan de hand van data van veeljarige veldproeven op grasland en bouwland.

Grasland

Op grasland wordt sinds 1996 een veldproef uitgevoerd met een fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking of 20 of 40 kg P₂O₅ boven de gewasonttrekking. Vanaf 2000 is tevens een behandeling zonder fosfaatgift (uitmijnen) aanwezig. De veldjes worden beweid met runderen (pinken). De proef werd oorspronkelijk uitgevoerd op vier locaties (Waiboerhoeve (zeeklei), Zegveld (veen), Cranendonck (dekzand) en Heino (dekzand)), echter, de twee locaties op zandgrond zijn in 2012 en 2013 komen te vervallen door externe omstandigheden. Om aanvullende metingen op zandgrond te verkrijgen, is in het kader van het additionele project 'Trends in P-indicatoren' sinds 2018 gestart met monitoring van de fosfaattoestand op praktijkpercelen op dekzand onder beheer van proefboerderijen De Marke (Hengelo (Gld)) en Unifarm (Wageningen).

De fosfaattoestand in de bodem is vanaf 1996 jaarlijks bepaald voor de bodemlagen 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm en 20-30 cm. De bemonsteringsdiepte wijkt daarmee af van de huidige reguliere bemonsteringsdiepte (0-10 cm) voor bodemvruchtbaarheidsonderzoek die, op basis van grondonderzoek, in 2003 de bemonsteringsdiepte 0-5 cm verving bij bemestingsadvisering. Sinds 2018 is in het kader van additioneel onderzoek de 0-10 cm-bodemlaag toegevoegd aan de reguliere bemonstering. Op de zeeklei- en veengrond leidt bemonstering van de 0-5 cm-bodemlaag tot hogere waarden voor het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal ten opzichte van de 5-10 cm- of 0-10 cm-bodemlaag. Op de zandgrondlocaties is fosfaat meer uniform verdeeld in de bodem en is de bemonsteringsdiepte minder van invloed op de hoogte van de fosfaatindicatoren. In de evaluatie is de focus gelegd op beoordeling van het verloop van de fosfaatindicatoren in de bodemlaag 5-10 cm.

Analyse van het verloop in het P-AL-getal wijst uit dat een fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking voldoende is om het P-AL-getal te handhaven op de veen- en zeekleigrond, maar niet op de locaties op zandgrond (Heino en Cranendonck), waar sprake is van een langzaam dalende trend door vastlegging van fosfaat in andere vormen, waaronder organisch fosfaat. Veranderingen in het P-AL-getal onder invloed van de hoogte van de fosfaatgift zijn traag. Bij een fosfaatgift van 20 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking is een periode van circa tien jaar nodig om het P-AL-getal in de 0-5 cm-bodemlaag met 2,8 tot 5,0 eenheden te verhogen *ten opzichte van* het P-AL-getal bij een fosfaatgift

gelijk aan de gewasonttrekking. Een langere tijdsduur is nodig om het P-AL-getal ook in de 5-10 cm-laag te verhogen en daarmee een effect te hebben op de hoogte van de fosfaattoestand bij waardering op basis van een grondmonster uit de 0-10 cm-bodemlaag. Op de onderzochte veen- en kleigrond is sprake van een hoge mate van temporele variatie in het P-AL-getal, terwijl het beloop in het P-AL-getal op de zandgrondlocaties meer stabiel is.

Het P-CaCl₂-getal wordt sinds 2004 jaarlijks gemonitord. In de 0-5 cm-bodemlaag was het gemiddelde P-CaCl₂-getal in de periode 2004-2020 (of 2012/2013 op zandgrond) hoger in veldjes met een hogere fosfaatgift. De verschillen in de hoogte van het P-CaCl₂-getal als gevolg van onderscheidenlijke fosfaatgift zijn echter laag ten opzichte van de temporele variatie in het verloop van het P-CaCl₂-getal. Het verschil in P-CaCl₂-getal was daarnaast niet statistisch significant in de 5-10 cm-bodemlaag.

De overgang van de enkelvoudige indicator zijnde het P-AL-getal naar de gecombineerde indicator van het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal leidt op grasland niet tot structurele verschuivingen in de fosfaattoestandsklasse en de daarmee gepaard gaande hoogte van de fosfaatgebruiksnorm. De gecombineerde indicator heeft een hoger onderscheidend vermogen dan slechts het P-AL-getal t.a.v. de bemestingshistorie voor de proefvelden op de zandlocaties maar niet op de veen- en kleigrond. Een aandachtspunt is de hoge mate van temporele variatie in de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm op proefveldjes op klei- en veengrond. Op veengrond worden schommelingen van één tot drie klassen t.o.v. het voorgaande jaar geconstateerd, zonder dat daarbij sprake is van een trend. Op kleigrond zijn verschuivingen in de fosfaatgebruiksnorm in de regel beperkt tot één klasse ten opzichte van het voorgaande jaar, maar incidenteel komen verschuivingen over twee klassen voor. Op zandgrond is de mate van temporele variatie in de hoogte van de gebruiksnorm beperkt, echter ook op zandgrond is de afbakening van de fosfaattoestand 'neutraal' (gebruiksnorm 95 kg P₂O₅/ha) nauw ten opzichte van de herhaalbaarheid bij bemonstering in duplo (uitgevoerd op praktijkpercelen op zandgrond) of bij heranalyse van de monsters bij een ander lab. Het onderscheid tussen de fosfaattoestand 'neutraal' en de aangrenzende klassen is daarmee arbitrair.

De drogestofopbrengst is gemiddeld over de vier proefveldlocaties 5% hoger bij een fosfaatgift van 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking ten opzichte van een gift gelijk aan de gewasonttrekking. Verschillen in drogestofopbrengst tussen de behandelingen zijn sinds de aanvang van de proef aanwezig en er is geen sprake van een toename gedurende de looptijd van de proef. Op kleigrond wordt de fosfaattoestand beoordeeld als 'hoog' en op deze locatie is geen sprake van een verschil in opbrengst of het fosforgehalte in het gras bij onderscheidende fosfaatgiften. Op de proefvelden op zand en veen wordt de fosfaattoestand van de bodem bij evenwichtsbemesting geclassificeerd als neutraal/laag en is wel sprake van een gewasreactie (opbrengst en fosforgehalte in het gras) op de hoogte van de fosfaatgift. De waardering van de fosfaattoestand op basis van de gecombineerde indicator past daarmee bij de observaties uit de grasopbrengsten. De proefopzet leent zich echter niet voor het afleiden van een gewenste fosfaatgift door verstrengeling van de hoogte van de fosfaatgift met de fosfaattoestand van de bodem. Op deze locaties is een fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking niet toereikend om gemiddeld het gewenste fosforgehalte in het gras van 3,5 g/kg droge stof te realiseren.

De fosfaatindicatoren P-AL-getal en P-CaCl₂-getal zijn geplot tegen de gemiddelde orthofosfaat-concentratie in het bodemvocht verkregen door monitoring over een periode van zeven jaar. Orthofosfaat-concentraties in het bodemvocht tonen een zeer grote temporele variatie. Het P-AL-getal verklaart een groter deel van de variatie in de ortho-P-concentraties in het bodemvocht ten opzichte van het P-CaCl₂-getal.

Samengevat heeft de overgang van de enkelvoudige naar de meervoudige indicator op grasland nauwelijks consequenties voor de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm. De gecombineerde indicator kent een hoger onderscheidend vermogen op zandgrond, maar niet op veen- en kleigrond. De fosfaatindicatoren P-AL-getal en P-CaCl₂-getal kennen een hoge mate van temporele variatie en in de praktijk zal dit van invloed zijn op de waardering van de fosfaattoestand. Structurele veranderingen in het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal onder invloed van verschillende fosfaatgiften verlopen daarentegen zeer traag, op tijdschalen van tientallen jaren.

Bouwland

De veeljarige veldproeven op bouwland bestaan uit vier proeven gelegen op drie proefveldlocaties in Lelystad (jonge zavelgrond), Marknesse (jonge zavelgrond) en Wijster (dekszandgrond).

De proef in Lelystad is gestart in 1990 en bestaat uit vier niveaus van de initiële fosfaattoestand gecombineerd met uitmijnen (geen fosfaatgift) of een fosfaatgift van 70, 140 of 280 kg P₂O₅/ha. Bij veldjes die een jaarlijkse fosfaatgift van 70 kg P₂O₅/ha ontvangen, stabiliseert de fosfaattoestand zich op 'neutraal' bij classificatie op basis van het Pw-getal. Bij overgang naar de gecombineerde indicator worden dezelfde percelen geclassificeerd als 'arm' en deze verschuiving komt voort uit de combinatie van lage P-AL-getallen in combinatie met lage P-CaCl₂-getallen (<1,4 mg P/kg). Hierdoor neemt de fosfaatgebruiksnorm voor deze percelen toe van 70 naar 120 kg P₂O₅/ha. Verschillen in de fosfaatbemestingshistorie komen eerder tot uiting in het P-AL-getal en het Pw-getal dan in het P-CaCl₂-getal.

In Marknesse liggen twee proeven opgenomen in één orthogonale veldproef. In de eerste proef worden fosfaatgiften van 0, 80, 160 en 240 kg P₂O₅ vanaf 1972 jaarlijks toegediend. In de tweede proef wordt bemest volgens strikte evenwichtsbemesting en een twee- en driemaal hogere fosfaatgift dan evenwichtsbemesting. Evenals in Lelystad wordt ook in Marknesse geconstateerd dat de gecombineerde indicator een lager vermogen heeft om percelen met een verschillende bemestingshistorie te onderscheiden. P-CaCl₂-getallen zijn laag (veelal <1,4 mg P/kg) en in deze range wordt P-CaCl₂ sterk gebufferd door de bodem, waardoor veranderingen in P-CaCl₂-getal trager verlopen dan in een capaciteitsparameter zoals het P-AL-getal. De overgang van de enkelvoudige indicator naar de gecombineerde indicator (indeling 2021) leidt in Marknesse, evenals in Lelystad, tot een lagere waardering van de fosfaattoestand en daarmee tot een hogere fosfaatgebruiksnorm: deze neemt toe tot 50 kg P₂O₅/ha ten opzichte van de beoordeling op basis van het Pw-getal (indeling 2020). De verschuiving naar hogere fosfaatgebruiksnormen is het resultaat van relatief lage P-AL-getallen en zeer lage P-CaCl₂-getallen. Op deze kalkrijke zavelgronden komt het fosfaatoverschot niet volledig tot uiting in het P-AL-getal door omzetting naar andere fosfaatvormen; dit aspect vraagt nader onderzoek.

Op de proefvelden in Lelystad en Marknesse is geen sprake van opbrengstderving bij een minimale fosfaatgift van 70 kg P₂O₅, in combinatie met een P-AL-getal >30 mg P₂O₅/100 g. Deze veldjes vallen bij de overgang naar de gecombineerde indicator in fosfaattoestand 'arm', waardoor de gebruiksnorm toeneemt tot 120 kg P₂O₅/ha, terwijl dit vanuit landbouwkundig perspectief niet noodzakelijk is. Bij lagere P-AL-getallen en fosfaatgiften van 50 of 70 kg P₂O₅/ha is sprake van circa 6% opbrengstderving in gewasgroep 1. Deze verschillen in de gewasreactie binnen fosfaatklasse 'arm' ontstaan door het brede bereik voor het P-AL-getal bij deze fosfaatklasse.

De veldproef op de dekzandgrond in Wijster bestaat uit o.a. fosfaatgiften van 0, 45, 90, 180 en 240 kg P₂O₅, vanaf 1972 jaarlijks toegediend. Ten opzichte van de zavelgronden kenmerkt Wijster zich door hoge P-AL-getallen t.o.v. van het Pw-getal. Bij een Pw-getal van 25-45 mg P₂O₅/L (fosfaatklasse laag en neutraal) is het P-AL-getal boven 55 mg P₂O₅/100 g. Door de combinatie met lage P-CaCl₂-getallen blijft de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm nagenoeg gelijk of neemt af ten opzichte van de indeling op basis van het Pw-getal. Overeenkomstig met de zavelgronden wordt ook in Wijster geconstateerd dat het P-CaCl₂-getal minder goed in staat is om velden met een verschillende fosfaatbemestingshistorie te onderscheiden. Op percelen die sinds 1972 een fosfaatgift van 45 of 90 kg P₂O₅/ha hebben ontvangen, zijn P-CaCl₂-getallen laag (<0,3 mg P/kg) en niet van elkaar te onderscheiden. Veeljarige fosfaatgiften van 180 of 240 kg P₂O₅/ha zijn nodig om het P-CaCl₂-getal te verhogen naar een waarde boven 0,8 mg P/kg. Bij een veeljarige bemesting met 45 of 90 kg P₂O₅/ha stabiliseert de fosfaattoestand op respectievelijk 'arm' (fosfaatgebruiksnorm 120 kg P₂O₅) en 'laag' (gebruiksnorm 80 kg P₂O₅) en treedt opbrengstderving op bij alle gewasgroepen. Bij een jaarlijkse fosfaatgift van 90 kg P₂O₅ op veldjes met een fosfaattoestand 'laag' (op basis van gecombineerde indicator) bedraagt de opbrengstderving 20-30% in gewasgroepen 1,2 en 3 ten opzichte van percelen met een jaarlijkse fosfaatgift van 180 of 250 kg P₂O₅/ha. De overgang naar de gecombineerde indicator leidt op deze velden tot een verlaging van de fosfaatgebruiksnorm van 120 naar 70/80 kg P₂O₅/ha, terwijl hier vanuit landbouwkundig oogpunt een hogere fosfaatgift wenselijk is.

De overgang naar de gecombineerde indicator leidt op de kalkrijke zavel versus de kalkarme zandgrond tot verschillende effecten. Deze complexiteit komt voort uit omzetting van fosfaat naar andere vormen die niet tot uiting komen in het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal, maar mogelijk wel bijdragen aan de vruchtbaarheid van de bodem, getuige het feit dat op de jonge zeekleigrond (kalkrijke zavel) nog jarenlang goede opbrengsten zijn te behalen indien fosfaatbemesting wordt onthouden. Dit terwijl op Wijster (kalkarme zand) – met een hogere fosfaattoestand – wel degelijk sprake is van hoge opbrengstdervingen bij het onthouden van fosfaatbemesting.

Fosfaatconcentraties in het bodemvocht gemeten onder de bouwvoor zijn over het algemeen zeer laag (<0,1 mg P/l), ongeacht de hoogte van de fosfaatgift en het P-AL-getal van de bodem. Uitzondering hierop zijn de behandelingen op Lelystad met 140 en 280 kg P₂O₅/ha waar fosfaatconcentraties in het bodemvocht gemiddeld 0,4 en 2,4 mg P/l bedragen. Dit correspondeert met hoge P-CaCl₂-getallen in de betreffende percelen.

Algemeen

Met de overgang naar de gecombineerde indicator is een uniformiteit ontstaan in de fosfaatindicatoren voor grasland en bouwland. De interpretatie van de hoogte en het verloop van de indicatoren kent echter verschillen tussen grasland en bouwland. Op grasland komen hogere waarden van het P-CaCl₂-getal voor en kent het verloop in het P-CaCl₂-getal en P-AL-getal een hogere mate van temporele variatie ten opzichte van bouwland. De hogere P-CaCl₂-getallen op grasland en opzichte van bouwland – bij vergelijkbare fosfaatoverschotten – kunnen voortkomen uit de verschillen in bemonsteringsdiepte tussen grasland (0-10 cm) en bouwland (0-25/30 cm) en het ontbreken van een grond-kerende bewerking op grasland, waardoor een overschot aan fosfaat zich sneller vertaalt in een verandering van de fosfaatbodemindicator. Daarnaast is het organischestofgehalte in grasland hoger, wat tevens kan leiden tot een hoger P-CaCl₂-getal. Het verschil in bemonsteringsdiepte kan overigens reden zijn voor de hogere mate van temporele variatie in de fosfaatindicatoren op grasland, omdat de bovenlaag sterker beïnvloed wordt door o.a. fluctuaties in het bodemvochtgehalte.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In 2006 is het stelsel van gebruiksnormen voor stikstof en fosfaat ingevoerd in de Nederlandse landbouw, om de uit- en afspoeling van stikstof en fosfaat vanuit de landbouw naar grondwater en oppervlaktewater te verminderen en om daarmee te voldoen aan de verplichtingen van de Nitraatrichtlijn (in het kader van afspraken rond derogatie van de norm van 170 kg N/ha met mest) en de Kaderrichtlijn Water van de Europese Unie. In 2010 zijn de gebruiksnormen voor fosfaat gedifferentieerd naar de fosfaattoestand van de bodem (Rijksoverheid, 2009). Het uiteindelijke doel van de differentiatie van fosfaatgebruiksnormen is om op termijn voor alle landbouwgronden een fosfaattoestand te realiseren waarbij gemiddeld evenwichtsbemesting wordt gerealiseerd.

De hoogte van de fosfaatgebruiksnormen wordt afgeleid aan de hand van de fosfaattoestand van de bodem, die tot en met 2019 werd vastgesteld op basis van het P-AL-getal (grasland) of het Pw-getal (bouwland). Tot en met 2019 kende de indeling vier fosfaatklassen (Tabel 1.1) en in 2020 werd dit uitgebreid tot een indeling op basis van vijf fosfaatklassen (Tabel 1.2). Vanaf 1 januari 2021 werd dit vervangen door een systematiek op basis van de combinatie van het P-AL-getal en het P-CaCl₂-getal (de gecombineerde indicator)¹ (Tabel 1.3). Het P-CaCl₂-getal wordt bepaald door extractie van gedroogde grond met een 10 mM CaCl₂-oplossing (schudverhouding 0,1 kg/L) en analyse van de concentratie orthofosfaat (P-PO₄) in het extract. Het P-CaCl₂-getal wordt reeds gebruikt in fosfaatbemestingsadviezen voor grasland en snijmaïs als indicator voor het direct beschikbare fosfaat en wordt vanaf 2021 ook voor bouwland ingevoerd. Het Pw-getal wordt niet meer door alle laboratoria gemeten, maar wordt dan berekend uit het P-CaCl₂-getal en het P-AL-getal. Met invoering van deze gecombineerde indicator voor grasland en bouwland verdwijnt het verschil in indicatoren voor grondonderzoek op fosfaat tussen bouwland en grasland.

Tabel 1.1 Fosfaatgebruiksnormen voor grasland (P-AL-getal) en bouwland (Pw-getal) in 2019 (vier klassen).

P-toestand	Grasland		Bouwland	
	P-AL-getal, mg P ₂ O ₅ /100 g	Norm kg P ₂ O ₅ /ha	Pw-getal, mg P ₂ O ₅ /L	Norm kg P ₂ O ₅ /ha
Arm	<16	120	<25	120
Laag	27	100	25-36	75
Neutraal	50	90	36-55	60
Hoog	>50	80	>55	50

Tabel 1.2 Fosfaattoestanden en fosfaatgebruiksnormen voor grasland (P-AL-getal) en bouwland (Pw-getal) in 2020 (vijf klassen).

P-toestand	Grasland		Bouwland	
	P-AL-getal, mg P ₂ O ₅ /100 g	Norm kg P ₂ O ₅ /ha	Pw-getal, mg P ₂ O ₅ /L	Norm kg P ₂ O ₅ /ha
Arm	<16	120	<25	120
Laag	16-26	105	25-35	80
Neutraal	27-40	95	36-45	70
Ruim Voldoende	41-50	90	46-55	60
Hoog	>50	75	>55	40

¹ Staatscourant Nr. 41931, 26 juli 2019.

Bij de invoering van de gecombineerde indicator streeft het ministerie van LNV naar een indeling waarbij de totale fosfaatgebruiksruimte zo dicht mogelijk aansluit bij de situatie per 2020. Hiertoe heeft het ministerie advies gevraagd aan de Commissie Deskundigen Meststoffenwet (CDM) om de gevolgen voor de overgang naar de gecombineerde indicator voor fosfaatgebruiksnormen op basis van een door LNV voorgestelde indeling voor de fosfaatplaatsingsruimte te onderzoeken (CDM, 2019). Het CDM heeft destijds met behulp van een database van Eurofins Agro b.v. voor diverse scenario's het effect op de fosfaatgebruiksruimte doorgerekend. Dit resulteerde in het advies om de indeling van de fosfaatklassen aan te passen om zo een verandering in de totale fosfaatgebruiksruimte te doen voorkomen. In de aangepaste tabellen zijn de klassegrenzen voor het P-PAL-getal en P-CaCl₂-getal gelijk aan het voorstel vanuit het ministerie van LNV, maar is de indeling in fosfaatklassen gewijzigd. De indeling zoals voorgesteld door het CDM (2019) voor grasland en bouwland is overgenomen door het ministerie van LNV en gepubliceerd in de Staatscourant (nr. 41931). Het CDM (2019) heeft daarnaast voorstellen gedaan om naast grasland en bouwland ook maisland te onderscheiden. Dit voorstel is echter niet overgenomen in de publicatie in de Staatscourant.² In het huidige rapport is de indeling zoals gepubliceerd in de Staatscourant gebruikt om effecten op de fosfaatgebruiksruimte te bepalen.

Tabel 1.3 Fosfaattoestanden en fosfaatgebruiksnormen voor grasland en bouwland bij gebruik van de gecombineerde indicator P-AL-getal en P-CaCl₂-getal per 1 januari 2021.

Fosfaatgebruiksnorm (kg P₂O₅/ha) **grasland**

		P-AL-getal (mg P ₂ O ₅ /100 g)				
P-CaCl ₂ (mg P/kg)		<21	21-30	31-45	46-55	>55
<0,8	120	105	105	95	90	90
0,8-1,4	120	105	95	90	90	90
1,5-2,4	105	95	90	90	75	75
2,5-3,4	95	90	90	75	75	75
>3,4	95	90	75	75	75	75

Fosfaatgebruiksnorm (kg P₂O₅/ha) **bouwland**

		P-AL-getal (mg P ₂ O ₅ /100 g)				
P-CaCl ₂ (mg P/kg)		<21	21-30	31-45	46-55	>55
<0,8	120	120	120	80	80	80
0,8-1,4	120	120	120	80	70	70
1,5-2,4	120	120	80	70	60	60
2,5-3,4	120	80	70	60	40	40
>3,4	80	80	70	60	40	40

Vanuit de praktijk zijn er zorgen over de consequenties van de invoering van de gecombineerde indicator op de fosfaatgebruiksruimte op bedrijfsniveau. Eurofins Agro³ en LTO⁴ verwachten in bepaalde gebieden sterke dalingen in de fosfaatgebruiksruimte voor bouwland op kleigrond. De indeling van de fosfaatklassen zoals opgesteld door het CDM (2019) is gebaseerd op het uitgangspunt dat er géén verandering optreedt in de totale fosfaatplaatsingsruimte binnen de Nederlandse landbouw. De gekozen indeling kent echter een nauwe bandbreedte voor de fosfaatindicatoren behorende bij de klassen neutraal en ruim voldoende, waardoor het risico bestaat dat fosfaatgebruiksnormen sterk variëren per vierjarige cyclus van grondonderzoek (CDM, 2019). Hierbij speelt ook mee dat het P-CaCl₂-getal, een indicator voor de momentaan beschikbare fosfaatfractie

² Staatscourant 2021-8611: <https://zoek.officiëlebezoekingen.nl/stcrt-2021-8611.html>.

³ Eurofins Agro. Inventarisatie gevolgen fosfaatwet voor P-gebruiksruimte. 2020-10-15. Beschikbaar via: <https://www.eurofins-agro.com/nl-nl/inventarisatie-fosfaatgebruiksruimte>.

⁴ LTO, brief met Verzoek tot aanpassing klasse-indeling voor de gecombineerde fosfaatindicator. Kenmerk 20201015/CD/MS. Beschikbaar via: <https://www.lto.nl/wp-content/uploads/2020/10/201015-LNV-Schouten-Verzoek-tot-aanpassing-klasseindeling-voor-de-gecombineerde-fosfaatindicator.pdf>.

(intensiteitsindicator), mogelijk een grotere temporele variatie kent dan het P-AL-getal, zijnde een indicator voor de capaciteit. Het CDM (2019) geeft aan dat het P-CaCl₂-getal waarschijnlijk een meer gevoelige indicator is voor het risico op uitspoeling dan het P-AL-getal, en dat het P-CaCl₂-getal waarschijnlijk ook sneller verandert onder invloed van het fosfaatoverschot in vergelijking met het P-AL-getal en sneller wordt beïnvloed door de afvoer van fosfaat met oogstproducten. Omdat het P-CaCl₂-getal echter nog een relatief nieuwe indicator is,⁵ is informatie over het langetermijnverloop in het P-CaCl₂-getal en over inzichten in relaties tussen het P-CaCl₂-getal en fosfaatgebruik nog beperkt gedocumenteerd. Het onderhavige rapport vervult deels de behoefte aan met inzichten op basis van data uit veldproeven naar het verloop van het P-CaCl₂-getal in relatie tot fosfaatgiften, gewasopbrengsten en risico's op fosfaattuitspoeling.

Kennis over de wijzigingen in de gecombineerde fosfaatindicator door bemesting en afvoer wordt ontwikkeld met het project met veeljarige veldproeven, evenals kennis van de relatie tussen P-CaCl₂-getal versus P-AL-getal en de fosfaatconcentratie in het bodemvocht. Fosfaatindicatoren en fosfaatconcentraties in bodemvocht reageren zeer traag op veranderingen in de hoogte van het fosfaatoverschot (Ehlert et al., 2018) en zodoende zijn veeljarige veldproeven nodig om veranderingen in de gecombineerde indicator onder praktijkrelevante condities vast te kunnen stellen.

1.2 Onderzoeksvragen

In dit rapport worden met behulp van data van veeljarige veldproeven op grasland en bouwland de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

- Welke verschuivingen in de fosfaatklassen treden op bij de overgang van de enkelvoudige indicator naar de gecombineerde indicator voor grasland en bouwland?
- Wat is de mate van temporele variatie in de gecombineerde indicator grasland en bouwland bij heranalyse binnen vier jaar of bij heranalyse bij een ander laboratorium?
- Is de gecombineerde indicator beter in staat om veldjes met verschillen in de hoogte van de historische fosfaatgift te onderscheiden?
- Hoe verhoudt zich de fosfaattoestand op basis van de gecombineerde indicator met de landbouwkundige fosfaattoestand van de bodem zoals afgeleid op basis van gewasopbrengsten (bouwland en grasland) en het fosforgehalte van het gewas (grasland)?
- Is de gecombineerde indicator een betere voorspeller van de fosfaatconcentratie in het bodemvocht onder de bouwvoor ten opzichte van de enkelvoudige indicator?

Op bouwland is de bemonsteringsdiepte (0-25/30 cm) van de veldproeven conform het protocol voor bemonstering van de bodem ter bepaling van het PAL-getal en het Pw-getal.⁶ Op de veldproeven op grasland bedraagt de bemonsteringsdiepte van de standaardmonitoring echter 0-5 en 5-10 cm en wijkt daarmee af van het protocol, dat een bemonsteringsdiepte van 0-10 cm voorschrijft. In het rapport zijn de data van de 5-10 cm-bodemlaag gebruikt voor het afleiden van de fosfaattoestand op de graspercelen.

Onder temporele variatie wordt in dit rapport de wijziging van de fosfaattoestand in de tijd bij een continue vorm van fosfaatmanagement verstaan. De temporele variatie wordt onderzocht door elk jaar op een vastgesteld tijdstip na de oogst van het gewas een grondmonster te steken. In dit onderzoek worden wijzigingen in de fosfaattoestand bij bemonstering direct na bemesting of gedurende het groeiseizoen niet betrokken. Fosfaat in het bodemvocht is bepaald door uitslingeren van verse grondmonsters (grasland) of bemonstering met kunstwortels (bouwland). Bemonsteringstijdstippen waren in het najaar en winter, seizoenen waarin uitspoeling mogelijk is. De afvoer van fosfaat wordt op bouwland bepaald door de afvoer met de oogstproducten. Op grasland wordt fosfaat afgevoerd met maaisneden en met het ingeschaard vee. De mest van het vee blijft op de veldproef.

⁵ Het commerciële laboratorium Eurofins Agro biedt de P-CaCl₂ methode aan sinds 2004, andere testlaboratoria volgden.

⁶ Staatscourant 2021-8611: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2021-8611.html>.

2 Beschrijving datasets

2.1 Grasland

2.1.1 Veeljarige grasproef

2.1.1.1 Opzet

Bemesting met fosfaat- en stikstofoverschotten

In het najaar van 1996 is door Wageningen UR een veldproef op grasland aangelegd om onder praktijkomstandigheden te onderzoeken hoe grasland zich op lange termijn bij verschillende fosfaat- en stikstofoverschotten gedraagt. Ten opzichte van klassieke bemestingsproeven waren er drie bijzonderheden in deze proef:

- Er is runderdrijfmest toegediend.
- In de proef is geweid met runderen.
- De behandelingen zijn gebaseerd op jaarlijks gelijk gehouden oplopende fosfaat- en stikstofoverschotten in plaats van oplopende bemestingstrappen.
- In 2002 werd een behandeling toegevoegd waar geen fosfaatbemesting en geen beweiding wordt toegepast.

De proef is aangelegd op drie verschillende grondsoorten op vier locaties:

- Heino: Dekzand gelegen in Heino, Overijssel.
- Cranendonck: Dekzand gelegen in Soerendonck, Noord-Brabant.
- Waiboerhoeve: Jonge zeeklei gelegen in Lelystad, Flevoland.
- Zegveld: Veengrond gelegen in Zegveld, Utrecht.

Bij aanvang van de proef was de fosfaattoestand van deze percelen ruim voldoende volgens het toen geldende bemestingsadvies gebaseerd op het P-AL-getal, overeenkomend met de klasse 'neutraal' zoals die in het gebruiksnormenstelsel voor 2017 wordt gehanteerd. Op elke locatie zijn drie verschillende fosfaatbemestingsniveaus aangelegd: alle zes veldjes kregen fosfaatevenwichtsbemesting met rundveedrijfmest, op twee veldjes is met tripelsuperfosfaat jaarlijks een fosfaat(P_2O_5 -)overschot van 20 kg per ha aangelegd en op twee veldjes een overschot van 40 kg per ha. De drie fosfaalniveaus zijn aangelegd bij twee stikstofoverschotten: op drie veldjes werd gestreefd naar een jaarlijks overschot van 180 kg N/ha en op de overige drie veldjes 300 kg N/ha. De veldjes kregen naast stikstof (N) uit rundveedrijfmest ook N met kunstmest. Op iedere locatie zijn er dus drie fosfaatbehandelingen (0, 20 en 40 kg P_2O_5 /ha overschot) gecombineerd met twee stikstofbehandelingen (180 en 300 kg N/ha overschot), resulterend in zes behandelingen per locatie. De proef is uitgevoerd in enkelvoud per locatie. Alle veldjes zijn in elk groeiseizoen twee keer gemaaid en vier keer beweid met pinken of droge koeien.

Op de locatie Heino is het proefveldmanagement sinds 2002 omgeschakeld naar een biologisch management. Sindsdien is de bemesting van de fosfaatoverschotten uitgevoerd met zacht natuurfosfaat (Gafsa-fosfaat, toegepast in biologische landbouw, 1-2% wateroplosbaar fosfaat, 30-40% fosfaat oplosbaar in citroenzuur) en is de N-bemesting uitsluitend uitgevoerd met dierlijke mest. Er werden twee N-niveaus gecreëerd door de veldjes met oorspronkelijk 300N-overschot door te zaaien met witte klaver.

In 2012 is de locatie Heino (zand) door bezuinigingen gesloten waardoor de proef beëindigd moest worden. In 2013 is de locatie Cranendonck (zand) afgesloten door bouwplannen van de gemeente, hetgeen eveneens beëindiging van de proef betekende. Op locatie Zegveld en Lelystad wordt de proef nog altijd gecontinueerd.

In september 2020 zijn de proefvelden op de Waiboerhoeve opnieuw ingezaaid vanwege de slechte kwaliteit van de grasmat. De herinzaai is uitgevoerd door vernietiging van de oude zode door bespuiting op 21 augustus en 9 september, frezen tot ca. 10 cm diepte op 21 september en inzaai op 22 september. Dit is de eerste maal dat herinzaai van de grasmat plaatsvindt gedurende de looptijd van de proef. De grasmat op het uitmijnveldje heeft geen herinzaai ondergaan, omdat deze grasmat nog in goede staat was.

Meer details van de proefuitvoering en de statistische analyse staan beschreven in eerdere rapportages en wetenschappelijke publicaties (Ehlert et al., 2018; Van Middelkoop et al., 2004, 2007, 2016; Van der Salm, 2009).

Uitmijnen

Vanaf 2002 is er op elke locatie één veldje toegevoegd aan de proef waar geen fosfaatbemesting plaatsvindt. Deze veldjes lagen aansluitend aan of slechts enkele meters van de bestaande beweidde veldjes. Op deze veldjes is alleen met N bemest en gemaaid, runderdrijfmest werd niet toegediend, vee werd niet ingeschaard. In het vervolg van dit rapport wordt dit aangeduid als de uitmijnbehandeling. De toegepaste N-bemesting was gelijk aan die van de 300 kg N-overschotveldjes. Op locatie Heino is klaver doorgezaaid. Meer details worden gegeven door Middelkoop et al. (2007).

De resultaten voor de uitmijnbehandelingen worden in dit rapport summier besproken, omdat deze geen relatie kennen met de onderzoeksvragen van dit rapport.

2.1.1.2 Grondanalyses

De proefvelden zijn jaarlijks bemonsterd in november/december. Monsters zijn genomen van de 0-5 cm-, 5-10 cm-, 10-20 cm- en 20-30 cm-bodemlaag. Om tot een homogeen monster te komen, zijn per veldje veertig submonsters genomen en samengevoegd tot één monster. Alle analyses zijn uitgevoerd op lucht gedroogde (40°C) en over 2 mm gezeefde monsters.

Het P-CaCl₂-getal is gemeten na extractie van grond met een 0,01 M CaCl₂ oplossing (0,1 kg/L) gevolgd door analyse van het filtraat op ortho-P (*Molybdate Reactive P*, colorimetrische bepaling met behulp van *segmented flow analysis* (SFA)). Het P-AL-getal is bepaald na extractie met 0,1 M ammonium lactaat plus 0,4 M azijnzuur, pH 3,75, gevolgd door analyse van de ortho-P concentratie in het extract. P-totaal werd bepaald na destructie met koningswater. Analyses zijn gedurende de gehele looptijd van de proef uitgevoerd door Eurofins Agro te Wageningen (voorheen BLGG AgroXpertus).

De bepaling van het P-CaCl₂-getal is sinds 2004 onderdeel van de reguliere monitoring. Er zijn nadien analyses uitgevoerd op archiefmonsters uit de periode 1996-2004, later is echter in een vergelijkende studie vastgesteld dat analyse van het P-CaCl₂-getal op archiefmonsters van graslandgronden leidt tot artefacten, waardoor dit een forse overschatting geeft van het P-CaCl₂-getal. Deze afwijking is hoger op gronden met een hoog organischestofgehalte. In bouwlandgronden was de analyse van het P-CaCl₂-getal op archiefmonsters wel betrouwbaar.

In 2018 en 2019 is de standaardbemonstering uitgebreid met bemonstering van de 0-10 cm-bodemlaag om aan te sluiten bij de huidige standaardbemonsteringsdiepte voor bepaling van de fosfaattoestand, zoals gebruikelijk voor grondonderzoek t.b.v. bemestingsadvies en ook voor de bepaling van de fosfaattoestand ter vaststelling van de fosfaatgebruiksnorm.

2.1.1.3 Monitoring fosfaat in bodemvocht

Monitoring van het bodemvocht werd uitgevoerd in de periode 1996-2012. In dit rapport zijn de data over de periode 2007-2012 gebruikt. Bodemvocht is tweemaal per jaar bemonsterd in enkelvoud. Bemonstering vond plaats onder natte condities in het winterseizoen door het steken van grondmonsters van de 0-5 cm-, 5-10 cm-, 10-20 cm- en 20-30 cm-bodemlaag. Bodemvocht werd verkregen door de natte grondmonsters in het laboratorium te centrifugeren bij een snelheid van 10.000 rpm in daarvoor bestemde potten die aan de onderzijde zijn afgedicht met een 0.45 µm membraanfilter. Ortho-P werd colorimetrisch bepaald middels en SFA (*segmented flow analyser*).

2.1.2 Additionele bemonstering op praktijklocaties (2019-2021)

Naast de reguliere monitoring van de nog lopende grasproeflocaties is in 2019 gestart met monitoring op twee proefbedrijven op zandgrond. De aanleiding hiertoe was om de hervatte monitoring van fosfaat in bodemvocht ook te kunnen uitvoeren op zandgrond. Hiertoe zijn twee proefboerderijen gekozen en per proefbedrijf zijn drie percelen geselecteerd op basis van de fosfaattoestand, waarbij het uitgangspunt was om percelen met een lage, neutrale en hoge fosfaattoestand te selecteren (Tabel 2.1). Op de proefbedrijven kwamen echter geen percelen voor met een lage fosfaattoestand.

Het management van de aanvullende locaties is in handen van de proefbedrijven. De proefbedrijven registreren de gift aan dierlijke mest. Het bemestingsregiem wordt echter niet opgelegd en de gegevens zijn ontoereikend om de fosfaatbalans te bepalen. De percelen worden niet beweide. De aanvullende locaties zijn daarmee géén volledige vervanging van de eerdere proeflocaties op zandgrond. De uitgevoerde analyses zijn gelijk aan de analyses voor de reguliere monitoring van de veeljarige veldproef. Percelen zijn in duplo bemonsterd. De perceelgrootte varieert tussen 1 en 2 ha.

Tabel 2.1 *Overzicht percelen en bemonstering op de additionele praktijklocaties op zandgrond op proefbedrijven De Marke en Unifarm.*

	P-toestand	Bemonsteringsdiepte	Datum bemonstering ¹
De Marke, Hengelo GLD			
Marke 17-2	Neutraal	0-10, 10-20 en 20-30 cm	02-2019
Marke K3	Hoog	0-10, 10-20 en 20-30 cm	27-11-2019
Marke 3	Hoog	0-10, 10-20 en 20-30 cm	20-01-2021
Unifarm, Wageningen			
Unifarm Dr.15	Neutraal	0-10, 10-20 en 20-30 cm	26-02-2019,
Unifarm Dr.15	Neutraal	0-10, 10-20 en 20-30 cm	13-11-2019
Unifarm F1403 ²	Hoog	0-10, 10-20 en 20-30 cm	20-01-2021

¹ Data voor februari 2019 voor De Marke o.b.v. certificaten aangeleverd door het proefbedrijf (analyses Eurofins Agro).

² Proefveld F1403 kwam te vervallen door ingebruikname voor een veldproef.

2.1.3 Reproduceerbaarheid P-CaCl₂-getal

Reproduceerbaarheid wordt omschreven als 'de mate van overeenstemming tussen de meetresultaten van dezelfde meetgrootte, verkregen onder wisselende meetomstandigheden'. In dit geval is de reproduceerbaarheid bij analyse van het P-CaCl₂-getal bij twee verschillende laboratoria beoordeeld. In 2018 en 2019 zijn alle grondmonsters op P-CaCl₂-getal geanalyseerd bij zowel het Chemisch Biologisch Laboratorium bodem (CBLB) en Eurofins Agro te Wageningen. Grondmonsters zijn door het CBLB voorbereid (drogen/malen/zeven) en de gedroogde gronden zijn daarna voor P-CaCl₂-getal-analyse aangeboden aan CBLB en Eurofins Agro. Aanleiding voor de extra analyse op het P-CaCl₂-getal was dat het CBLB, naast P, ook diverse andere elementen kan bepalen waarvan de resultaten geen onderdeel zijn van dit rapport. De analyse is in twee jaren (2018 en 2019) door beide laboratoria uitgevoerd. In 2019 was er sprake van een verschil in duur van opslag van de gedroogde grondmonsters tot aan analyse. De gedroogde monsters zijn circa twee maanden bewaard tot de start van de analyses bij CBLB en circa vier maanden tot aan analyse bij Eurofins, wat betekent dat de bewaartijd van drie maanden zoals voorgeschreven in het protocol 'Bepaling Pw-getal en P-AL-getal' licht was overschreden. In 2018 was er géén verschil in opslagduur tot aan analyse bij beide laboratoria.

De dataset met de P-CaCl₂-getallen gemeten bij beide laboratoria omvat in totaal 176 analyses van grondmonsters van Waiboerhoeve (2018 en 2019, n:70), Zegveld (2018 en 2019, n: 70), Unifarm en De Marke (2019, n:36) voor alle bemonsteringsdieptes (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 en 0-10 cm). De dataverwerking is beperkt tot grondmonsters met een P-CaCl₂-getal <5,0 mg P/kg om binnen het bereik van de klassegrenzen voor de fosfaatindicator te vallen. Door deze selectie zijn nagenoeg alle grondmonsters van de 0-5 cm-bodemlaag zijn uitgesloten van de vergelijking.

2.1.4 Data-analyse

De grasproef kent drie niveaus voor fosfaat (0, 20 en 40 kg P₂O₅/ha overschot) gecombineerd met twee niveaus voor stikstof (180 en 300 kg N/ha overschot) en iedere combinatie is per locatie uitgevoerd in enkelvoud. In eerdere rapporten zijn data van veldjes met een gelijk fosfaatoverschot, maar een verschillend N-overschot te middelen. Er zijn kleine, maar significante verschillen in grasopbrengst en fosfaatafvoer tussen de behandelingen met 180 en 300 kg N/ha overschot bij een gelijke P-gift. In dit rapport zijn data van individuele veldjes getoond om de temporele variatie in de fosfaatindicatoren beter te duiden. Dit geldt zowel voor de figuren met verloop van fosfaatindicatoren in de tijd als voor de tabellen met verloop van de fosfaatgebruiksnormen in de tijd.

Het beloop van het P-AL-getal en het P-CaCl₂-getal in de bodem is statistisch geanalyseerd met lineaire regressie voor de lagen 0-5 en 5-10 cm op de vier graslandlocaties. Daarbij zijn alleen de beweide en bemeste objecten meegenomen. De niet-beweide uitmijnobjecten wijken in gebruik, aantal en startpunt af van de beweide objecten en kunnen zodoende geen onderdeel uitmaken van dezelfde statistische analyse.

Voor het schatten van de factoren met lineaire regressie is gebruikgemaakt van Restricted Maximum Likelihood (REML) met een fixed en een random deel van een model. Een meer gedetailleerde beschrijving van de methode is beschikbaar in Van der Salm (2017).

Het model voor het P-AL-getal in alle bodemlagen is:

$$\text{P-AL-getal}_{i,j,k} = \text{Constante}_{ik} + \alpha_{1,i} * \text{aantal proefjaren} + \alpha_{2,i} * \text{aantal proefjaren} * \text{fosfaatoverschot} + m_{ijk+il} \quad (1)$$

Waarin:

- Constante: niveau P-AL-getal in laag i op locatie k bij start van de proef;
- α_1 : verandering P-AL-getal per jaar bij evenwichtsbemesting in laag i;
- α_2 : verandering P-AL-getal per jaar onder invloed van fosfaat-overschot in laag i waarbij het fosfaatoverschot is uitgedrukt in kg P₂O₅/ha/jaar;
- m: random deel van het model in laag i, in jaar j, op locatie k, op plot l.

Het model voor het P-CaCl₂-getal in de bodem is:

$$\text{P-CaCl}_2\text{-getal}_{i,j,k} = \text{Constante}_{ik} + \beta_{1,i} * \text{fosfaatoverschot} + \beta_{2,i} * \text{aantal proefjaren} * \text{fosfaatoverschot} + m_{ijk+il} \quad (2)$$

Waarin:

- Constante: niveau P-CaCl₂ -getal in laag i op locatie k bij start van de proef bij fosfaatoverschot 0 bij start van de meting in 2004 van P-CaCl₂;
- β_1 : verandering van P-CaCl₂ onder invloed van een fosfaatoverschot voor start meting in laag i;
- β_2 : verandering P-CaCl₂ per jaar onder invloed van fosfaat-overschot in laag i;
- m: random deel van het model in laag i, in jaar j, op locatie k, op plot l.

Het model voor P-CaCl₂-getal bevat geen parameter voor de trend bij evenwichtsbemesting, omdat deze parameter niet significant is. De term $\beta_{1,i} * \text{fosfaatoverschot}$ geeft de intercept van de lijn bij start van de monitoring in 2004, oftewel de niveaoverschillen in P-CaCl₂-getal ontstaan in 1996-2004 onder invloed van de fosfaattrappen.

Omdat parameter β_2 in bovenstaand model voor P-CaCl₂ slechts in één locatie voor één laagdiepte significant was, is het model eveneens gedraaid zonder deze factor:

$$\text{P-CaCl}_2\text{-getal}_{i,j,k} = \text{Constante} + \beta_{1,i} * \text{fosfaatoverschot} + m_{ijk+il} \quad (3)$$

De twee N-niveaus in de proef zijn impliciet meegenomen in het fosfaatoverschot: een hoger N-niveau zorgt voor een hogere P-afvoer en daarmee een lager fosfaatoverschot. Voor de zekerheid is getoetst of het N-niveau boven op het effect in P-afvoer invloed had op de ontwikkelingen van P-AL-getal en

P-CaCl₂-getal: het N-niveau had geen invloed op het beloop van beide parameters en is daarom niet als factor in de modellen opgenomen.

2.2 Bouwland

Er zijn vier veldproeven gelegen op bouwland die verschillen in opzet. Eén veldproef wordt gecontinueerd in slapende vorm zonder opbrengstbepalingen en wordt daarom in deze rapportage niet meegenomen. De overige drie veldproeven hebben behandelingen die uitsluitend geven over het effect van evenwichtsbemesting en alle veldproeven hebben een bereik in fosfaattoestanden van laag tot hoog. Hun ontwerp verschilt onderling en verder onderscheiden veldproeven zich door aanvullende behandelingen.

Van de drie veldproeven op bouwland zijn twee proeven op kalkrijke zavelgrond aangelegd en één op kalkloze dekzandgrond. De volgende aanduidingen worden gebruikt om de drie veldproeven te onderscheiden:

1. Fosfaattoestanden veldproef P1801 op kalkrijke zavelgrond te Lelystad;
2. Fosfaathoeveelheden veldproef IB0013 op kalkrijke zavelgrond te Marknesse;
3. Hoeveelheden veldproef IB1920 op kalkloze dekzand te Wijster.

Tabel 2.2 Beknopt overzicht proefopzet op de vier bouwlandproeven en monitoringsprogramma van de bodem (details, zie tekst).

Locatie	Proefopzet	Omschrijving	Monitoringsprogramma bodem
1. Lelystad (P1801)	Toestandenproef	Vier oplopende fosfaatniveaus in de bodem (fosfaattoestand laag tot hoog), gecombineerd met vier fosfaatgiften (0, 70, 140 en 280 kg P ₂ O ₅ /jaar). Bemesting met tripelsuperfosfaat, uitvoering in vier herhalingen. Vanaf 2005 zijn bij de drie hogere toestanden ook uitmijningsobjecten opgenomen, waarbij geen fosfaat meer wordt gegeven. Bij de lage toestand is naast 0 kg P ₂ O ₅ per ha een object opgenomen waarbij jaarlijks 70 kg P ₂ O ₅ per ha wordt gegeven.	Jaarlijks bemonstering van bodemlagen 0-30 cm en 30-60 cm. Vanaf 1990 zijn Pw-getal, P-Al-getal en P-totaal gemeten. P-CaCl ₂ -getal is vanaf 2004 gemeten.
2. Marknesse (IB0013)	Hoeveelhedenproef	1. Bemesting (superfosfaat) met fosfaattrappen van 0, 80, 160 en 250 kg P ₂ O ₅ /ha sinds 1971 met vier herhalingen. Door de grote bemestingsverschillen is een breed bereik in fosfaattoestanden ontstaan. 2. Bemesting (superfosfaat) op basis van strikte fosfaatevenwichtsbemesting, tweemaal die hoeveelheid en driemaal die hoeveelheid. Strikte evenwichtsbemesting betekent dat de aanvoer gelijk is aan de afvoer in het voorgaande jaar. Uitvoering sinds 1990 bij één fosfaattoestand en met vier herhalingen.	Jaarlijks bemonstering van bodemlaag 0-25 cm op Pw-getal (vanaf 1972). P-Al-getal vanaf 2003, P-CaCl ₂ -getal vanaf 2008.
3. Wijster (IB1920)	Hoeveelhedenproef	Bemesting met diverse minerale fosfaatmeststoffen (o.a. superfosfaat, slakkenmeel, Thomaskali en Hyperphoskali) met diverse doseringen (0 tot 240 kg P ₂ O ₅ /ha) sinds 1972. Slapende proef in de periode 1998-2006 (geen opbrengstbepaling en gewasonderzoek, in 1996-2001 geen grondonderzoek). Door de grote bemestingsverschillen is een breed bereik in fosfaattoestanden ontstaan.	Jaarlijks bemonstering van bodemlaag 0-25 cm op Pw-getal (vanaf 1972). P-Al-getal vanaf 2003, P-CaCl ₂ -getal vanaf 2008.

2.2.1 Fosfaattoestandenproef Lelystad

Sinds 1990 loopt op een jonge zeekleigrond te Lelystad een veldproef waarin het effect wordt onderzocht van de fosfaattoestand van de bodem op de gewasopbrengsten en van verschillende fosfaatbemestingsniveaus op de fosfaattoestand van de bodem en het fosfaatoverschot. In de periode 1987-1990 zijn door verschillende fosfaatgiften met tripelsuperfosfaat vier in niveau oplopende fosfaattoestanden ontstaan: P1, P2, P3 en P4 genoemd. Die toestanden kregen tot 2005 elk de volgende fosfaatgift: 0, 70, 140 en 280 kg P₂O₅/ha. In 2005 is de proefopzet gewijzigd. De veldjes zijn gesplitst: de ene helft van elk veldje ontvangt een bemesting van 70 (P1, P2), 140 (P3) of 280 (P4) kg P₂O₅ per ha, terwijl op de andere helft geen fosfaat meer wordt toegediend (uitmijnen). De combinatie van uitmijnen versus bemesten bij vier initiële fosfaattoestanden geeft een proef met acht behandelingen. De proef wordt uitgevoerd in vier herhalingen.

Op het proefveld wordt een gangbare rotatie van akkerbouwgewassen geteeld. In de rotatie komen in gewassen voor uit alle vier de naar fosfaatbehoefte ingedeelde gewasgroepen voor de akkerbouw (groepen 1 t/m 4) die worden onderscheiden in het *Handboek Bodem en Bemesting* (voorheen de *Adviesbasis Bemesting*).⁷

2.2.2 Fosfaathoeveelhedenproef Marknesse

Op IB0013 Marknesse zijn op dit moment twee type bemestingsproeven actief:

1. bemesting met fosfaattrappen van 0, 80, 160 en 240 kg P₂O₅/ha en;
2. strikte evenwichtsbemesting.

Door de jaren heen is een bereik in fosfaattoestanden ontstaan. Initieel was de fosfaattoestand laag. In 2016 was het bereik in fosfaattoestanden laag tot neutraal (Pw-getal) of bleef neutraal (P-AL-getal).

Op basis van de historie van de veldproeflocatie wordt de totstandkoming van deze twee proefopzetten verder toegelicht. De veldproef IB0013 is in het najaar van 1971 aangelegd. Het doel daarbij was om de effectiviteit van veeljarige toediening van superfosfaat en Rhenania-fosfaat (een gloeifosfaat⁸) bij bemesting op de wintervoor te toetsen. De meststofgiften zijn steeds 80, 160 en 240 kg P₂O₅/ha gegeven in vier herhalingen. Daarnaast is een onbemeste behandeling aanwezig met acht herhalingen. De veldproef omvat daardoor 32 veldjes. In 1973, 1974 en 1975 zijn de fosfaattrappen opgesplitst naar bemestingstijdstippen herfst en winter, waardoor deze behandelingen in tweevoud aanwezig waren. Daardoor werd een nevendoeel toegevoegd en wel toetsing van het tijdstip van bemesting op opbrengst en kwaliteit. Na 1975 werd deze doelstelling verlaten en sindsdien is jaarlijks alleen in de winter bemest. Na 1986 zijn de behandelingen met Rhenania-fosfaat op nawerking gelegd, omdat deze meststof uit productie werd genomen. Na vier jaar zonder enige vorm van bemesting zijn de veldjes wederom in gebruik genomen voor een fosfaatproef op basis van evenwichtsbemesting. De behandelingen met strikte evenwichtsbemesting zijn opgelegd na loting. Vier veldjes ontvangen de hoeveelheid fosfaat die met de oogst van het voorafgaande jaar met het gewas is afgevoerd (M), vier andere ontvangen jaarlijks de dubbele hoeveelheid (2M) en de overige vier veldjes een drievoudige hoeveelheid (3M). Door de loting en door vier voorafgaande jaren zonder enige vorm van fosfaatbemesting, startten M, 2M en 3M alle met gemiddeld eenzelfde fosfaattoestand. De doelstelling van deze wijziging is om na te gaan wat de veeljarige effecten zijn van strikte evenwichtsbemesting op opbrengst en kwaliteit van het gewas en op de omzetting en verplaatsing van fosfaat in de bouwvoor en daaronder gelegen bodemlagen. Andere nutriënten worden toegediend conform vigerende bemestingsadviezen. De proef met toediening van superfosfaat is al die tijd ongewijzigd voortgezet, waardoor er nu twee verschillende proefopzetten zijn: bemesting met jaarlijks constante fosfaattrappen en strikte evenwichtsbemesting waarbij de fosfaatgift jaarlijks varieert, afhankelijk van de fosfaatafvoer met de voorvrucht. De opzet van de proef berust op een orthogonale gewarde blokkenproef. Achtergrondinformatie wordt gegeven door Ehlert et al. (2003).

⁷ <http://www.handboekbodemenbemesting.nl/nl/handboekbodemenbemesting/Handeling/Bemesting/Fosfaat/Gewasgericht-advies/Gewasgericht-advies-voor-volvelds-fosfaatbemesting-op-basis-van-Pw.htm>.

⁸ In 1983 werd de productie van Rhenania-fosfaat gestaakt. Herwonnen fosfaten gebaseerd op as van zuiveringsslib hebben de belangstelling voor deze thermische fosfaat hernieuwd.

2.2.3 Fosfaathoeveelhedenproef Wijster

De veldproef IB1920 is in 1972 aangelegd. De toen aangelegde behandelingen zijn sedertdien ongewijzigd gebleven, tenzij een bemestingsproduct verviel omdat het uit productie werd genomen. Op deze veldproef worden verschillende fosfaatmeststoffen getoetst. De meststoffen zijn superfosfaat, slakkenmeel, Thomaskali (een gekorrelde slakkenmeel met K60 (60% K_2O afkomstig van KCl)), Rhenania-fosfaat (gloeifosfaat) en Hyperphoskali (ook wel Hyperfoskali), een zacht natuurfosfaat afkomstig van Gafsa-fosfaat. Deze meststoffen worden onderzocht op hun fosfaatwerking. Al deze meststoffen worden in de herfst gegeven met giften van 90 of 180 kg P_2O_5/ha . Superfosfaat en Rhenania-fosfaat zijn ook in het voorjaar toegediend met 45, 90, 180 of 240 kg P_2O_5/ha (superfosfaat) of 90 en 180 kg P_2O_5/ha (Rhenania-fosfaat). Daarnaast is een onbemeste behandeling aanwezig. Het aantal herhalingen was 3 voor behandelingen met fosfaatbemesting en 6 voor de behandeling zonder fosfaatbemesting. Vanaf 1988 was Rhenania-fosfaat niet meer beschikbaar en de desbetreffende veldjes zijn sindsdien niet meer met fosfaat bemest (nawerking of uitmijnen). Vanaf 2012 zijn behandelingen met slakkenmeel omgezet naar bemesting met superfosfaat (60 of 75 kg P_2O_5/ha).⁹ In 2000 is langs het perceel van de veldproef een afvoerkanaal gegraven waardoor één herhaling kwam te vervallen. Sindsdien is het aantal herhalingen 2 bij bemeste objecten en 4 bij het onbemeste object. De behandelingen passen binnen een gewarde blokkenproef.

Deze proef heeft tijdelijk een slapende vorm gekend, d.w.z. geen opbrengstbepalingen gehad in de periode 1998-2006. De bemestingen werden wel uitgevoerd en ook het grondonderzoek, maar geen opbrengstbepalingen met daaraan verbonden chemisch gewasonderzoek.

Bij aanleg had de veldproef een fosfaattoestand laag (Pw-getal, P-AL-getal). In 2016 was er een bereik ontstaat van laag naar neutraal (Pw-getal) en van laag naar hoog (P-ALI-getal).

2.2.4 Data-analyse

De bouwlandproeven zijn aangelegd in meerdere herhalingen. In de figuren is het verloop in de fosfaatindicatoren getoond als het gemiddelde van de herhalingen waarbij de spreiding tussen de herhalingen is weergegeven door opname van foutenbalkjes die de standaardfout aangeven. Figuren zijn gemaakt in Genstat. In de tabellen met het verloop van de fosfaattoestand zijn de data per uniek perceel weergegeven om zo ook de temporele variatie bij enkelvoudige analyse te tonen. Voor gewasopbrengsten zijn gemiddelden van de relatieve opbrengsten t.o.v. een gegeven referentie (evenwichtsbemesting of hoogste fosfaatgift) en standaardfout per gewasgroep opgenomen. Verdere statistische analyse van de gegevens zijn geen onderdeel van dit rapport.

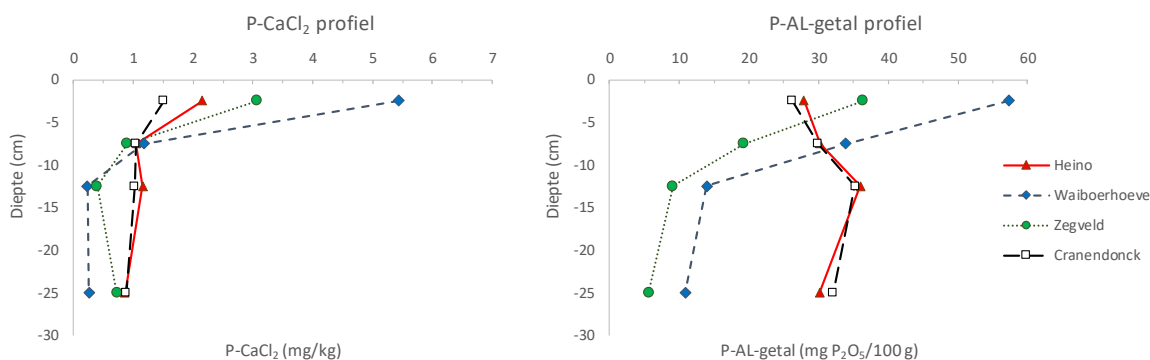
⁹ In dit syntheserapport ontbreekt een bespreking van de resultaten. Deze effecten van deze behandelingen zijn over vier jaar gemeten en kunnen nog niet geplaatst worden onder de effecten van veeljarige veldproeven.

3 Gecombineerde indicator & grasland

3.1 Effect van bemonsteringsdiepte

De fosfaattoestand in de bodem is jaarlijks bepaald voor de bodemlagen 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm en 20-30 cm. De bemonsteringsdiepte wijkt daarmee af van de huidige reguliere bemonsteringsdiepte (0-10 cm) voor bodemvruchtbaarheidsonderzoek. Bij aanvang van de veeljarige veldproef was 0-5 cm de reguliere bemonsteringsdiepte en omwille van continuïteit is dit gehandhaafd. Wijzigingen in de fosfaattoestand komen daarenboven sneller tot expressie in een laag van 0-5 cm dan in een laag van 0-10 cm. Om data van de veeljarige veldproef te gebruiken voor afleiding van de fosfaattoestand, is inzicht nodig in het effect van de bemonsteringsdiepte op de hoogte van de fosfaatindicatoren.

Figuur 3.1 toont de diepteprofielen voor de vier grasproeflocaties. Op veen en klei is er sprake van grote verschillen in zowel het P-CaCl₂-getal als het P-AL-getal tussen de 0-5 cm- en 5-10 cm-bodemlaag. Op zandgronden is fosfaat homogener verdeeld en dit komt omdat deze locaties al voor de aanleg van de veldproef een kerende grondbewerking hebben ondergaan. De sterke gelaagdheid op Zegveld (veen) en Waiboerhoeve (zeeklei) is het gevolg van het niet uitvoeren van een grondkerende bewerking tijdens en in de decennia voor aanvang van de proef. Fosfaatbemesting werd wel uitgevoerd (oppervlakkig geïnjecteerd (mest) of breedwerpig gestrooid (kunstmest)), waardoor fosfaat accumuleert in de bovenste laag van de grond. Op de veeljarige grasproeflocaties is sinds de aanvang (1996) geen kerende grondbewerking uitgevoerd, omdat de graszode in goede staat blijft. In de praktijk wordt graszodevernieuwing, met name op zandgrond, met enige regelmaat uitgevoerd (5-7 jaar), al zijn er grote verschillen in de frequentie waarmee agrariërs de graszode van permanent grasland vernieuwen. Op veen en kleigrond wordt een kerende grondbewerking minder vaak toegepast, omdat op deze grondsoorten de afhankelijkheid van het weer groter is voor een goede uitvoering van een grondkerende bewerking.



Figuur 3.1 Diepteprofielen van P-CaCl₂-getal (mg P/kg) en P-AL-getal (mg P₂O₅/100 g) op de vier proeflocaties van de veeljarige graslandproef. Gemiddelde gehalten voor de behandeling met evenwichtsbemesting (P₀) over de periode 2010-2013.

In 2018 is in het kader van additioneel onderzoek de 0-10 cm-bodemlaag toegevoegd aan de reguliere bemonstering, waardoor voor de twee nog lopende proefveldlocaties beoordeeld kan worden of het P-CaCl₂-getal en P-AL-getal in de 0-10 cm-bodemlaag geschat kunnen worden vanuit data voor de 0-5 cm- of 5-10 cm-laag (Tabel 3.1). Zowel het P-AL-getal als het P-CaCl₂-getal in de 0-10 cm-bodemlaag is lager dan bij bepaling in de 0-5 cm-bodemlaag. Voor het P-AL-getal is het rekenkundig gemiddelde van de 0-5 cm en 5-10 cm een goede schatter van het P-AL-getal in de 0-10 cm-bodemlaag. Voor het P-CaCl₂-getal echter geeft het rekenkundig gemiddelde een overschatting van het P-CaCl₂-getal bepaald in een grondmonster van de 0-10 cm-bodemlaag. Dit komt omdat het

P-CaCl₂-getal de resultante is van adsorptie-/desorptieprocessen, waardoor fosfaat zich tijdens de extractie kan herverdelen over bodemdeeltjes. Zodoende is het niet mogelijk om het P-CaCl₂-getal in het 0-10 cm-bodemmonster betrouwbaar te schatten vanuit data verkregen voor monsters uit de 0-5 cm- en 5-10 cm-bodemlaag.

Verderop in dit rapport wordt een analyse gemaakt van het verloop in de fosfaatgebruiksnormen. Omdat langetermijndata voor de 0-10 cm-bodemlaag ontbreken, is de keuze gemaakt om hiervoor de data van de 5-10 cm-bodemlaag te analyseren. Dit had de voorkeur boven de 0-5 cm-laag, die zeer hoge P-gehalten kent waardoor de fosfaatgebruiksnorm veelal in klasse hoog wordt aangemerkt en de temporele variatie in fosfaatgebruiksnorm zodoende niet gevolgd kan worden. Voor de twee zandlocaties is het gevolg van de keuze van de bemonsteringsdiepte beperkt door de uniforme verdeling van fosfaat in de bovengrond. Op de veen- en kleigrond is de keuze wel van invloed op de afleiding van de fosfaatgebruiksnorm. Aanvullend zijn ook data opgenomen over het verloop van de fosfaatgebruiksnorm in de 0-10 cm-bodemlaag op proefvelden op veen en klei echter, dit beslaat slechts drie meetjaren.

Tabel 3.1 Het P-CaCl₂-getal en P-AL-getal in grondmonsters van de 0-5 cm-, 5-10 cm- en 0-10 cm-bodemlaag. Kolom (0-10)* geeft het rekenkundig gemiddelde van de 0-5 cm- en 5-10 cm-bodemlaag.

Behandeling	P-CaCl ₂ -getal (mg P/kg)				P-AL-getal (mg P ₂ O ₅ /100 g)			
	0-5 cm	5-10 cm	0-10 cm	(0-10)*	0-5 cm	5-10 cm	0-10 cm	(0-10)*
Waiboerhoeve (klei)								
P (uitmijnen)	0,7	0,2	0,4	0,5	17	13	15	15
P0	10,1	2,3	3,4	6,2	69	42	46	56
P20	11,4	2,0	4,2	6,7	83	49	61	66
P40	14,4	3,8	5,7	9,1	94	63	74	79
Zegveld (veen)								
P (uitmijnen)	1,4	0,4	1,3	0,9	12	7	14	9
P0	4,7	1,0	1,9	2,8	41	16	26	28
P20	4,5	1,2	2,6	2,8	46	26	39	36
P40	6,4	1,9	3,3	4,2	73	38	47	55

¹ Gemiddeld over de N180 en N300 behandeling en over twee bemonsteringsjaren (2018, 2019).

3.2 Veeljarige monitoring fosfaatindicatoren

3.2.1 P-AL-getal

Figuur 3.2 toont het verloop in het P-AL-getal in de 5-10 cm-laag op de grasproeflocaties bij uitmijnen, evenwichtsbemesting en een overschot van 20 of 40 kg P₂O₅ ha⁻¹. De fosfaatbehandelingen zijn gecombineerd met twee stikstofbehandelingen (180 en 300 kg N/ha overschot); echter, omwille van de leesbaarheid van de figuren zijn alleen de data voor de behandelingen met een stikstofoverschot van 300 kg N/ha/jaar getoond. Ieder datapunt betreft één individuele analyse. In Bijlage 1 zijn figuren opgenomen waarin tevens het verloop in het P-AL-getal op de veldjes met een stikstofoverschot van 180 kg N/ha is getoond (Figuur B1). Bijlage 1 bevat tevens figuren met het verloop in het P-AL-getal in de 0-5 cm-bodemlaag (Figuur B2).

De data zijn statistisch geanalyseerd om trends bij evenwichtsbemesting en hogere fosfaatgiften af te leiden (Tabel 3.2), waarbij α_1 en α_2 parameters zijn van het lineaire regressiemodel volgens vergelijking 1 (paragraaf 2.1.4). Significante parameters zijn vetgedrukt en uitkomsten zijn gegeven voor de 0-5 cm- en 5-10 cm-bodemlaag. De parameters α_1 en α_2 duiden respectievelijk de verandering in de fosfaatindicator bij evenwichtsbemesting (α_1 * jaar) en bij overschotbemesting (α_2 * jaar * P₂O₅ overschot), waarbij het fosfaatoverschot is uitgedrukt als kg P₂O₅/ha/jaar. De gevonden trends zijn in overeenstemming met eerdere analyses welke zijn opgenomen in eerdere publicaties (Van der Salm et al., 2017; Middelkoop et al., 2016). Het model houdt rekening met de temporele variaties in de fosfaatindicatoren.

Temporele variatie

De mate van temporele variatie in het P-AL-getal verschilt tussen de grondsoorten. Op zandgronden Cranendonck en Heino is de mate van temporele variatie aanzienlijk lager dan op Waiboerhoeve (klei) en Zegveld (veen). Op de zandgronden komen geen situaties voor waarbij het P-AL-getal meer dan één fosfaatklasse verschuift t.o.v. het voorgaande jaar. Op klei en veen verschuift het P-AL-getal met regelmaat één of meerdere klassen ten opzichte van het voorgaande jaar zonder dat er sprake is van een structurele trend richting een andere fosfaatklasse. Op veen en klei toont de tijdreeks een aantal jaren waarin het P-AL-getal binnen één locatie op meerdere veldjes gelijktijdig een sterke afwijking vertoont t.o.v. de voor- en navolgende jaren. Zo toont het P-AL-getal in Zegveld in 2002 een sterke daling en in 2009 een sterke stijging op alle veldjes met onderscheidenlijke behandelingen. Ook op Waiboerhoeve is in enkele jaren sprake van een gelijktijdige stijging of daling in het P-AL-getal op velden met verschillende behandelingen. Dit kan duiden op de invloed van weerseffecten op de hoogte van het P-AL-getal of op afwijkingen in de analyse van het P-AL-getal. Bij de uitmijnbehandelingen is het verloop van het P-AL-getal in de tijd stabiel in vergelijking met de evenwichts- en overschotbehandelingen.

Op de proefveldlocatie van de Waiboerhoeve is in september 2020 een herinzaai en een oppervlakkige grondbewerking (10 cm) uitgevoerd. Waarschijnlijk verklaart dit de daling in het P-AL-getal bij alle fosfaatgiften bij de monitoring in november 2020. Continuering van de metingen is nodig om vast te stellen of dit effect inderdaad een gevolg is van de grondbewerking en herinzaai en om tevens gevolgen voor andere parameters (organische stof etc.) vast te stellen.

Trends bij evenwichtsbemesting

Statistische analyse wijst uit dat er op Heino sprake is van een daling in het P-AL-getal bij evenwichtsbemesting in de 0-5 cm-laag (significant) en de 5-10 cm-laag (niet-significant) (Tabel 3.2). De daling in het P-AL-getal op Heino is eerder verklaard door een herverdeling van fosfaat over verschillende fosfaatvormen, waarbij het P-AL-getal daalt en organisch fosfaat stijgt (Ehlert et al., 2018). De proefvelden hebben sinds de start in 1996 geen grondkerende bewerking meer ondergaan en bij een grondkerende bewerking is de verwachting dat een deel van dit organisch fosfaat weer beschikbaar komt door een verhoogde mineralisatie. Op Cranendonck is sprake van een dalende trend in het P-AL-getal bij evenwichtsbemesting, echter dit effect is niet statistisch significant. De daling in het P-AL-getal komt tot uiting op het veldje met een stikstofoverschot van 180 kg N/ha (Bijlage 1, Figuur B1), maar niet op het veldje met een stikstofoverschot van 300 kg N/ha. Omdat de proef geen echte herhalingen kent (per fosfaatgift zijn er twee behandelingen met een onderscheidenlijke stikstofgift), is het niet mogelijk om te achterhalen of dit verschil veroorzaakt wordt door het verschil in stikstofgift (hogere gewasonttrekking bij hogere stikstofgift) of dat er een andere oorzaak aan ten grondslag ligt.

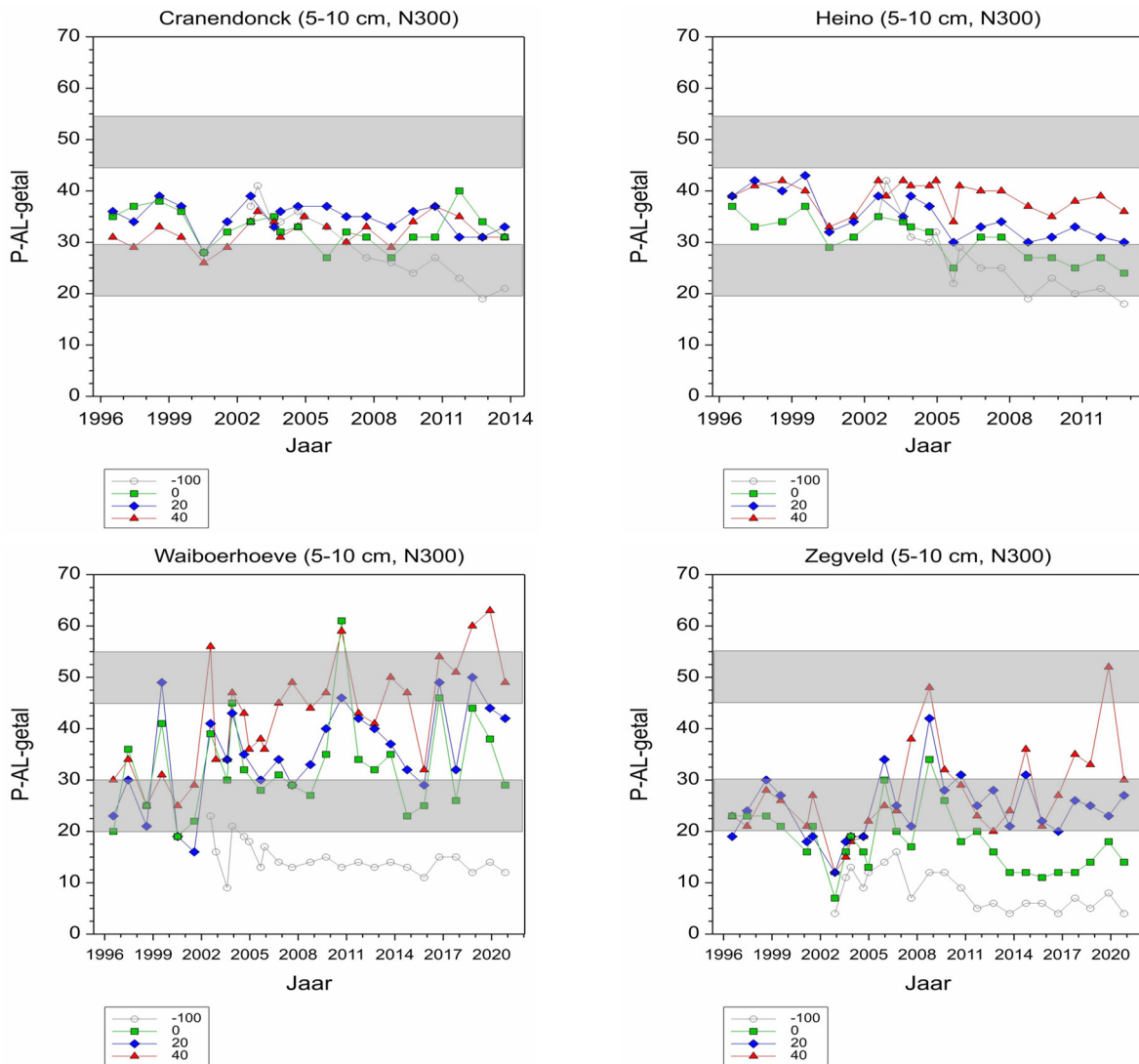
Op Waiboerhoeve stijgt het P-AL-getal in de 0-5 cm- (niet significant) en 5-10 cm-laag (significant) bij evenwichtsbemesting. Een dergelijke toename in het P-AL-getal bij evenwichtsbemesting op jonge zeelegronden is ook in andere proeven geconstateerd (Schils & Snijders, 2004) en verwacht wordt dat deze trend te verklaren is door bodemverwerking en bodemvorming, waardoor de beschikbaarheid van fosfaat toeneemt.

Veranderingen in het P-AL-getal bij fosfaatgiften boven de gewasonttrekking

Het P-AL-getal reageert op verschillen in de hoogte van de fosfaatgift en dit effect is op alle locaties statistisch significant (parameter α_2 , Tabel 3.2). De snelheden waarmee het P-AL-getal reageert op de hoogte van de fosfaatgift is zeer laag. Bij een fosfaatgift van 20 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking duurt het tien jaar om het P-AL-getal in de 0-5 cm-bodemlaag met 2,8 tot 5 eenheden te verhogen *ten opzichte van* het P-AL-getal bij evenwichtsbemesting. Een langere tijdsduur is nodig om het P-AL-getal ook in de 5-10 cm-laag te verhogen. Op klei- en veengrond reageert het P-AL-getal sneller op de hoogte van de fosfaatgift dan op zandgrond. De snelheid waarmee het P-AL-getal reageert op een fosfaatgift boven de gewasonttrekking is – binnen het bereik van fosfaatgebruiksnormen – vanuit landbouwkundig oogpunt zeer laag. Met name op klei- en veengrond is de mate van temporele variatie in het P-AL-getal hoog ten opzichte van de trends die optreden ten gevolge van verschillen in de hoogte van de fosfaatgift. De figuren illustreren dit. Effecten van de fosfaatgiften mogen dan wel statistisch significant zijn, maar het P-AL-getal bij

evenwichtsbemesting kan evenwel hoger zijn dan het P-AL-getal bij een overschot van 20 kg P₂O₅ in een aanliggend jaar. Een verschil in de hoogte van de fosfaatgift moet langdurig gecontinueerd worden om een meetbaar en praktijkrelevant effect te bewerkstelligen.

Uitmijnen, waarbij fosfaatbemesting wordt onthouden, leidt op Cranendonck en Heino tot een snelle daling van het P-AL-getal. Op Waiboerhoeve en Zegveld was het P-AL-getal reeds bij start van de monitoring van deze veldjes laag, hetgeen duidt op een verschil in bemestingshistorie ten opzichte van het deel van de proef met evenwichtsbemesting.



Figuur 3.2 Verloop in P-AL-getal (mg P₂O₅ 100 g⁻¹ grond) in de 5-10 cm-bodemlaag in de grasproef bij uitmijnen (-100), evenwichtsbemesting (0) en een overschot van 20 of 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ bij een stikstofoverschot van 300 kg N ha⁻¹ (20, 40). Er zijn geen herhalingen, ieder datapunt is één meting. De grijze arcering geeft de grenzen van de P-AL-classes bij de gecombineerde indicator (indeling 2021).

Tabel 3.2 Beloop in P-AL-getal, parameter schatting lineaire regressie in de laag 0-5 en 5-10 cm vanaf 1996.^{1,2}

Locatie	Laag: 0-5 cm			Laag: 5-10 cm		
	constante	$\alpha 1$	$\alpha 2$	constante	$\alpha 1$	$\alpha 2$
Heino	42.8	-0.90	0.016	38.4	-0.50	0.011
Cranendonck	35.9	-0.43	0.014	33.7	-0.34	0.009
Waiboerhoeve	59.9	0.47	0.027	26.8	0.71	0.017
Zegveld	42.4	-0.14	0.025	21.8	-0.24	0.013
Least Significant Differences						
Locatie	constante	$\alpha 1$	$\alpha 2$	constante	$\alpha 1$	$\alpha 2$
Heino	8.1	0.81	0.006	6.9	0.68	0.006
Cranendonck	7.9	0.76	0.004	6.7	0.64	0.004
Waiboerhoeve	7.3	0.54	0.006	6.3	0.46	0.006
Zegveld	7.8	0.58	0.005	6.7	0.49	0.005

¹ De parameters $\alpha 1$ en $\alpha 2$ duiden respectievelijk de verandering in de fosfaatindicator bij evenwichtsbemesting (P0) ($\alpha 1$ * jaar) en ten gevolge van een fosfaatgift hoger dan de gewasafvoer ($\alpha 2$ * jaar * P₂O₅ overschot (P20, P40), waarbij het fosfaatoverschot is uitgedrukt als kg P₂O₅/ha/jaar. Data-analyse over de periode 1996 t/m 2012/2013 (Heino, Cranendonck) of 2019 (Zegveld, Waiboerhoeve).

² Least significant difference: kleinste betrouwbaar verschil ($P \leq 0.05$). Een parameter is significant wanneer deze groter is dan de LSD.

3.2.2 P-CaCl₂-getal

Op de veeljarige grasproeven wordt sinds 2004 het P-CaCl₂-getal jaarlijks gemeten. Het verloop van het P-CaCl₂-getal op de vier locaties is getoond in Figuur 3.3 voor de 5-10 cm-bodemlaag voor veldjes waarbij de fosfaatgift gelijk is aan of 20 of 40 kg P₂O₅ hoger is dan de gewasonttrekking. Data zijn getoond voor de veldjes waarbij het stikstofoverschot 300 kg N/ha/jaar bedraagt. Ieder datapunt is één analyse (n:1). Data voor de veldjes met gelijke fosfaatgiften, maar met een stikstofoverschot van 180 kg N/ha zijn opgenomen in Bijlage 1 (Figuur B3). Het verloop van het P-CaCl₂-getal in de 0-5 cm-bodemlaag is opgenomen in Bijlage (Figuur B4).

Trends in de data zijn statistisch geanalyseerd en parameters van het lineaire regressiemodel voor het P-CaCl₂-getal in de laag 0-5 en 5-10 cm zijn weergegeven in Tabel 3.3. Het regressiemodel (vergelijking 2) is gefit op data vanaf 2004. De parameter $\beta 1$ is een maat voor het effect van het fosfaatoverschot op het niveau van het P-CaCl₂-getal in 2004 (m.a.w.: de verschillen in P-CaCl₂-getal ontstaan in de periode 1996-2004 onder invloed van de verschillen in fosfaatgift). De parameter $\beta 1$ geeft het bemestingseffect onder invloed van de fosfaatgift vanaf 2004. In Tabel 3.4 is het kleinste betrouwbare verschil van het regressiemodel opgenomen. Significante parameters zijn vetgedrukt.

Temporele variatie

Gemiddeld is het P-CaCl₂-getal hoger op percelen met een hogere fosfaatgift ten opzichte van evenwichtsbemesting echter, er is sprake van grote fluctuaties in de tijd en er komen tevens jaren voor waarin geen verschillen zijn in het P-CaCl₂-getal voor veldjes met een onderscheidenlijke fosfaatgift. Dit geldt zowel voor de metingen in de 0-5 cm- als in de 5-10 cm-bodemlaag.

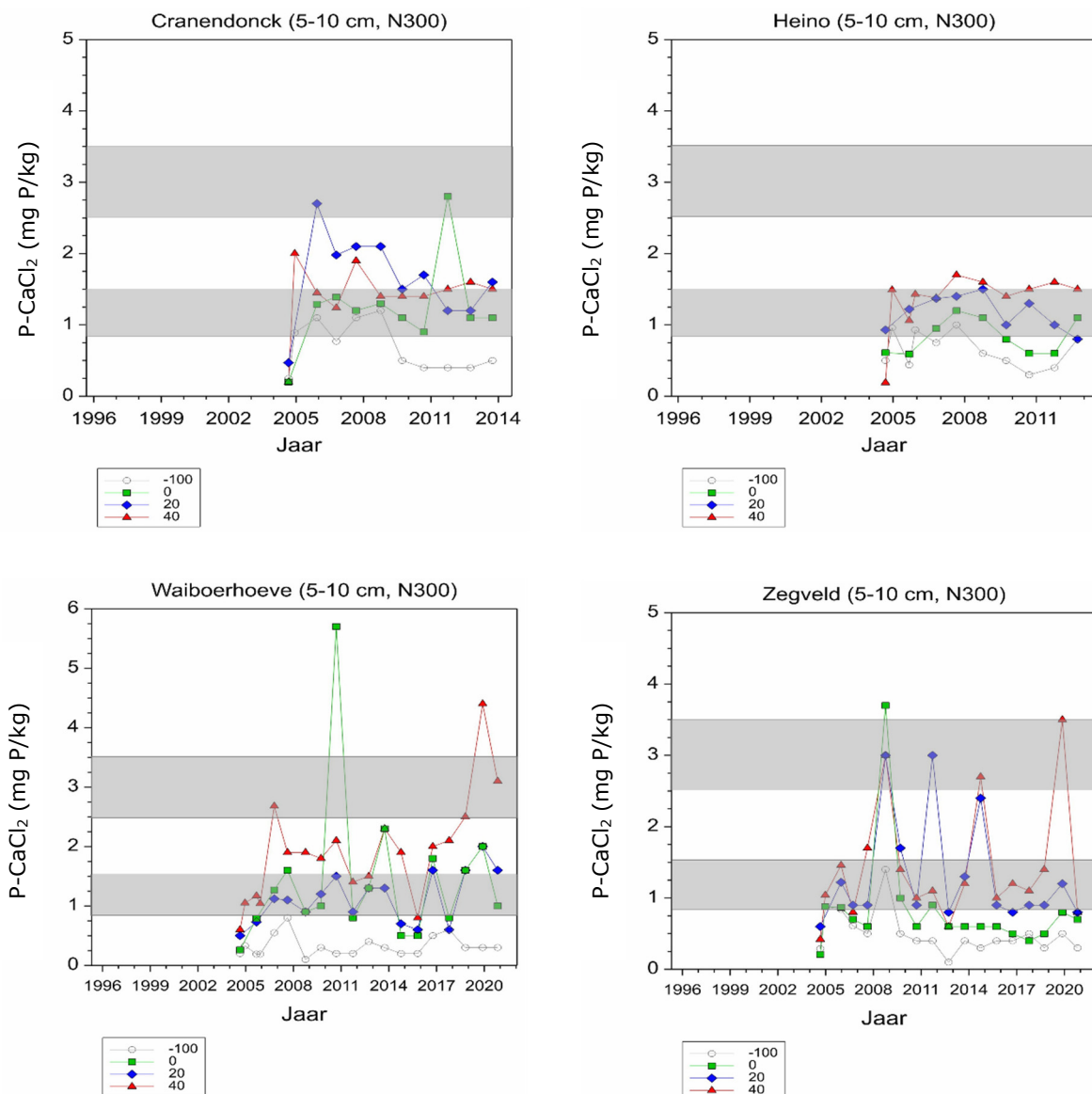
Met name op veen- en kleigrond is sprake van een grote mate van temporele fluctuatie in het P-CaCl₂-getal zonder dat daarbij sprake is van een trend. Hierbij kan het P-CaCl₂-getal één of twee klassegrenzen verspringen t.o.v. het voorafgaande jaar. Op de zandgrondlocaties is het verloop in P-CaCl₂-getal stabiel; echter ook hier is incidenteel sprake van uitschieters. Zo worden voor het jaar 2004, de start van de monitoring, op alle locaties opvallend lage P-CaCl₂-getallen gevonden waarvoor geen oorzaak is te duiden. Bij lage P-CaCl₂-getallen, zoals in de uitmijnplotjes die geen fosfaat ontvangen, is de temporele variatie aanzienlijk lager, wat vanuit bodemchemisch oogpunt verklaard kan worden door een hogere mate van buffering van het vrije orthofosfaat bij lage waarden.

Trends bij evenwichtsbemesting en een fosfaatgift boven de gewasonttrekking

Trends in de data zijn voor het P-CaCl₂-getal in de laag 0-5 cm en 5-10 cm statistisch geanalyseerd en parameters van het lineaire regressiemodel zijn weergegeven in Tabel 3.3. Statistische analyse volgens het tijdsafhankelijke model (vergelijking 2) geeft geen significante parameters, hetgeen wil

zeggen dat de P-CaCl₂-getallen sinds de start van de monitoring in 2004 niet uiteenlopen (modeluitkomsten niet opgenomen). Wanneer het tijdseffect uit het statistische model wordt weggelaten (vergelijking 3), en daarmee louter wordt getoetst of het P-CaCl₂-getal in de gehele meetperiode gemiddeld gezien een relatie toont met het niveau van de fosfaatgift, blijkt dat het P-CaCl₂-getal in de 0-5 cm-laag op alle locaties (m.u.v. Cranendonck) significant hoger is bij objecten met een hogere fosfaatgift. Er wordt geconcludeerd dat het P-CaCl₂-getal *gemiddeld* in de periode na 2004 significant beïnvloed werd door de opgelegde fosfaatgiften op alle locaties (m.u.v. Heino). In de periode ná 2004 (monitoring) treden echter *geen veranderingen* op in het P-CaCl₂-getal onder invloed van de hoogte van de fosfaatgift. Dit geldt echter alleen voor de 0-5 cm-bodemlaag. In de 5-10 cm-bodemlaag is er geen significant verschil in het P-CaCl₂-getal onder invloed van de hoogte van de fosfaatgift. De monitoringsperiode, die varieert van 10 en 11 jaar op Heino en Cranendonck tot 16 jaar op Zegveld en Waiboerhoeve, is daarmee te kort om vast te stellen met welke snelheid het P-CaCl₂-getal verandert onder invloed van de hoogte van de fosfaatgift.

De uitmijnveldjes zijn geen onderdeel van de statistische analyse, omdat deze behandeling later is gestart en een afwijkende uitvoering kent. Het uitmijnen heeft wel geresulteerd in lagere P-CaCl₂-getallen ten opzichte van de percelen die een fosfaatgift ontvangen.



Figuur 3.3 Verloop van het P-CaCl₂-getal (mg P/kg grond) in de 5-10 cm-bodemlaag op de grasproef bij uitmijnen (-100), evenwichtsbemesting (0) en een overschot van 20 of 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ (20, 40) bij een stikstofoverschot van 300 kg N ha⁻¹. Er zijn geen herhalingen, ieder datapunt is één meting. De grijze arcering geeft de klassegrenzen voor het P-CaCl₂-getal (fosfaatgebruiksnormen 2021).

Tabel 3.3 Verloop in P-CaCl₂-getal, parameter schatting lineaire regressie en least significant difference (LSD) in de laag 0-5 en 5-10 cm vanaf 2004 voor veldjes met evenwichtsbemesting en 20 of 40 kg P₂O₅/ha overschot o.b.v. **regressiemodel 3** (niet tijdsafhankelijk). Vetgedrukte waarden zijn significant (P<0,05).^{1,2,3}

Locatie	Laag: 0-5 cm		Laag: 5-10 cm	
	constante	β1	constante	β1
Heino	2.4	-0.004	1.3	-0.004
Cranendonck	1.9	0.028	1.0	0.014
Waiboerhoeve	7.7	0.039	1.3	-0.012
Zegveld	3.2	0.048	1.0	0.005
LSD	constante	β1	constante	β1
Heino	1.1	0.016	0.5	0.007
Cranendonck	1.2	0.020	0.6	0.012
Waiboerhoeve	1.0	0.027	0.6	0.019
Zegveld	1.2	0.027	0.6	0.014

¹ Voor Waiboerhoeve en Zegveld t/m 2018, Aver Heino t/m 2012, Cranendonck t/m 2013.

² Regressiemodel: $P-CaCl_{2,i} = \text{Constante} + \beta_{1,i} * \text{fosfaatoverschot} + m_{ijk+il}$

³ Least significant difference: kleinste betrouwbaar verschil ($P \leq 0.05$). Een parameter is significant wanneer deze groter is dan de LSD.

3.2.3 Trends in de fosfaattoestand bij de enkelvoudige en gecombineerde indicator

Tabel 3.4 toont de fosfaatgebruiksnorm geldend voor de fosfaattoestand op basis van de enkelvoudige indicator P-AL-getal (indeling 2020) en de gecombineerde indicator (indeling 2021). Omdat het P-CaCl₂-getal pas vanaf 2004 is opgenomen in de monitoring, ontbreken de jaren 1996-2004 in de tabel. De tabel toont data van velden met een onderscheidenlijke fosfaatgift bij een stikstofoverschot van 300 kg N/ha en bemonstering van de 5-10 cm-bodemlaag. Aanvullend zijn in Bijlage 1 tabellen opgenomen voor de velden met dezelfde fosfaatgiften bij een stikstofoverschot van 180 kg N/ha (Tabel B1) en bij bemonstering van de 0-5 cm-bodemlaag (Tabel B2).

Er zijn verschillen in de klasse-indeling voor het P-AL-getal bij de gecombineerde indicator (P-AL-getal <21, 21-30, 31-45, 46-55, >55 mg P₂O₅ /100 g) t.o.v. de huidige enkelvoudige indicator (P-Al-getal <16, 16-26, 27-40, 41-50, >50 mg P₂O₅ /100 g). Een verschil in de fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de enkelvoudige versus de gecombineerde indicator kan dus zowel het gevolg zijn van de introductie van het P-CaCl₂-getal in de indicator als een verschuiving van de klassegrenzen voor het P-AL-getal.

Fosfaatgebruiksnormen zijn afgeleid op basis van grondmonsters gestoken uit de 5-10 cm bodemlaag en kijken zodoende af van de voorgeschreven bemonsteringsdiepte voor bepaling van de fosfaattoestand op grasland (0-10 cm). Met name op Zegveld en Waiboerhoeve zal de fosfaatgebruiksnorm hierdoor afwijken van de werkelijke fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de 0-10 cm laag door grote verschillen in fosfaattoestand in de 0-5 en 5-10 bodemlaag (paragraaf 3.1).

Er treden geen grote veranderingen in de hoogte van de fosfaatgebruiksruimte bij overgang naar de gecombineerde indicator ten opzichte van de enkelvoudige indicator (indeling 2020). Bij gebruik van de gecombineerde indicator zijn er verschillen in de fosfaattoestand tussen velden met een onderscheidende fosfaatgift (0, 20 en 40 kg P₂O₅/ha overschot) terwijl de enkelvoudige indicator deze behandelingen niet onderscheidt.

Op de twee zandlocaties heeft de gecombineerde indicator een hoger onderscheidend vermogen t.o.v. de enkelvoudige parameter; veldjes met een onderscheidende fosfaatgift (0, 20 en 40 kg P₂O₅/ha overschot) krijgen bij de gecombineerde indicator een verschillende fosfaattoestand terwijl de enkelvoudige indicator deze niet of minder onderscheidt. Dit effect is echter niet immer aanwezig; voor Heino is de fosfaattoestand op de proefveldjes met een stikstofoverschot van 300 kg N/ha onderscheidend (Tabel 3.4) maar in de behandeling met 180 kg N/ha is geen sprake van een consequent onderscheid tussen de veldjes met verschillende fosfaatgiften (Tabel B2). Het hogere

onderscheidend vermogen van de gecombineerde indicator op de zangrondlocaties komt deels door de veranderde klassegrenzen voor het P-AL-getal en deels door de toevoeging van het P-CaCl₂-getal.

Op de veen- en kleigrond is geen sprake van een hoger onderscheidend vermogen bij gebruik van de gecombineerde indicator. Het P-CaCl₂-getal is hier niet onderscheidend tussen de behandelingen en draagt zodoende niet bij aan een andere fosfaatklasse t.o.v. de enkelvoudige indicator. Het onderscheidend vermogen van de gecombineerde indicator is op veen- en kleigrond beperkt. Op kleigrond is er geen onderscheid in de fosfaattoestand op velden met 0 en 20 kg P₂O₅ overschot/ha. Op veengrond is geen onderscheid tussen langdurige bemesting met 20 of 40 kg P₂O₅ overschot/ha. De uitmijnbehandelingen die geen fosfaatgift ontvangen, worden wel onderscheiden en vallen in de hoogste fosfaatgebruiksnorm.

Op kleigrond en veengrond komen temporele fluctuaties in het fosfaatgebruik frequenter voor dan op de zangronden. Verschuivingen in de fosfaatgebruiksnorm zijn in de regel beperkt tot één klasse ten opzichte van het voorgaande jaar, maar incidenteel komen verschuivingen over twee klassen voor. Op Zegveld is sprake van een toename in de frequentie en hoogte van de jaar-op-jaar variaties in de fosfaatgebruiksnorm door overgang naar de gecombineerde indicator. Op zandgrond is het verloop in de hoogte van de fosfaattoestand daarentegen meer stabiel. Voor de andere grondsoorten is de mate van temporele variatie in de fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de gecombineerde indicator overeenkomstig met de variatie die optreedt bij gebruik van de enkelvoudige indicator.

De keuze voor de bemonsteringsdiepte is van invloed op de hoogte van de fosfaatindicatoren en daarmee op de fosfaattoestand (Tabel B2). Op de Waiboerhoeve (kleigrond) en Zegveld (veen) geeft bemonstering van de 0-5 cm-bodemlaag een hogere waardering van de fosfaattoestand (lagere gebruiksnorm) ten opzichte van de 5-10 cm-bodemlaag. Op de zangrondlocaties hangt het effect af van de hoogte van de fosfaatgift; bij een fosfaatgift boven de gewasonttrekking is de fosfaattoestand in de 0-5 cm-laag hoger dan in de 5-10 cm-laag. Echter, bij uitmijnen is sprake van een omgekeerd effect; de fosfaattoestand is hoger in de 5-10 cm-laag ten opzichte van de 0-5 cm-laag. Dit komt omdat de zangronden bij start van de proef een uniforme verdeling van fosfaat in de bovenlaag kennen en door uitmijnen raakt eerst de 0-5 cm-laag uitgeput.

De periode 2004-2020 is te kort om trends in het verloop van de fosfaatgebruiksnorm onder invloed van de fosfaatgift vast te stellen. Dit is overeenkomstig met de analyse van beide fosfaatindicatoren (paragraaf 3.2.1 en 3.2.2) waarin werd vastgesteld dat het P-CaCl₂-getal geen significante trend in de tijd toont en het P-AL-getal zeer langzaam reageert onder invloed van de fosfaatgift.

Tabel 3.4 Verloop in fosfaattoestand bij de enkelvoudige indicator (P-AL-getal, indeling 2020) en de gecombineerde indicator (indeling 2021) op de vier grasproeflocaties bij uitmijnen (-100 kg P₂O₅/ha), evenwichtsbemesting (0) en 20 of 40 kg P₂O₅/ha overschot en bij een N-overschot van 300 kg N/ha op basis van grondmonsters van de 5-10 cm-bodemlaag. Iedere cel correspondeert met één afzonderlijke meting (n:1).

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. het **P-AL-getal (2020)**

P ₂ O ₅ overschot:	Cranendonck (zand)				Heino (zand)				Waiboerhoeve (klei)				Zegveld (veen)			
	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40
2004	95	95	95	95	95	95	95	90	105	95	95	90	120	105	105	105
2005					105	105	95	95	120	95	95	95				
2006													105	105	105	105
2007	95	95	95	95	105	95	95	90	120	95	95	90	120	105	105	95
2008	95	95	95	95	105	95	95	95	120	95	95	90	120	95	90	90
2009	105	95	95	95	105	95	95	95	120	95	90	90	120	95	95	95
2010	95	95	95	95	105	105	95	95	120	75	90	75	120	105	95	95
2011	105	90	95	95	105	95	95	95	120	95	90	90	120	105	105	105
2012	105	95	95	95	105	105	95	95	120	95	90	90	120	105	95	105
2013	105	95	95	95					120	95	95	75	120	120	105	105
2014									120	105	95	90	120	120	95	95
2015									120	105	95	95	120	120	105	105
2016									120	90	90	75	120	120	105	95
2017									120	95	95	75	120	120	95	95
2018									120	90	75	75	120	120	105	95
2019									120	95	90	75	120	105	105	75
2020									120	95	90	90	120	120	95	95
gemiddelde	100	94	95	95	104	99	95	94	119	94	92	85	119	110	100	99

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de **gecombineerde indicator (2021)**

P ₂ O ₅ overschot:	Cranendonck (zand)				Heino (zand)				Waiboerhoeve (klei)				Zegveld (veen)			
	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40
2004	105	105	105	105	105	105	95	105	120	105	105	105	120	120	120	120
2005					105	105	95	95	120	105	105	95				
2006													120	120	105	105
2007	105	95	90	90	105	95	90	90	120	95	105	90	120	120	105	90
2008	105	105	90	95	120	105	90	90	120	105	95	90	105	75	90	75
2009	105	95	90	90	105	105	95	90	120	95	95	90	120	105	95	90
2010	105	95	90	90	120	105	95	90	120	75	90	75	120	120	95	105
2011	105	90	95	90	105	105	95	90	120	95	95	90	120	120	90	105
2012	120	95	95	90	120	105	95	90	120	95	95	90	120	120	105	120
2013	105	95	90	90					120	90	95	90	120	120	105	105
2014									120	105	105	90	120	120	90	90
2015									120	105	105	95	120	120	105	105
2016									120	90	90	90	120	120	120	105
2017									120	105	105	90	120	120	105	95
2018									120	90	90	75	120	120	105	90
2019									120	90	90	75	120	120	105	75
2020									120	105	90	75	120	120	105	95
gemiddelde	107	97	93	93	111	104	94	93	120	97	97	88	119	116	103	98

¹ Geen herhalingen, getoond zijn de data van individuele veldjes en enkele analyses om de mate van variatie die ontstaat bij jaarlijkse heranalyse van één veld weer te geven. De fosfaatgiften zijn sinds 1996 op hetzelfde niveau (evenwicht of 120 of 40 kg P₂O₅/ha overschot) gecontinueerd. Het P-CaCl₂-getal is vanaf 2004 opgenomen in de jaarlijkse monitoring en zodende is de tabel opgesteld vanaf 2004.

3.2.3.1 Fosfaattoestand grondmonsters 0-10 cm bodemlaag

Sinds 2018 is de 0-10 cm-bodemlaag – overeenkomstig de voorgeschreven bemonsteringsdiepte voor bepaling van de fosfaattoestand in landbouwgronden – toegevoegd aan de jaarlijkse monitoring van proefperceel op klei- en veengrond. De data zijn getoond voor de zeven individuele velden op de proeflocaties, bestaande uit een combinatie van verschillen in fosfaatgift (-100, 0, 20 en 40 kg P₂O₅/ha) gecombineerd met twee niveaus voor het stikstofoverschot (180 en 300 kg N/ha).

De hoogte van de fosfaatgebruiksnorm wijkt af van de data in Tabel 3.5 door het verschil in bemonsteringsdiepte, waardoor bij 0-10 cm hogere waarden voor de fosfaatindicatoren worden vastgesteld t.o.v. de 5-10 cm-bodemlaag. Het verdere beeld komt overeen met Tabel 3.5. Op veengrond is sprake van een hoge mate van temporele variatie waarbij de fosfaatgebruiksnorm tot drie klassen kan verschuiven t.o.v. het voorgaande jaar. Voor kleigrond valt de fosfaatgebruiksnorm bij evenwichtsbemesting of een hogere fosfaatgift veelal in klasse hoog, waardoor de mate van temporele variatie niet is af te leiden. De overgang naar de gecombineerde indicator leidt niet tot een verschil in de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm, wel neemt de mate van temporele variatie op veengrond toe.

Voor de praktijk is de hoogte van de temporele variatie daarmee van groter belang dan de verschillen die ontstaan door de overgang naar de gecombineerde indicator.

Tabel 3.5 Fosfaatgebruiksnorm op basis van de enkelvoudige indicator (indeling 2020) en de gecombineerde indicator (indeling 2021) voor proefvelden op Waiboerhoeve (zeeklei) en Zegveld (veen) op basis van grondmonsters uit de 0-10 cm-bodemlaag voor zeven veldjes met vier onderscheidenlijke fosfaatgiften.¹

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. het **P-AL-getal (indeling 2020)** - grondmonsters 0-10 cm

	Waiboerhoeve (klei)								Zegveld (veen)							
P-overschot	-100	0	0	20	20	40	40	-100	0	0	20	20	40	40		
N-overschot	300	180	300	180	300	180	300	300	180	300	180	300	180	300		
2018	120	90	95	75	75	75	75	120	105	105	95	95	90	95		
2019	105	90	75	75	75	75	75	105	95	95	90	95	75	90		
2020	120	90	90	75	90	75	75	120	105	105	105	105	95	95		

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de **gecombineerde indicator (indeling 2021)** - grondmonsters 0-10 cm

	Waiboerhoeve (klei)								Zegveld (veen)							
P-overschot	-100	0	0	20	20	40	40	-100	0	0	20	20	40	40		
N-overschot	300	180	300	180	300	180	300	300	180	300	180	300	180	300		
2018	120	90	90	75	75	75	75	120	120	120	90	90	75	90		
2019	120	75	75	75	75	75	75	105	90	95	75	90	75	90		
2020	120	75	75	75	90	75	75	120	120	120	105	105	105	95		

¹ Vier niveaus fosfaatgiften: uitmijnen (-100), gelijk aan gewasonttrekking (0) en 20 of 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking (20, 40), gecombineerd met twee niveaus voor het overschot aan stikstof (180 en 300 kg N/ha).

3.3 Gewasopbrengst en fosfaatopname

Het verloop in de jaarlijkse drogestofopbrengsten en het jaargemiddelde fosforgehalte in gras zijn getoond in Figuur 3.4 en 3.5. Drogestofopbrengsten wisselen per jaar onder invloed van de weerscondities. In jaren met perioden van droogte, waaronder 2002, 2003 en, meer recent 2018 en 2019, is de drogestofopbrengst lager dan gemiddeld. Deze trend is niet terug te zien in het fosforgehalte van het gras. De gemiddelde drogestofopbrengst sinds 1996 is -1% tot 7% hoger bij een fosfaatgift van 40 kg P₂O₅ boven de onttrekking ten opzichte van een fosfaatgift gelijk aan de onttrekking.

Door de proefopzet van de veeljarige grasproef zijn de hoogtes van de fosfaatgift en de fosfaattoestand van de bodem na het eerste proefjaar verstrengeld. Percelen met een hogere fosfaattoestand ontvangen een hogere fosfaatgift, waardoor effecten van fosfaatgift versus fosfaattoestand niet onafhankelijk te onderscheiden zijn. Omdat de fosfaatgift is afgestemd op de gemiddelde fosfaatopname van het gewas (evenwichtsbemesting), varieert deze tussen de locaties van gemiddeld 77 tot 93 kg P₂O₅/ha/jaar (Ehlert et al., 2018).

Tabel 3.5 Fosfaatgift uit runderdrijfmest en weidemest op de behandelingen waarbij de fosfaatgift gelijk is aan de gewasonttrekking (P0) en bij een stikstofgift van 180 (N180) of 300 (N300) kg boven de gewasonttrekking¹.

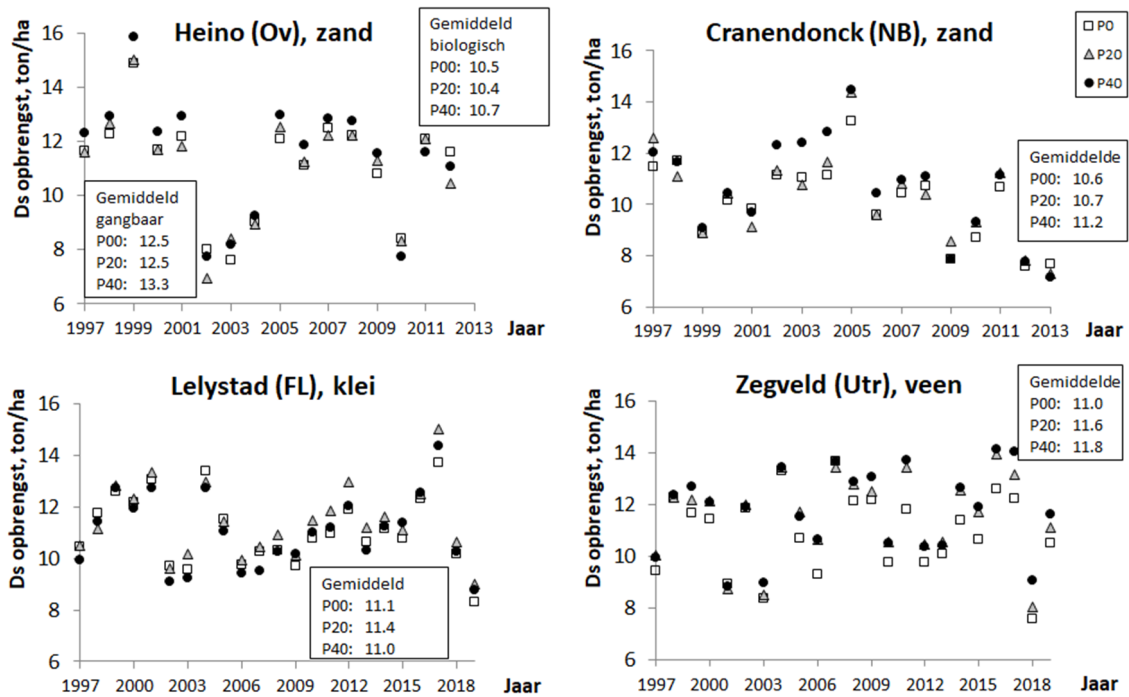
Locatie	Behandeling	Fosfaatgift o.b.v. gewasonttrekking (kg P ₂ O ₅ /ha)
Cranendonck	P0_N180	82
Cranendonck	P0_N300	88
Heino	P0_N180	81
Heino	P0_N300	83
Waiboerhoeve	P0_N180	77
Waiboerhoeve	P0_N300	93
Zegveld	P0_N180	82
Zegveld	P0_N300	86

¹ Overgenomen uit Ehlert et al., 2018. De fosfaatgift is berekend als de som van de aanwending van runderdrijfmest (afgestemd op de afvoer van de fosfaat in de maai-snedes) en een berekende fosfaatuitscheiding tijdens beweiding.

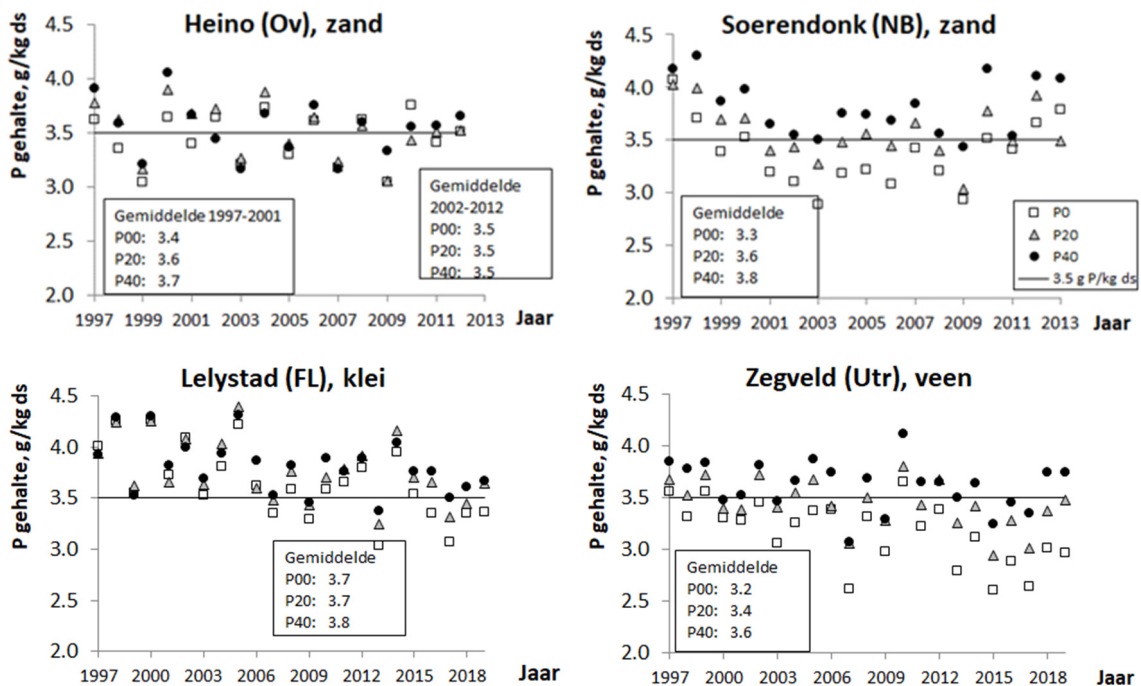
Om vast te stellen of het gras voldoende fosfaat uit bodem en bemesting kan halen om een (vrijwel) ongeremde groei te bereiken, kan het P-gehalte van het gewas informatie geven. In Figuur 3.5 zijn de P-gehalten van het gras op de proefvelden, gewogen gemiddeld over de snedes, per jaar en per fosfaatbehandeling weergegeven. Volgens veevoedingsnormen (CVB, 2016) is een gehalte van 3,5 g P per kg droge stof nodig om lacterende melkkoeien van voldoende P te voorzien. In het bemestingsadvies wordt er tevens van uitgegaan dat gras met een gehalte van 3,5 g P per kg droge stof geen gebrek heeft gehad aan P voor de groei van het gras. In de figuren is deze grens aangegeven als horizontale lijn. Het P-gehalte in het gras wordt mede beïnvloed door weerscondities en fluctueert zodoende van jaar tot jaar. Op de locatie op klei komt het slechts enkele keren voor in de proefperiode dat het gehalte in gras deze grens niet haalt, ongeacht de fosfaatgift. Op de twee locaties op zandgrond en veengrond zijn de P-gehalten op de behandeling met 40 kg P₂O₅ overschot/ha in vrijwel alle jaren boven 3,5 g P per kg ds. Op de behandeling met evenwichtsbemesting (0 kg P₂O₅/ha overschot) is met name op de veengrond het P-gehalte na de eerste proefjaren niet meer boven de 3,5 g P per kg ds uitgekomen. De verschillen in P-gehalte en drogestofopbrengst (Ehlert et al., 2018) tussen evenwichtsbemesting en veldjes met hogere fosfaatgiften nemen niet toe in de tijd.

Het bepalen van een verband tussen P-gehalte in het gras en de fosfaattoestand van de bodem wordt bemoeilijkt door twee factoren: (i) de fosfaattoestand is verstrengd met de hoogte van de fosfaatgift en (ii) de fosfaattoestand van de bodem zoals bedoeld voor bepaling van de fosfaatgebruiksnorm is niet bekend bij gebrek aan monitoringsdata voor de 0-10 cm-bodemlaag. De fosfaattoestand zoals is bepaald in paragraaf 3.1.3 is afgeleid voor de 5-10 cm-laag en zal gemiddeld gezien lager zijn dan de fosfaattoestand op basis van de 0-10 cm-laag. Voor Zegveld (veen) en Waiboerhoeve (klei) zijn data van de 0-10 cm-bodemlaag beschikbaar voor 2018 en 2019 (paragraaf 3.1.1) en hieruit volgt dat de veldjes met evenwichtsbemesting op Waiboerhoeve een fosfaatstatus 'hoog' (75 kg P₂O₅/ha) kennen en op de Zegveld 'ruim voldoende' (90 kg P₂O₅/ha). Op de zandlocaties zijn verschillen tussen de bodemlaag 0-5 en 5-10 cm beperkt (paragraaf 3.1.1) en nemen we aan dat de fosfaattoestand op basis van de 5-10 cm-laag een goede schatter is voor de fosfaattoestand conform de voorgeschreven 0-10 cm-bemonsteringsdiepte. Met deze aannames neemt de fosfaattoestand op veldjes met evenwichtsbemesting (P0) toe in de volgorde: Heino (laag) en Cranendonck/Zegveld (ruim voldoende) en Waiboerhoeve (hoog). Op Heino was tot 2002 sprake van een gewasreactie op de fosfaatgift. Sinds 2002 zijn de overschotten van 20 en 40 kg P₂O₅/ha echter gegeven in de vorm van het slecht oplosbare natuurfosfaat en hierdoor blijft een gewasreactie op de fosfaatgift achterwege, ondanks de relatief lage fosfaattoestand bij evenwichtsbemesting. Op Cranendonck en Zegveld is sprake van een duidelijke gewasreactie op de hoogte van de fosfaatgift. Op Waiboerhoeve is geen sprake van een gewasreactie op de fosfaatgift en dit past bij de hoge fosfaattoestand bij evenwichtsbemesting. Met andere woorden: door de hoge fosfaattoestand is de fosfaatopname reeds bij evenwichtsbemesting maximaal. Op Cranendonck en Zegveld resulteert een hogere fosfaatgift in een hoger fosfaatgehalte van het gras, wat past bij de fosfaattoestand van ruim voldoende. Op Heino is geen sprake van een gewasreactie, omdat het overschot wordt gegeven in de vorm van het slecht beschikbare natuurfosfaat vanwege de overgang naar een biologische bedrijfsvoering in 2001. Omdat reeds bij aanvang van de proef verschillen zijn in fosfaatgehalte van het gras bij onderscheidenlijke

fosfaatgiften en de verschillen in de tijd niet toenemen, is hier sprake van een bemestingsreactie en speelt de verandering in bodemfosfaattoestand niet of in mindere mate een rol. Het laat echter wel zien dat evenwichtsbemesting in combinatie met een fosfaattoestand 'ruim voldoende' op twee locaties niet voldoende is om een gemiddeld P-gehalte van 3,5 g/kg te realiseren. Op Heino wordt deze grenswaarde wel gerealiseerd ondanks de waardering van de fosfaattoestand als laag. Opname van fosfaat uit de rijke onderliggende bodemlagen speelt hierbij mogelijk een rol.



Figuur 3.4 Verloop van de drogestofopbrengst (ton/ha) van gras op veldproef in Cranendonck (Soerendonck), Aver Heino (Heino), Lelystad en Zegveld bij evenwichtsbemesting gelijk aan de gewasafvoer (P0, □) en een fosfaatgift van 20 (Δ) of 40 (o) kg P₂O₅/ha boven de gewasafvoer.



Figuur 3.5 Verloop van het P-gehalte (g/kg droge stof) in gras op veldproef in Cranendonck (Soerendonck), Heino, Lelystad en Zegveld bij evenwichtsbemesting gelijk aan de gewasafvoer (P0) en een fosfaatgift van 20 of 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasafvoer.

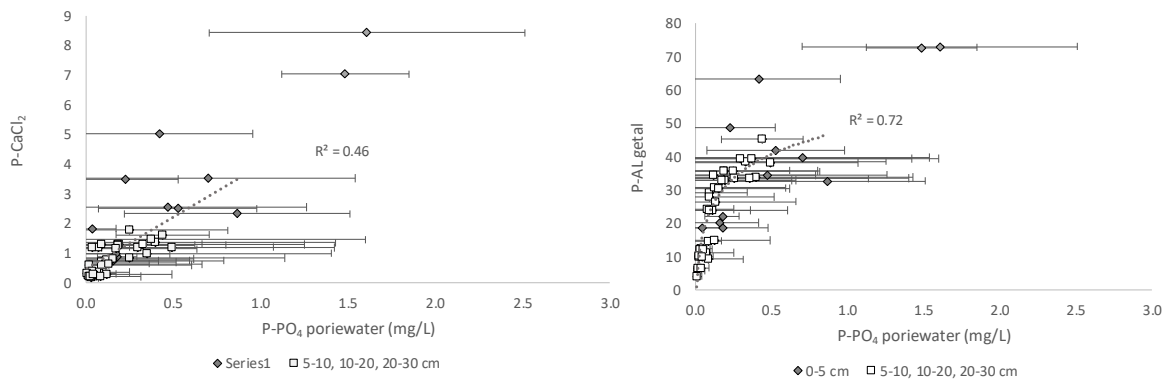
3.4 Fosfaat in bodemvocht

Op de grasproeflocaties werd in de periode 1997-2012 in het najaar en voorjaar de orthofosfaat-concentratie in het bodemvocht bepaald, waarbij bodemvocht werd verkregen door het uitslingeren van veldvochtige grond. De resultaten zijn eerder gerapporteerd (Ehlert et al., 2018). Het verloop in de orthofosfaat-concentratie in het bodemvocht toont een grote variatie in de tijd. Uit eerdere statistische analyse blijkt dat de orthofosfaat-concentratie in het bodemvocht in de lagen 5-10, 10-20 en 20-30 niet significant verschilt tussen behandelingen met een onderscheidenlijke fosfaatgift (m.u.v. de uitmijnbehandelingen). In de bodemlaag 0-5 cm zijn wel verschillen in orthofosfaat-concentratie tussen de verschillende fosfaatbehandelingen (Ehlert et al., 2018).

In dit rapport is onderzocht of de fosfaatindicatoren P-CaCl₂-getal en het P-AL-getal een relatie vertonen met de fosfaatconcentratie in het bodemvocht. Hiervoor is gebruikgemaakt van de data over de periode 2007-2012, wat inhoudt dat de proefveldjes bij ingang van deze periode reeds tien jaar een fosfaatgift van 0, 20 of 40 kg P₂O₅ boven de gewasonttrekking ontvangen. Per proefveldje is de gemiddelde orthofosfaat-concentratie over de periode 2007-2012 (n:11) uitgezet tegen het gemiddelde P-CaCl₂-getal en het P-AL-getal over dezelfde periode (Figuur 3.6). In de figuur is hierbij onderscheid gemaakt naar bemonsteringsdiepte (0-5 cm apart weergegeven), maar niet naar proefveldlocatie, omdat de trends niet verschillen tussen de proefveldlocaties. Om de temporele variatie in de bodemvochtmetingen te illustreren, is tevens de standaarddeviatie van de orthofosfaat-concentraties toegevoegd aan de figuren. Er is gekozen om de gemiddelde concentraties te tonen, die nagenoeg gelijk zijn aan de mediane waarden.

De orthofosfaat-concentratie in het bodemvocht toont een zwakke, lineaire correlatie ($R^2:0,46$) met het P-CaCl₂-getal in de bodem. De relatie tussen ortho-P in bodemvocht en het P-AL-getal wordt daarentegen het best beschreven met een kromme lijn met een R^2 van 0,72. In beide gevallen zijn twee uitschieters met hoge ortho-P-concentraties niet in de regressielijnen meegenomen, omdat deze de correlatiecoëfficiënt sterk beïnvloeden. De regressielijn tussen het P-AL-getal en de orthofosfaat-concentratie heeft de vorm van een adsorptie-isotherm, wat verwacht mag worden voor een situatie waarin de orthofosfaat-concentratie bepaald wordt door een evenwichtssituatie op basis van adsorptie en desorptie en waarbij het P-AL-getal een maat is voor de fosfaatvoorraad. Bij een P-AL-getal tot 30 mg P₂O₅/100 g is de orthofosfaat-concentratie in het bodemvocht onder 0,2 mg/L. Boven dit kantelpunt is sprake van een snellere toename in orthofosfaat-concentraties bij een toenemend P-AL-getal. Op basis van deze – beperkte – analyse is het P-AL-getal een betere indicator voor orthofosfaat in bodemvocht vergeleken met het P-CaCl₂-getal. In hoeverre deze indicatoren ook het risico op fosfaatuitspoeling voorspellen, ligt buiten het bereik van deze studie, omdat de fosfaatuitspoeling de resultante is van meerdere factoren adsorptie van fosfaat in onderliggende bodemlagen en de tijdsafhankelijke flux van water door het bodemprofiel.

Een uitvoerigere analyse van fosfaatgehalten in bodemvocht waarbij tevens wordt ingegaan op de rol van bemonsteringstechniek en andere ionen (DOC, Ca, Fe etc.) is onderdeel van het werkplan voor 2021 en zal nadien gerapporteerd worden.



Figuur 3.6 Gemiddeld P-CaCl₂-getal (links) en P-AL-getal (rechts) uitgezet tegen de gemiddelde orthofosfaat-concentratie (P-PO₄) in het bodemvocht (n:11) op veldjes met een onderscheidenlijke fosfaatgift op proeflocaties Zegveld, Waiboerhoeve, Cranendonck en Heino. Data zijn gemiddeld over de periode 2007-2012 en voor orthofosfaat is tevens de standaarddeviatie opgenomen. Data zijn uitgesplitst naar 0-5 cm-bodemlaag (donkergrijs) en diepere bodemlagen (wit). De stippellijn geeft respectievelijk de lineaire regressielijn (links) en een kromme regressielijn (rechts). Twee uitschieters zijn niet meegenomen bij afleiding van de regressielijnen.

3.5 Monitoring fosfaatindicatoren op praktijkpercelen op zand

In 2018 is gestart met monitoring van fosfaatindicatoren op zandgronden in eigendom van proefboerderij De Marke (Hengelo GLD) en proefboerderij Unifarm (Wageningen). Hiertoe is besloten, omdat de proefveldlocaties op zand eerder zijn afgesloten. Het betreft echter geen volwaardige veldproef; de percelen worden beheerd door de proefboerderijen (bemesting wordt niet vanuit het onderzoek opgelegd) en het betreft dus louter een monitoring van het verloop van de fosfaattoestand op praktijkpercelen. De percelen zijn in tweevoud bemonsterd en de resultaten van de individuele monsters zijn getoond om een beeld te geven van de spreiding tussen de herhalingen.

De overgang van de enkelvoudige naar de meervoudige indicator heeft geen of een beperkt effect op de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm. Gemiddeld gezien is sprake van een hogere fosfaatgebruiksnorm bij de gecombineerde indicator doordat de relatief lage P-CaCl₂-getallen op Marke 17-2 en Marke K3 de fosfaatgebruiksnorm omhoogtrekken t.o.v. de beoordeling op enkel het P-AL-getal.

De percelen zijn in tweevoud bemonsterd en in drie van de veertien metingen is er sprake van een verschil in de fosfaatgebruiksnorm tussen de twee herhalingen, waarbij de fosfaatgebruiksnorm ten hoogste één klasse verschuift. In alle gevallen betreft het een verschuiving van klasse neutraal (95 kg P₂O₅/ha) naar een hogere of lage klasse. Fosfaatklasse neutraal kent nauwe klassegrenzen op basis van het P-CaCl₂-getal, waardoor een kleine variatie in het P-CaCl₂-getal reeds tot een verschuiving leidt.

Er is sprake van temporele variatie in de fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de gecombineerde indicator waarbij de fosfaatgebruiksnorm één of twee klassen verschuift binnen een tijdsbestek van een jaar. De temporele variatie in de fosfaatgebruiksnorm is te verklaren door variatie in zowel het P-AL-getal als het P-CaCl₂-getal en de mate waarin jaar-op-jaar veranderingen van de fosfaatgebruiksnorm voorkomen zijn niet toegenomen door de overgang naar de gecombineerde indicator. Verschuivingen in fosfaatgebruiksnormen zijn mede het gevolg van de nauwe klassegrenzen voor de fosfaatindicatoren.

P-CaCl₂-getal

	Marke '3'		Marke '17-2'		Marke K3		Unifarm Dr. 15		Unifarm Dr. 16		Unifarm F1403	
	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2
2019-02	2.1		0.6		1.2		1.9	1.6	1.5	1.4	4.8	4.1
2019-11	2.2	2	0.9	1	1	1.8	1.4	1.7	1	1	3.2	3.1
2021-01	4	3.1	0.8	0.8	1	1.2	1.8	1.8	1.4	2		

P-AL-getal

	Marke '3'		Marke '17-2'		Marke K3		Unifarm Dr. 15		Unifarm Dr. 16		Unifarm F1403	
	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2
2019-02	78		32		54		41	36	29	31	85	80
2019-11	73	77	32	34	61	66	42	45	32	28	80	79
2021-01	67	62	21	22	38	40	37	39	31	32		

Figuur 3.7 Het P-CaCl₂-getal en P-AL-getal in grondmonsters (0-10 cm) op praktijkpercelen op De Marke (Hengelo GLD, zand) en Unifarm (Wageningen, zand) bij bemonstering in tweevoud (h1, h2) en op drie tijdstippen.

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. het **P-AL-getal** (klassen 2020)

	Marke '3'		Marke '17-2'		Marke K3		Unifarm Dr. 15		Unifarm Dr. 16		Unifarm F1403	
	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2
2019-02	75		95		75		90	95	95	95	75	75
2019-11	75	75	95	95	75	75	90	90	95	95	75	75
2021-01	75	75	105	105	95	90	95	95	95	95	n.m	n.m

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de **gecombineerde indicator** (klassen 2021)

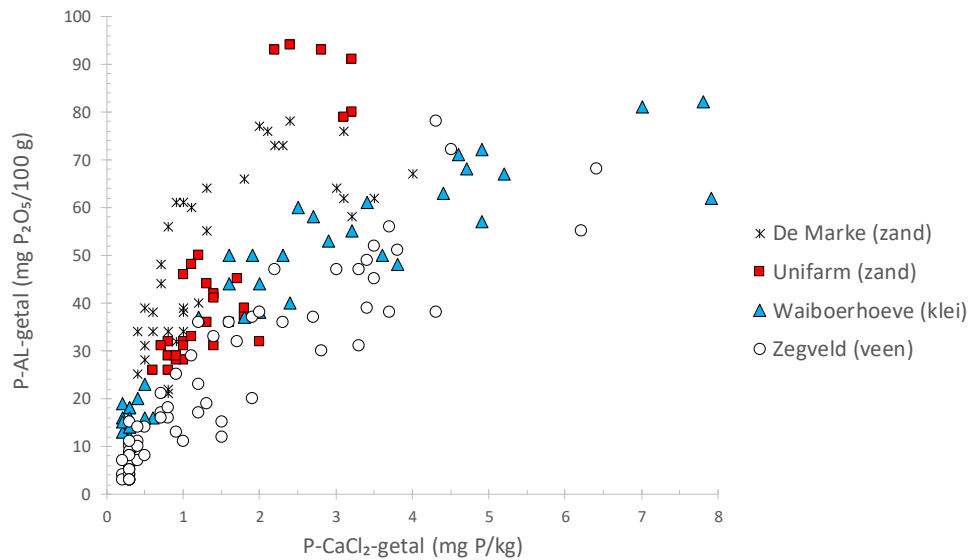
	Marke '3'		Marke '17-2'		Marke K3		Unifarm Dr. 15		Unifarm Dr. 16		Unifarm F1403	
	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2
2019-02	75		105		90		95	95	105	95	75	75
2019-11	90	90	105	105	90	90	95	90	105	120	75	75
2021-01	75	75	120	120	105	105	95	95	95	95		

Figuur 3.8 De fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de enkelvoudige indicator P-AL-getal (klasse-indeling 2020) en de gecombineerde indicator (klasse-indeling 2021) op praktijkpercelen op De Marke (Hengelo GLD, zand) en Unifarm (Wageningen, zand) bij bemonstering in tweevoud (h1, h2) en op drie tijdstippen. Grondmonsters zijn gestoken uit de 0-10 cm-bodemlaag.

3.6 Relaties tussen fosfaatindicatoren

De gecombineerde indicator is gebaseerd op het principe dat de fosfaatbeschikbaarheid in gronden zich laat voorspellen door de combinatie van een indicator voor de fosfaatintensiteit en de fosfaatcapaciteit. De gecombineerde indicator gebruikt daarvoor het P-CaCl₂-getal en het P-AL-getal.

Figuur 3.9 toont een plot van het P-AL-getal versus het P-CaCl₂-getal voor grondmonsters van proefveldlocaties op klei (Waiboerhoeve) en veen (Zegveld) en praktijkpercelen op dekzand (Unifarm, De Marke). Bij een gelijk P-AL-getal is er sprake van een brede spreiding in P-CaCl₂-getallen. Voor veengrond is het P-CaCl₂-getal hoger bij een gelijk P-AL-getal, wat duidt op een lager bufferend vermogen. Verder is er echter geen onderscheid aan te brengen in de relatie tussen P-PAL-getal en P-CaCl₂-getal tussen de grondsoorten.



Figuur 3.9 Plot van het P-AL-getal (mg P₂O₅/100 g) tegen het P-CaCl₂-getal (mg P/kg) voor proefvelden en praktijkpercelen op zand, klei en veen. Grondmonsters van twee jaargangen (2019-2020) en uit de bodemlagen 0-10, 10-20 en 20-30 cm. De bemonsteringsdiepte heeft geen invloed op de relatie, waardoor de data van de onderliggende bodemlagen samengevoegd mogen worden.

De gecombineerde indicator gebruikt het P-AL-getal als indicator voor de fosfaatvoorraad. Het P-AL-getal extraheert echter slechts een deel van het anorganische fosfaat uit de bodem. Voor de percelen van de veeljarige veldproef wordt met de P-AL-methode circa 20% van het totale fosfaat uit de bodem geëxtraheerd (Ehlert et al., 2018). In de wetenschappelijke literatuur en modellen voor berekening van de fosfaatuitspoeling (ANIMO, INITIATOR) wordt het P_{ox}-gehalte gebruikt als maat voor de totale voorraad anorganisch fosfaat. De P_{ox}-methode extraheert voor de gronden uit de veeljarige proeven circa 40 tot 70% van het totaal fosfaat. In de landbouwpraktijk is P_{ox} geen routineparameter, maar deze parameter is wel onderdeel van het monitoringsprogramma van de veeljarige grasproef. Het P_{ox}-gehalte wordt gelijktijdig bepaald met het Fe_{ox}- en Al_{ox}-gehalte waarmee de bindingscapaciteit van de bodem voor fosfaat kan worden benaderd.

De fosfaatbindingscapaciteit van de bodem (Q_{max}) wordt berekend met vergelijking 1:

$$Q_{max} = \alpha * (Fe_{ox} + Al_{ox}) \quad \text{vergelijking 1}$$

$$\text{Fosfaatverzadigingsgraad} = \frac{P_{ox}}{\alpha * (Fe_{ox} + Al_{ox})} * 100\% \quad \text{vergelijking 2}$$

Q_{max} = Maximale fosfaatbindingscapaciteit van de bodem (mmol/kg)

a = constante (-)

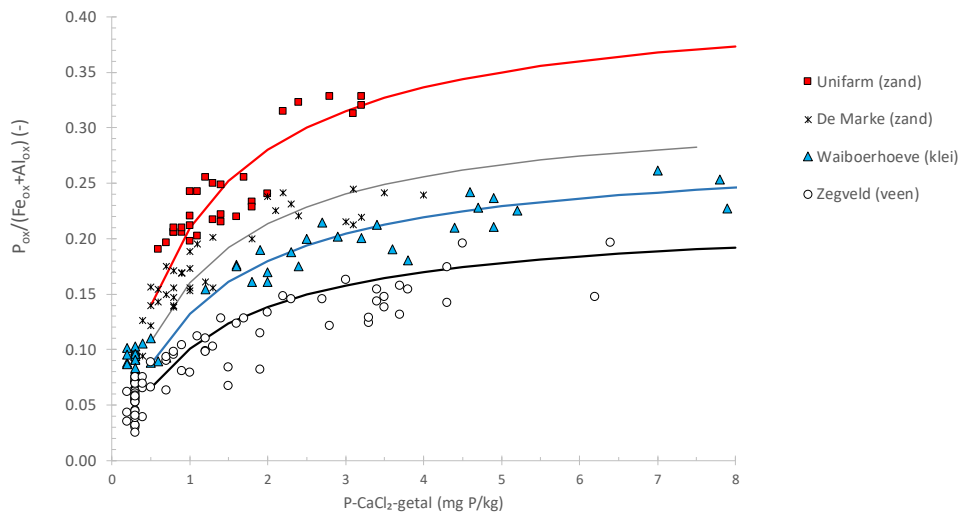
Combinatie met de Langmuir-vergelijking geeft vergelijking 2, waarmee de relatie tussen het P-CaCl₂-getal van de bodem beschreven wordt en middels fitting de parameters a en K afgeleid kunnen worden.

$$\frac{P_{ox}}{Fe_{ox} + Al_{ox}} = \frac{K * \alpha * C}{1 + K * C} \quad \text{vergelijking 3}$$

C = de fosfaatconcentratie in het bodemvocht; hier het P-CaCl₂-getal (mg P/kg)

K = Langmuir bindingsconstante (-)

Beide zijden van vergelijking 3 zijn dimensieloos, waardoor voor het P-CaCl₂-getal de standaardeenheid (mg P/kg) gehanteerd kan worden.



Figuur 3.10 Relatie tussen de fosfaatverzadigingsgraad uitgedrukt als $P_{ox}/(Fe_{ox}+Al_{ox})$ en het P-CaCl₂-getal voor proefvelden en praktijkpercelen op zand, klei en veen. Lijnen tonen de gefitte adsorptiecurve.

Tabel 3.6 Parameters a en K afgeleid voor op de data in Figuur 3.10 volgens vergelijking 3.

	a	K
Waiboerhoeve (klei)	0,22	0,90
Zegveld (veen)	0,22	0,85
Unifarm (zand)	0,42	1,0
De Marke (zand)	0,32	1,0

Figuur 3.10 toont de relatie tussen de fosfaatvoorraad, uitgedrukt als de ratio $P_{ox}/(Fe_{ox}+Al_{ox})$, en het P-CaCl₂-getal en toont vier onderscheidenlijke adsorptiecurves voor de vier bemonsteringslocaties. De afgeleide waarden voor de parameters a en K zijn weergegeven in Tabel 3.7.

De parameter K is een maat voor de adsorptieaffiniteit. Een hogere K -waarde geeft een steilere adsorptiecurve. Er is geen duidelijk onderscheid in de gefitte K -waarden tussen de vier locaties, wat aangeeft dat het bufferend vermogen van de gronden vergelijkbaar is. De verschillen tussen de locaties zijn het gevolg van verschillen in de waarde van a , oftewel de maximale hoeveelheid fosfaat die gebonden kan worden per mol $Fe_{ox}+Al_{ox}$. In theorie wordt aangenomen dat de a maximaal 0,50 bedraagt, wat wil zeggen dat 2 mol $Fe_{ox}+Al_{ox}$ ten hoogste 1 mol P_{ox} kan binden. De hier afgeleide waarden voor a variëren tussen 0,22 en 0,42 en nemen toe in de volgorde Zegveld, Waiboerhoeve, De Marke, Unifarm. Dat wil zeggen dat de veengrond (Zegveld) minder fosfaat kan binden per mol $Fe_{ox}+Al_{ox}$ en opzichte van klei- of zandgrond. Er zijn meerdere factoren die de verschillen in fosfaatbindingscapaciteit van de bodem kunnen verklaren. Organische stof speelt hierbij een belangrijke rol, omdat organische stof – evenals fosfaat – kan binden aan het reactieve oppervlak van Fe- en Al-hydroxiden in de bodem. Fosfaat en organische stof concurreren om de beschikbare adsorptieplaatsen en een hoger organischestofgehalte van de bodem geeft daarom een lagere fosfaatbindingscapaciteit (Regelink et al., 2015). Daarnaast wordt de bindingscapaciteit ook beïnvloed door de pH en calciumconcentraties (Weng et al., 2008).

In een eerder rapport naar de indeling van de fosfaatklassen zijn ook voorstellen gedaan voor een indeling op basis van de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem in combinatie met het P-CaCl₂-getal, omdat dit aansluit bij bepaling van risico's op fosfaatuitspoeling (Oenema et al., 2015). Ontwikkeling van een nieuwe parameter vraagt echt veel aanvullend onderzoek en analyses. De resultaten zijn hier opgenomen voor de begripsvorming rondom verschillen in de fosfaatadsorptie in verschillende gronden.

3.7 Reproduceerbaarheid van het P-CaCl₂-getal bij twee laboratoria

In 2018 en 2019 zijn 156 grondmonsters afkomstig van de veldproeven in Zegveld (veen), Waiboerhoeve (klei), De Marke (zand) en Unifarm (zand) geanalyseerd door Eurofins Agro (Wageningen) en het Chemisch Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB, onderdeel van WUR). Figuur 3.11 toont een plot het P-CaCl₂-getal zoals vastgesteld door beide laboratoria. Het betreft monsters van de 0-10 cm-, 5-10 cm-, 10-20 cm- en de 20-30 cm-bodemlaag.

De volgende data zijn gebruikt voor het afleiden van de standaardafwijking voor de inter-laboratoriumreproduceerbaarheid:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - x_{i2})^2}{2n}}$$

s = standaardafwijking, in eenheid analysesresultaat
 n = aantal monsters in duplo geanalyseerd, $n \geq 5$
 x_{i1} = eerste analysesresultaat van een duplo-analyse op monster i
 x_{i2} = tweede analysesresultaat van een duplo-analyse op monster i

In de berekening zijn P-CaCl₂-getallen met een waarde hoger dan 5 mg/kg buiten beschouwing gelaten, omdat op basis van prestatiekenmerken van het CBLB bekend is dat de variantie bij hogere waarden toeneemt bij een toename van de meetgrootte en bovendien is de variantie bij hoge P-CaCl₂-getallen niet meer van invloed op de indeling in de fosfaatklasse.

Het gemiddelde P-CaCl₂-getal per grondsoort komt goed overeen tussen beide laboratoria. De standaardafwijking van de inter-laboratoriumreproduceerbaarheid bedraagt – gemiddeld over alle grondsoorten – 0,40 mg P/kg, wat wil zeggen dat in 31,8% van de monsters het verschil tussen beide laboratoria groter is dan 0,40 mg P/kg (1σ) en bij 4,5% van de monsters het verschil groter is dan 0,8 mg P/kg (2σ). Er is onderscheid tussen de standaardafwijking van de inter-laboratoriumreproduceerbaarheid op basis van grondsoort, waarbij kleigrond een lagere standaardafwijking kent dan veen- en zandgrond. De plot (Figuur 3.11) toont daarnaast aan dat het absolute verschil in het P-CaCl₂-getal toeneemt bij een toenemende waarde van het P-CaCl₂-getal. Dit is vanuit bodemchemisch oogpunt te verklaren, omdat de mate waarin de bodem het P-CaCl₂-getal buffert, afneemt bij een toenemende fosfaattoestand.

Daarnaast is bij het CBLB de intra-laboratoriumreproduceerbaarheid van de P-CaCl₂-methode opgevraagd. Het CBLB rapporteert een standaardafwijking van 0,4 mg P/kg voor een P-CaCl₂-getal lager dan 5 mg P/kg. Bij hogere P-CaCl₂-getallen boven 5 mg P/kg is sprake van een variantiecoëfficiënt van 8%. Het CBLB rapporteert daarnaast een aantoonbaarheidsgrens van 0,4 mg P/kg. De afgeleide inter-laboratoriumreproduceerbaarheid komt overeen met de intra-laboratoriumreproduceerbaarheid van het CBLB, waarbij moet worden opgemerkt dat onze analyse is uitgevoerd op een beperkte dataset en op slechts twee laboratoria.

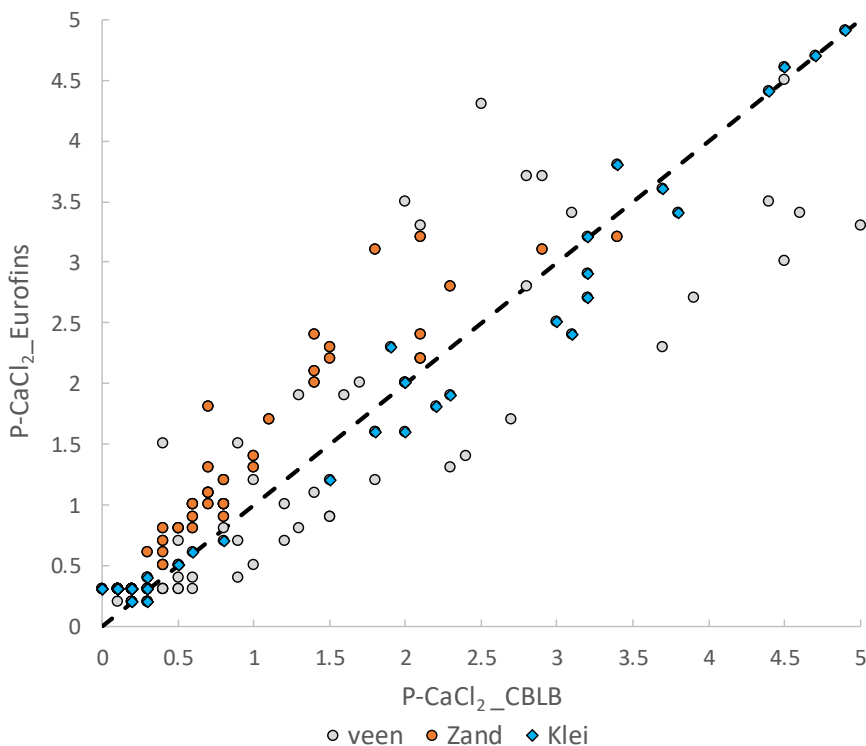
De gecombineerde indicator kent een indeling op basis van het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal. De klassegrenzen voor het P-CaCl₂-getal variëren tussen 0,6 en 1 mg P/kg. Dit is nauw ten opzichte van de standaardafwijking die optreedt wanneer een grondmonster al dan niet bij een ander laboratorium opnieuw wordt geanalyseerd. Of een overschrijding van de klassegrens resulteert in een andere fosfaatgebruiksnorm hangt af van de indeling op basis van het P-AL-getal. De fosfaatklasse 'neutraal' kent een nauwe afbakening t.o.v. de standaardafwijking van de analysemethode en wijzigt reeds indien het P-CaCl₂-getal met 0,6 of 1 eenheden wijzigt. Voor de andere fosfaatklassen moet het P-CaCl₂-getal minimaal 1,4 eenheden wijzigingen om een verandering in de fosfaatgebruiksnorm teweeg te brengen.

Voor analyse van het P-AL-getal en Pw-getal is conform het analyseprotocol¹⁰ een duploanalyse vereist voor bepaling van de fosfaattoestand, waarbij het grondmonster wordt gesplitst en het gemiddelde van beide analyses telt voor vaststelling van de fosfaatgebruiksnorm. Voor het P-CaCl₂-getal is onduidelijk of een duploanalyse vereist wordt indien het P-CaCl₂-getal dient ter vaststelling van de fosfaatgebruiksnorm. Door beide laboratoria is bevestigd dat de gerapporteerde P-CaCl₂-getallen zijn bepaald in enkelvoud.

Tabel 3.7 Gemiddelde P-CaCl₂-getal (mg P/kg) bij analyse in twee laboratoria uitgesplitst naar grondsoort en afgeleide standaardafwijking (σ) voor de inter-laboratoriumreproduceerbaarheid^a voor grondmonsters gestoken op grasland (0-10, 5-10, 10-20 en 20-30 cm).

	Lab_1	Lab_2	Standaardafwijking σ	aantal
Alle monsters	1.42	1.38	0.40	156
Klei (Waiboerhoeve)	1.37	1.40	0.17	53
Veen (Zegveld)	1.39	1.52	0.52	67
Zand (Unifarm, De Marke)	1.54	1.11	0.38	36

¹ P-CaCl₂-getallen > 5,0 mg/kg zijn buiten beschouwing gelaten omdat op basis van prestatiekenmerken van het CBLB bekend is dat de variantie bij hogere waarden toeneemt met toename van de meetgrootte.



Figuur 3.11 Plot van het P-CaCl₂-getal (mg P/kg) geanalyseerd door Eurofins Agro (Wageningen) en het Chemisch Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB, onderdeel van WUR) voor 156 grondmonsters en opgesplitst naar grondsoort (zand, veen, klei). Alle monsters zijn afkomstig van de veldproeven in Zegveld (veen), Waiboerhoeve (klei), De Marke (zand) en Unifarm (zand) en bemonsterd in 2018 en 2019. Het betreft monsters van de 0-10 cm-, 5-10 cm-, 10-20 cm- en 20-30 cm-bodemlaag. De dikke stippellijn geeft de 1:1-lijn.

¹⁰ Protocol voor de bemonstering van de bodem ter bepaling van het PAL-getal en het Pw-getal (fosfaattoestand gronden laag, neutraal, hoog; derogatie).

3.8 Synthese grasland

Inleiding

Dit rapport geeft een beknopt overzicht van de resultaten van de veeljarige veldproef op grasland op vier locaties gelegen op zand, veen en klei. De resultaten worden besproken in het kader van de overgang van de enkelvoudige indicator (P-AL-getal) naar de gecombineerde indicator (P-AL-getal en P-CaCl₂-getal) voor vaststelling van de fosfaattoestand en fosfaatgebruiksnorm op grasland. Bij de analyse is uitgegaan van de indeling in fosfaatklassen zoals met ingang van 2021 van kracht is geworden.

Op de veldproef op grasland worden de proefveldjes sinds 1996 bemest met een fosfaatgift afgestemd op de gewasafvoer (evenwichtsbemesting) en 20 en 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasafvoer. De bemesting wordt uitgevoerd met runderdrijfmest en de veldjes worden beweid. De gemiddelde fosfaatgift bij evenwichtsbemesting varieert tussen de locaties tussen 77 en 93 kg P₂O₅/ha, inclusief de (berekende) fosfaatuitscheiding van het jongvee. Het bereik aan fosfaatgiften bij de verschillende fosfaatgiften sluit aan bij het bereik van de fosfaatgebruiksnormen voor grasland in 2021 (75-120 kg P₂O₅/ha). De overschotten van 20 en 40 kg P₂O₅/ha worden gegeven in de vorm van superfosfaat met uitzondering van Heino, waar het overschot sinds 2002 wordt gegeven als natuurfosfaat (biologische bedrijfsvoering).

Temporele variatie

Zowel bij het P-AL-getal als het P-CaCl₂-getal is er sprake van temporele variatie, die aanzienlijk hoger is op veen- en kleigrond t.o.v. zandgrond. Het is onduidelijk waarom de mate van temporele variatie zoveel groter is op veen- en kleigrond ten opzichte van zandgrond. De grasproef verschilt op een aantal punten van de reguliere landbouwpraktijk. De analyse voor de veeljarige grasproeven is uitgevoerd op data van de 0-5 cm- en 5-10 cm-bodemlaag, waar in de praktijk de 0-10 cm-bodemlaag wordt bemonsterd. De 0-10 cm-bodemlaag is sinds 2018 onderdeel van de monitoring op Zegveld en Waiboerhoeve. Daarnaast worden de grasproefvelden beweid met pinken waardoor mestflatten aanwezig zijn. De proefvelden zijn echter conform de voorschriften met veertig stekken per veld bemonsterd, waardoor een effect van ruimtelijke variatie door beweiding uit zou moeten middelen. De omvang van de veldjes is klein ten opzichte van reguliere praktijkpercelen waardoor, bij een gelijk aantal stekken voor monsternamen, een lagere variatie verwacht mag worden ten opzichte van praktijkpercelen. Dit is echter niet getoetst.

In de praktijk moet iedere vier jaar middels een grondmonster de fosfaatgebruiksnorm worden vastgesteld. Bij het overschrijden van deze termijn wordt de fosfaattoestand van een landbouwperceel geclassificeerd als hoog. De gedachte hierachter is dat het systeem zelfsturend is; bij een hogere fosfaattoestand neemt de fosfaatgebruiksnorm af, wat leidt tot een daling in fosfaattoestand. De data van de veeljarige proeven laten echter zien dat veranderingen in P-AL-getal en P-CaCl₂-getal onder invloed van de fosfaatgift (0, 20 of 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking) zeer traag verlopen en binnen vier jaar geen meetbare verandering verwacht mag worden in velden die het gevolg is van een structurele trend. Er is daarentegen, met name op de veen- en kleigrondlocatie, wel sprake van verschuivingen in de fosfaatgebruiksnorm ten gevolge van temporele variatie. Met name op veengrond is deze temporele variatie in de fosfaatindicatoren groot ten opzichte van de klasse-afbakening, waardoor de indeling van de fosfaattoestand in vijf klassen een schijnnaauwkeurigheid creëert. Dit geldt voor alle grondsoorten voor de fosfaatklasse neutraal welke nauwe afbakening voor het P-CaCl₂-getal kent ten opzichte van de nauwkeurigheid waarmee het P-CaCl₂-getal kan worden vastgesteld.

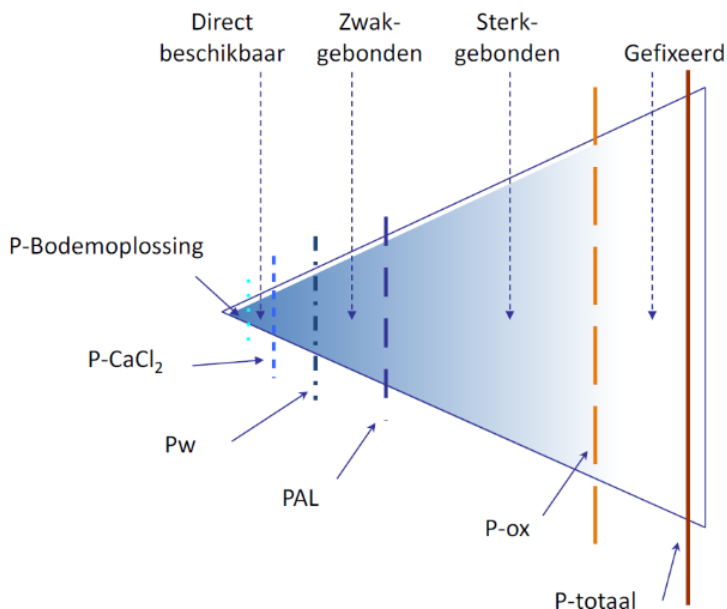
Reactie van fosfaatindicatoren op de hoogte van de fosfaatgiften

Zowel het P-AL-getal als het P-CaCl₂-getal is *gemiddeld* hoger bij een hogere fosfaatgift echter, het afleiden van trends wordt bemoeilijkt door de grote mate van temporele variatie. Hierdoor kan het voorkomen dat een veldje met een hogere fosfaatgift een lager P-AL-getal of P-CaCl₂-getal heeft t.o.v. een veldje met een lagere fosfaatgift in een aanliggend jaar. Dit ondanks het feit dat de fosfaatgiften reeds 17 tot 25 proefjaren gecontinueerd worden (de locaties op zandgrond zijn in 2012/2013 gestopt).

Op alle locaties is sprake van een statistisch significant effect van de fosfaatgift op het P-AL-getal bij gebruik van een statistisch model (REML-analyse) waarin rekening wordt gehouden met de temporele variatie en zodoende getoetst ten opzichte van de behandelingen met evenwichtsbemesting (Middelkoop et al., 2016). Echter, vanuit landbouwkundig oogpunt is een toename in het P-AL-getal pas relevant wanneer sprake is van een absolute en – in de tijd – consistente toename van het P-AL-getal. De data laten zien dat de mate van temporele variatie groter is dan de verschillen die ontstaan ten gevolge van de opgelegde fosfaatgift. Veranderingen in het P-AL-getal onder invloed van de hoogte van de fosfaatgift zijn echter traag. Uit de statistische analyse volgt dat een jaarlijkse fosfaatgift van 20 kg P₂O₅ boven de gewasonttrekking na tien jaar leidt tot een verhoging van het P-AL-getal van 2,8 tot 5 eenheden ten opzichte van een fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking. Een dergelijke toename valt echter weg tegen de onnauwkeurigheden en temporele variatie bij bepaling van het P-AL-getal, waardoor dit landbouwkundig gezien geen relevant effect teweegbrengt.

Het verhogen van de fosfaattoestand onder invloed van de fosfaatgift is daarmee een proces van de lange adem. De trage snelheden kunnen uitgelegd worden aan de hand van de grootte van de fosfaatgiften t.o.v. de grootte van de fosfaatbodemvoorraad, die op de proefpercelen circa 2000-3000 kg P₂O₅/ha bedraagt op basis van de 0-10 cm-bodemlaag. De voorraad aan P-AL-extraheerbaar fosfaat is evenwel aanzienlijk lager (200-900 kg P₂O₅/ha), echter, niet alle aangewende fosfaat komt tot uiting in een verhoging van het P-AL-getal. Bovendien wordt in de loop der tijd een deel van het P-AL-extraheerbare fosfaat omgezet naar meer stabiele fosfaatmineralen (bijvoorbeeld apatiet) of door biologische processen omgezet naar organisch fosfaat waardoor dit niet meer tot uiting komt in het P-AL-getal (Ehlert et al., 2018; Van der Salm et al., 2017). Hierdoor daalt het P-AL-getal van de bodem wanneer de fosfaatgift gelijk is aan de gewasonttrekking op de proefveldjes op zand- en veengrond. Alleen op Waiboerhoeve is sprake van een stijgend P-AL-getal bij evenwichtsbemesting, maar dit effect is vermoedelijk specifiek voor jonge zeekleigronden waar bodemvormende processen een belangrijke rol spelen en het organischestofgehalte van de bodem nog immer toeneemt (Ehlert et al., 2018). Mogelijk neemt het gras fosfaat op uit de ondergrond wat in de vorm van gewasresten (afstervende wortels) in de bovenlaag accumuleert. Een toename in het P-AL-getal op jonge zeekleigronden onder grasland is eerder aangetoond in veldproeven op grasland op jonge zeeklei (Schils en Snijders, 2004), maar tegelijkertijd is de verklaring nog onzeker, omdat op de bouwlandgronden op jonge zeeklei (paragraaf 4.1.1) juist een dalende trend in het P-AL-getal wordt geconstateerd met fosfaatgiften gelijk aan de gewasonttrekking. Op de zandgrondlocaties is een fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking (gemiddeld 81-88 kg P₂O₅/ha/jaar) niet voldoende om de fosfaattoestand ruim of neutraal over een lange termijn te handhaven.

Bij de invoering van de gecombineerde indicator werd mede beargumenteerd dat het P-CaCl₂-getal sneller reageert op de hoogte van de fosfaatgift t.o.v. het P-AL-getal. In de veeljarige veldproeven is echter geen sprake van een significante trend in het P-CaCl₂-getal bij monitoring over een periode van tien jaar (zandlocaties) en zestien jaar (veen- en kleilocatie). Het P-CaCl₂-getal is weliswaar een zeer kleine pool (Figuur 3.12) die minder dan 1% van P-totaal en minder dan 5% van het P-AL-getal extraheert. Desalniettemin verlopen veranderingen in het P-CaCl₂-getal traag, omdat deze intensiteitsindicator de resultante is van uitwisseling van fosfaat met de vaste bodemmatrix. Deze relatie kan beschreven worden met een adsorptie-isotherm (Figuur 3.10), wat illustreert dat het P-CaCl₂-getal bij lage waarden goed gebufferd wordt vanuit het uitwisselingscomplex in de bodem. Met andere woorden, bij een laag P-CaCl₂-getal is een relatief grote verhoging van de fosfaatvoorraad nodig om het P-CaCl₂-getal te verhogen. Daarnaast wordt het afleiden van een trend in het P-CaCl₂-getal bemoeilijkt door de temporele variatie. Het P-CaCl₂-getal wordt mede beïnvloed door andere factoren, waaronder de zuurgraad, calcium(Ca-)concentratie en opgeloste organische stof. Organische stof bindt evenals fosfaat aan het adsorptiecomplex (Fe_{ox}+Al_{ox}), wat leidt tot een competitie met fosfaat.



Figuur 3.12 Schematische weergave van de fosfaatfracties in de bodem en de fosfaatindicatoren.

Op de proefvelden op grasland heeft de overgang naar de gecombineerde indicator een beperkt effect op de gemiddelde hoogte van de fosfaatgebruiksnorm op de proefvelden ten opzichte van de indeling o.b.v. het P-AL-getal (2020). Op de twee proefvelden op zand is de gecombineerde indicator beter in staat om behandelingen met een verschillende bemestingshistorie te onderscheiden. Op veen en klei is er geen verschil in onderscheidend vermogen tussen de gecombineerde en enkelvoudige indicator.

Gecombineerde indicator en gewasopbrengst

Op proeflocaties Cranendonck en Zegveld, waar de fosfaattoestand op percelen met evenwichtsbemesting geclassificeerd wordt als laag/neutral, is een fosfaatgift gelijk aan de onttrekking (81-86 kg P_2O_5 /ha) niet voldoende om een (vrijwel) ongeremde groei van het gras te bewerkstelligen. Op deze locaties wordt een hogere drogestofopbrengst en hoger fosforgehalte in het gras gemeten bij een fosfaatgift van 20 of 40 kg P_2O_5 /ha boven de gewasonttrekking. Deze verschillen waren van het begin af aanwezig en nemen in de tijd niet toe. Op Waiboerhoeve wordt de fosfaattoestand gewaardeerd als 'hoog' en op deze locatie zijn geen verschillen in gewasopbrengst tussen percelen met een fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking of hoger. Op proefveldlocatie Heino zijn de fosfaatgiften sinds 2002 boven de gewasonttrekking gegeven met natuurfosfaat (biologische bedrijfsvoering) en dit gaf geen gewasreactie. In de proefopzet van de veeljarige grasproef zijn de hoogtes van de fosfaatgift en de fosfaattoestand van de bodem met elkaar verstrengeld en de proefopzet leent zich daarom niet om de gewenste fosfaatgift uit af te leiden. Er kunnen alleen uitspraken gedaan worden over de combinaties van fosfaattoestand/fosfaatgift zoals deze in de proef voorkomen.

Verdeling fosfaat over de wortelzone

De gecombineerde indicator wordt bij regulier onderzoek vastgesteld op basis van de 0-10 cm-bodemlaag. Monitoring van de grasproef laat zien dat er grote verschillen zijn in fosfaatgehalten in de bodemlagen 10-20 cm en 20-30 cm. Op de zandlocaties bijvoorbeeld is het P-AL-getal op 10-20 cm hoger dan in de bovenste bodemlaag. Een bodemmonster van de 0-10 cm-bodemlaag kan daarmee een onderschatting geven van gewas-beschikbaar fosfaat, omdat het gras ook fosfaat uit de onderliggende lagen kan benutten. Op Waiboerhoeve neemt het P-AL-getal daarentegen sterk af met de diepte. Vanwege een slechte grasmat is het perceel op de Waiboerhoeve in 2020 opnieuw ingezaaid waarvoor een oppervlakkige grondbewerking tot 10 cm is uitgevoerd en dit leidde tot lagere waarden voor het P-AL-getal en P- $CaCl_2$ -getal in het najaar 2020 ten opzichte van de voorgaande jaren. Tot op heden was geen grondkerende bewerking uitgevoerd ten tijde van de proef. Door de monitoring op Waiboerhoeve te continueren, kan uitsluitel gegeven worden over de effecten van de grondbewerking op de beschikbaarheid van fosfaat, de verdeling van fosfaat over de bodemlagen en de mineralisatie van organische stof.

In de landbouwpraktijk is geen kennis over de verdeling van fosfaat in de bodemlagen in de eigen percelen, terwijl dit zinvol kan zijn bij het nemen van beslissingen omtrent bewerkingsdiepte bij herinzaai. Indien de fosfaattoestand in bodemlaag 10-30 cm hoger is dan in 0-10 cm, is een grondkerende bewerking zinvol, omdat daarmee de fosfaattoestand in de bovenlaag wordt verhoogd. Bij een lage fosfaattoestand in de 10-30 cm-laag – zoals op Waiboerhoeve en Zegveld – is daarentegen een oppervlakkige bewerking aan te bevelen. Verder onderzoek en communicatie naar de praktijk is het nodig om praktische adviezen te geven omtrent de uitvoering van een kerende grondbewerking in relatie tot de herverdeling van fosfaat over de wortelzone. Hierbij moeten ook effecten op mineralisatie van organische stof beschouwd worden.

Gecombineerde indicator en fosfaatuitspoeling

Binnen het tijdsbestek van de veeljarige veldproef was de hoogte van de fosfaatgift van invloed op de hoogte van de fosfaatconcentratie in de 0-5 cm-bodemlaag, maar niet in de onderliggende lagen (Ehlert et al., 2018). Uit de eerdere analyse (Ehlert et al., 2018) blijkt tevens dat op de zandgronden fosfaatconcentraties tot 0,2 mg P-PO₄ in het bodemvocht voorkomen aan de onderzijde van de graszode (20-30 cm). Dit kan verklaard worden door een hoge fosfaattoestand in die bodemlagen als gevolg van hoge historische fosfaatgiften en kerende grondbewerkingen. Op de veen- en kleigronden is het fosfaatgehalte in de bodem op 20-30 cm laag, evenals de P-PO₄-concentraties in het bodemvocht. Fosfaat kan uitspoelen in de vorm van P-PO₄ of in de vorm van colloïdaal fosfaat¹¹ en opvallend is dat bodemvochtmonsters uit de proefveldjes op gras hoge concentraties colloïdaal fosfaat bevatten, terwijl colloïdaal fosfaat nauwelijks een rol speelt op de bouwlandproeven. In hoeverre dit samenhangt met de keuze voor de bemonsteringsmethode (uitslingeren van grond op grasland versus kunstwortels op bouwland) is in de periode 2019-2021 onderzocht en wordt later gerapporteerd. In dit rapport is gekeken naar de relatie tussen de fosfaatconcentratie in het bodemvocht en de hoogte van de fosfaatindicatoren. Op basis van gemiddelde P-PO₄-concentraties in bodemvocht blijkt dat het P-AL-getal (kromme lijn) een hoger aandeel van de variantie verklaart ten opzichte van het P-CaCl₂-getal (lineaire relatie).

3.9 Conclusies grasland

Op grasland is de fosfaattoestand van de bodem sinds 1996 gemonitord op vier proefvelden op veen-, klei- en zandgrond waarbij de fosfaatgift is afgestemd op de gewasonttrekking of 20 of 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking.

Ten tijde van de start van de grasproef was 0-5 cm de aangewezen bemonsteringsdiepte op grasland. In de grasproef worden zodoende de 0-5 cm- en de 5-10 cm-bodemlaag bemonsterd; de bemonsteringsdiepte wijkt daarmee af van de huidige voorgeschreven bemonsteringsdiepte voor grasland (0-10 cm). Met name op de veen- en kleigrondlocatie heeft de keuze voor de bemonsteringsdiepte een grote invloed op de hoogte van de fosfaatindicatoren. Voor deze proefveldlocaties gaf bemonstering van de 0-5 cm-bodemlaag hogere waarden voor de fosfaatindicatoren ten opzichte van de 0-10 cm-bodemlaag en zodoende is de evaluatie uitgevoerd met een focus op de data van de 5-10 cm-bodemlaag. Op zandgrond is fosfaat meer uniform in de bovengrond verdeeld als gevolg van grondkerende bewerkingen voor de aanvang van de proef, waardoor de keuze van de bemonsteringsdiepte (0-10 cm, 0-5 of 5-10 cm) minder van invloed is op de hoogte van de fosfaatindicatoren.

Zowel het P-AL-getal als het P-CaCl₂-getal reageert traag op de hoogte van de fosfaatgift. Het P-AL-getal reageert op de hoogte van de fosfaatgift, echter, de temporele variatie in het P-AL-getal is groot ten opzichte van de trend als gevolg van verschillen in de fosfaatgift. Bij een fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking is op de zand- en veenlocatie sprake van een dalende trend in het P-AL-getal door omzetting van fosfaat naar andere fosfaatvormen die niet tot uiting komen in het P-AL-getal. Hier is een fosfaatgift boven de gewasonttrekking nodig om het P-AL-getal op peil te houden. Het P-CaCl₂-getal was vanaf 2004 onderdeel van de jaarlijkse monitoring. In de periode waarin het P-CaCl₂-getal gemonitord is (9-14 jaar), kon geen trend in het verloop van P-CaCl₂-getal worden afgeleid onder

¹¹ Colloïdaal fosfaat is gedefinieerd als het verschil tussen totaal-P en ortho-P (P-PO₄) in het watermonster.

invloed van de hoogte van de fosfaatgift. Het P-CaCl₂-getal reageert niet sneller op verschillen in de hoogte van de fosfaatgift ten opzichte van het P-AL-getal.

Er zijn geen grote veranderingen in de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm bij de overgang van de enkelvoudige indicator P-AL-getal naar de gecombineerde indicator P-AL-getal en P-CaCl₂-getal.

Temporele variatie is een aandachtspunt, met name op veen- en kleigronden. De afbakening van fosfaatklassen, met name klasse 'neutraal', is nauw ten opzichte van de nauwkeurigheid waarmee fosfaatindicatoren kunnen worden vastgesteld. Dit leidt tot schommelingen in de fosfaatgebruiksnorm, zonder dat daarbij sprake is van een trend. Op zandgrond is de gecombineerde indicator beter in staat om veldjes met een verschillende bemestingshistorie te onderscheiden ten opzichte van de enkelvoudige parameter P-AL-getal. Op veen- en kleigrond was er geen verschil in het onderscheidend vermogen van de enkelvoudige versus de gecombineerde indicator.

Verschillen in de fosfaattoestand van het gewas en de hoogte van de fosfaatgift (beide factoren zijn in de proefopzet met elkaar verstrengeld) komen tot uiting in het fosforgehalte van het gras. Op de kleilocatie waar de fosfaattoestand gewaardeerd is als 'hoog' leidt een fosfaatgift boven de gewasonttrekking niet tot een hogere opbrengst of hoger fosforgehalte in het gras, terwijl dit wel het geval is op proefveldjes op de veen- en zandlocatie met een fosfaattoestand 'laag' of 'neutraal'. Bij grasland kan daarnaast de fosfaatbeschikbaarheid in de bodemlaag onder 0-10 cm een rol spelen in de fosfaatopname door het gras. Dit komt niet tot uiting in de fosfaatindicatoren.

4 Gecombineerde indicator & bouwland

4.1 Trends in fosfaattoestanden

4.1.1 Lelystad (jonge zeeklei)

De proef kent acht behandelingen bestaande uit vier niveaus voor de initiële fosfaattoestand (P1, P2, P3, P4) gecombineerd met uitmijnen (0 P₂O₅/ha) of fosfaatbemesting. De verschillen in de initiële fosfaattoestanden zijn ontstaan door in de periode 1987-1990 verschillende fosfaatgiften op te leggen. Vanaf 1990 is de fosfaatgift ongewijzigd gebleven, er zijn behandelingen met 0, 70, 140 of 280 P₂O₅/ha/jaar. Sinds 2005 zijn de veldjes opgesplitst, waarbij één helft de behandeling 'uitmijnen' kreeg en op de andere helft de fosfaatgift van 70, 140 of 280 P₂O₅/ha/jaar werd gecontinueerd. Nadien zijn geen wijzigingen aangebracht in de jaarlijkse fosfaatgift. De fosfaatgift wordt gegeven met tripelsuperfosfaat.

Figuur 4.1 toont het verloop in het Pw-getal, P-AL-getal en P-CaCl₂-getal, gemiddeld over vier herhalingen. Tabel 4.1 geeft het verloop in de fosfaatgebruiksnorm – voor de individuele veldjes – op basis van de enkelvoudige indicator Pw-getal (indeling 2020) en de gecombineerde indicator P-AL-getal en P-CaCl₂-getal (indeling 2021).

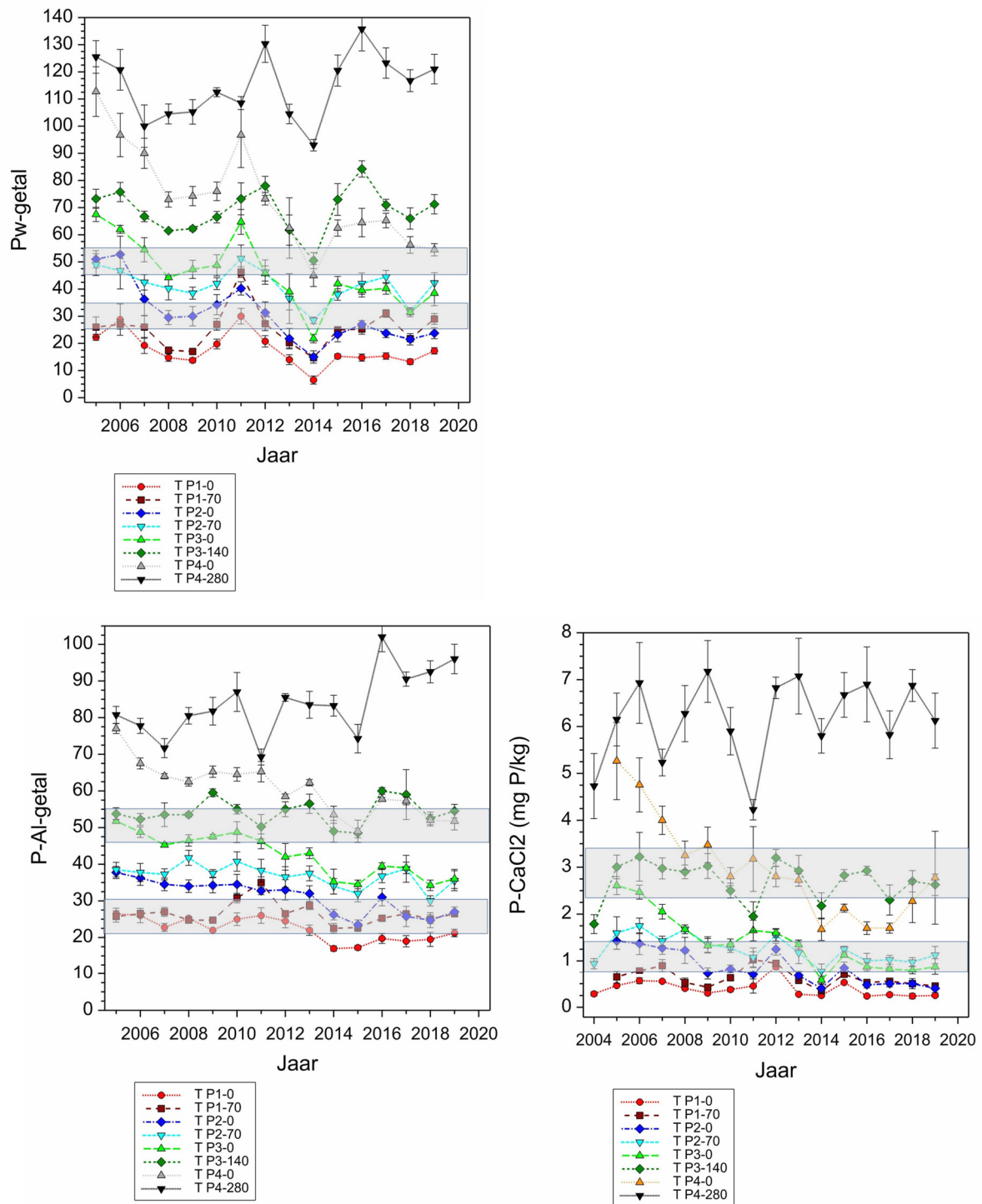
Het Pw-getal toont een dalende trend indien geen fosfaatbemesting wordt toegepast. De daling is sterker bij een hogere initiële fosfaattoestand. In veldjes die sinds 1990 een gelijke fosfaatgift ontvangen, is het Pw-getal gestabiliseerd. Bij een fosfaatgift van 70 kg P₂O₅/ha stabiliseert het Pw-getal zich tussen 35 en 49 mg P₂O₅/l en bevindt zich daarmee overwegend in klasse 'neutraal'. Deze situatie is daarmee representatief voor de praktijk waar een fosfaatgebruiksnorm van 70 kg P₂O₅/ha geldt bij een neutrale fosfaattoestand (2020). Het Pw-getal toont een grote variatie in de tijd. Uitschieters in het Pw-getal treden veelal gelijktijdig op bij alle behandelingen en dit kan wijzen op effecten door verschillen in het vochtgehalte van de bodem tijdens en voorafgaand aan de bemonstering en/of jaarlijkse verschillen in fosfaatafvoer door de teelt van jaarlijks verschillende gewassen. Dit leidt tevens tot fluctuaties in de fosfaatgebruiksnorm wanneer deze wordt afgeleid op basis van het Pw-getal (Tabel 4.1), die in de regel niet meer dan één klasse ten opzichte van het voorgaande jaar en in uitzonderlijke gevallen (jaargang 2014) twee klassen wijzigt t.o.v. het voorgaande jaar.

Ook het P-AL-getal en het P-CaCl₂-getal stabiliseren zich op een redelijk vast niveau bij een gelijke fosfaatgift sinds 1990. Een fosfaatgift van 70 kg P₂O₅/ha/jaar is voldoende om het P-AL-getal tussen een laag niveau van 20-30 mg P₂O₅/100 gram te handhaven (behandeling P1-70), maar is echter niet voldoende om het P-AL-getal op neutraal niveau van 40 mg P₂O₅/100 gram te handhaven (behandeling P2-70). Bij bemesting met 140 kg P₂O₅/ha op veldjes met een initieel hoog P-AL-getal blijft het P-AL-getal gehandhaafd. Bij uitmijnen tonen het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal een dalende trend en de daling is sterker bij een hogere initiële fosfaattoestand. Dit kan verklaard worden door omzetting van fosfaat naar andere vormen welke niet tot uiting komen in de P-AL-indicator. Eerder onderzoek naar fosfaatvormen op deze veldproef wijst uit dat er slecht oplosbare fosfaatvormen aanwezig zijn, mogelijk door precipitatie met calcium (Ehlert et al., 2018). Verschillen in veldjes met uitmijnen versus fosfaatbemesting komen sneller tot uiting in het P-AL-getal dan in het P-CaCl₂-getal. Het P-CaCl₂-getal kent een hogere bufferende werking in deze bodems. Na veertien jaar zijn P-CaCl₂-getallen op percelen met uitmijnen niet onderscheidenlijk van percelen met een fosfaatgift van 70 kg P₂O₅/ha.

Bij een fosfaatgift van 70 kg P₂O₅/ha (P2-70) fluctueert het P-AL-getal rond een waarde passend bij een neutrale fosfaattoestand (30-45 mg P₂O₅/100 g), terwijl het P-CaCl₂-getal bij deze fosfaatgift laag blijft (<1,4 mg P/kg) waardoor de fosfaattoestand als 'laag' wordt beoordeeld op basis van de gecombineerde indicator. (Tabel 4.1). De veldproef in Lelystad kent een groot bereik in fosfaattoe-

standen en voor alle behandelingen geldt dat de fosfaatgebruiksnorm bij overgang naar de gecombineerde indicator toeneemt of gelijk blijft aan de fosfaatgebruiksnorm volgens de indeling op basis van het Pw-getal in 2020. Op percelen met een jaarlijkse fosfaatgift van 70 kg P₂O₅ verschuift hierdoor de fosfaatgebruiksnorm van 70-80 kg P₂O₅/ha naar 120 kg P₂O₅/ha. Dat wil zeggen dat een fosfaatgift van 70 kg P₂O₅/ha/jaar – gelijk aan de fosfaatgebruiksnorm bij een neutrale fosfaattoestand – op deze grondsoort niet voldoende is om de fosfaattoestand in klasse 'neutraal' te handhaven. Bij een jaarlijkse fosfaatgift van 140 kg P₂O₅/ha wordt de fosfaattoestand wel gehandhaafd in klasse 'neutraal' of hoger bij beoordeling o.b.v. de gecombineerde indicator.

De temporele variaties in het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal zijn beperkter t.o.v. het Pw-getal. Bij de overgang van naar de gecombineerde indicator neemt de mate van temporele variatie in de fosfaatgebruiksnorm af ten opzichte van de beoordeling op basis van het Pw-getal. Desondanks is ook bij de gecombineerde indicator sprake van fluctuaties in de fosfaatgebruiksnorm. Bij behandeling 140-P3 bijvoorbeeld is de mate van temporele variatie in de fosfaatgebruiksnorm hoog en deze fluctuaties zijn het gevolg van zowel temporele variatie in het P-AL-getal als P-CaCl₂-getal. Doordat beide fosfaatindicatoren met elkaar correleren (een uitschieter naar een hoger P-AL-getal gaat gepaard met een gelijktijdige uitschieter naar een hoger P-CaCl₂-getal en vice versa), heeft dit een versterkend effect op de afleiding van de fosfaatgebruiksnorm.

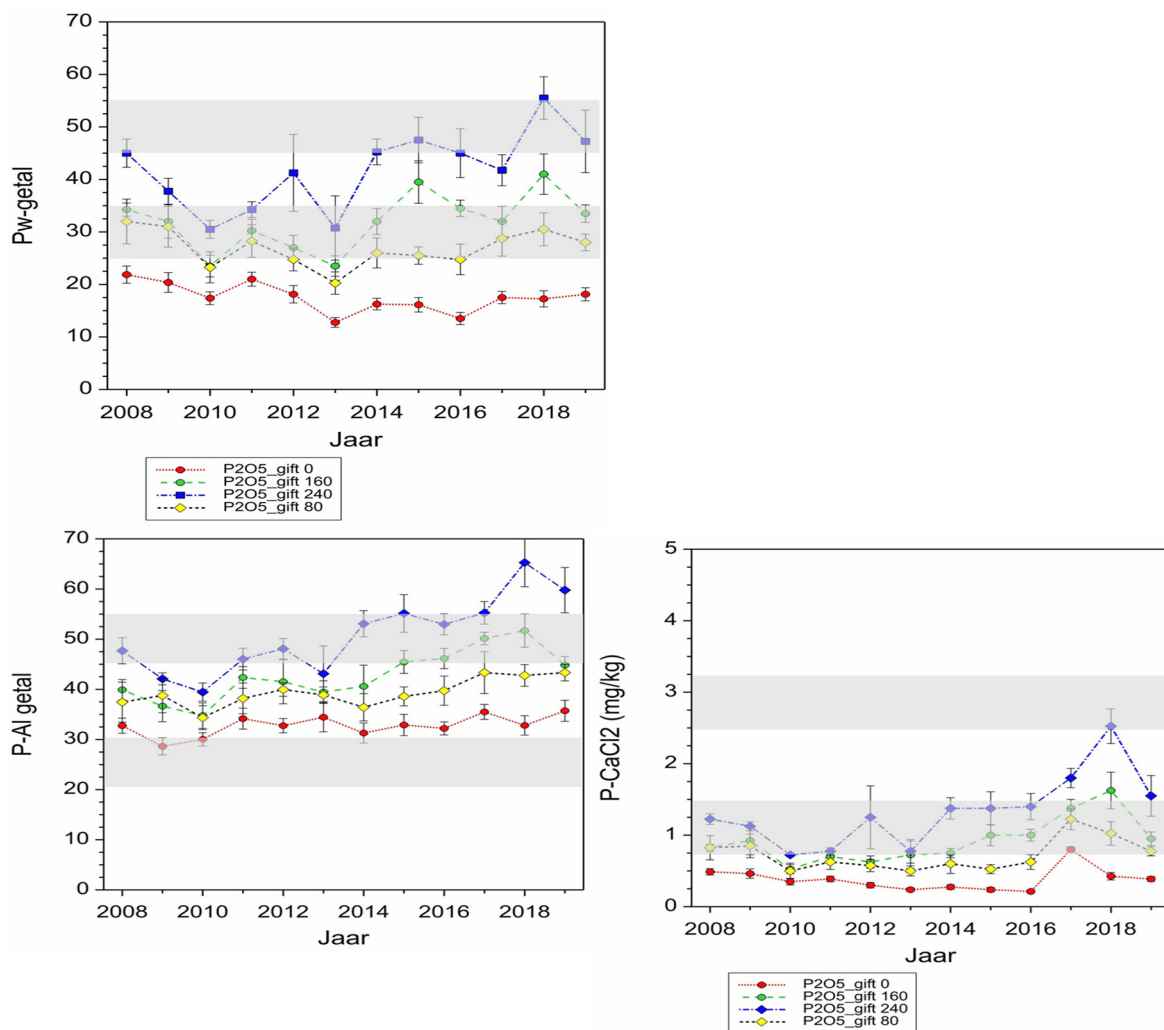


Figuur 4.1 Verloop van het Pw-getal (mg P₂O₅/L), P-AL-getal (mg P₂O₅/100 g) en P-CaCl₂-getal (mg P/kg) in de bouwvoor van de bouwlandproef op Lelystad bij bemesting met 0 of 70, 140 of 280 kg P₂O₅/ha op percelen met vier niveaus voor de verschillende initiële fosfaatstatus (P1, P2, P3, P4). De proef is uitgevoerd met vier herhalingen en de foutbalkjes geven de standaardfout. De grijze arceringen komen overeen met de grenzen van de fosfaatklassen in 2020 (Pw-getal) en 2021 (gecombineerde indicator).

Opvallend is dat percelen die sinds 1972 bemest worden met 160 en 240 kg P_2O_5 /ha/jaar, deels nog immer in de fosfaattoestand 'arm' vallen in de periode 2008-2019. Bij gebruik van het Pw-getal vallen deze percelen in een hogere fosfaattoestand. De gecombineerde indicator is daarmee minder gevoelig voor de bemestingshistorie en reageert trager op hoge fosfaatgiften resulterend in hogere fosfaatoverschotten in vergelijking met het Pw-getal. Dit wordt verklaard door de lage P-CaCl₂-waarden die ook bij fosfaatgiften van 160 en 240 kg P_2O_5 /ha/jaar onder de waarde van 1,4 mg/kg blijven, m.u.v. de jaren na 2015. Bij deze hoge fosfaatgiften is wel een toenemende trend in fosfaattoestand te zien en het P-AL-getal is in een periode van elf jaar met ongeveer tien eenheden toegenomen. Een lager P-CaCl₂-getal is een intrinsieke eigenschap van het extractiemiddel calciumchloride, dat de oplosbaarheid van bodemfosfaat in water onderdrukt in bodems die kalk bevatten.

Bij de hoge fosfaatgiften treden jaar-op-jaar verschuivingen op tussen fosfaatgebruiksnormen 60, 70 en 80 kg P_2O_5 /ha zonder dat deze verschuivingen passen binnen een trend. Opvallend is daarbij jaargang 2018, waarin de fosfaattoestand op de veldjes met 240 kg P_2O_5 /ha/jaar toeneemt tot klasse hoog (40 kg P_2O_5 /ha), doordat zowel het P-AL-getal als P-CaCl₂-getal dat jaar hoger is dan in de voorgaande jaren en het navolgende jaar (Figuur 4.3)

Bij de fosfaattoestand 'arm' is nauwelijks sprake van schommelingen in de fosfaattoestand; dit is het gevolg van de grote bandbreedte in P-CaCl₂-getal bij klasse 'arm' (<1,4 of 2,4 mg P/kg), gecombineerd met het feit dat het P-CaCl₂-getal juist bij lage waarden stabiel is en zodoende minder fluctuaties vertoont in vergelijking met hogere P-CaCl₂-waarden.



Figuur 4.2 Verloop in het Pw-getal, P-AL-getal en P-CaCl₂-getal in de bouwvoor van de bouwlandproef op Marknesse bij bemesting met superfosfaat (0, 80, 160, 240 kg P_2O_5 /ha). Datapunten geven het gemiddelde van vier herhalingen. De grijze arcering toont de klassegrenzen voor de fosfaattoestand op basis van de gecombineerde indicator (indeling 2021).

Tabel 4.2 Fosfaatgebruiksnorm bij fosfaatgiften van 0, 80, 160 en 240 kg P₂O₅/ha/jaar op de veldproef in Marknesse o.b.v. het Pw-getal (2020) en de gecombineerde indicator (voorstel 2021). Er zijn vier herhalingen per fosfaatgift en acht herhalingen bij de gift van 0 kg P₂O₅/ha.

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v het **Pw-getal (2020)**

herhaling:	0 P ₂ O ₅ /ha/jaar								80				160				240			
	1	7	10	16	20	22	27	29	4	13	23	26	5	12	24	25	2	14	19	31
2008	80	120	80	120	120	120	120	120	80	70	80	120	80	70	80	70	60	70	60	60
2009	80	120	80	120	120	120	120	120	80	70	80	120	80	70	80	80	70	70	80	70
2010	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	120	80	120	120	80	80	80	80
2011	80	120	80	120	120	120	120	120	80	70	80	120	120	80	80	80	70	80	80	70
2012	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	120	80	80	80	60	120	40	70
2013	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	120	80	120	120	80	120	70	70
2014	120	120	120	120	120	120	120	120	80	80	120	120	80	70	80	80	60	70	60	60
2015	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	80	120	70	70	80	60	60	70	40	60
2016	120	120	120	120	120	120	120	120	80	80	80	120	80	70	70	80	60	70	70	40
2017	120	120	120	120	120	120	120	120	70	80	120	80	80	80	80	70	70	80	70	60
2018	120	120	120	120	120	120	120	120	80	70	80	120	80	60	60	70	40	60	60	40
2019	120	120	120	120	120	120	120	120	80	80	120	80	80	80	80	70	70	70	70	40
Gem.	110	120	110	120	120	120	120	120	93	77	100	113	93	74	84	82	65	80	65	60

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v de **gecombineerde indicator (2021)**

herhaling	0 P ₂ O ₅ /ha/jaar								80				160				240			
	1	7	10	16	20	22	27	29	4	13	23	26	5	12	24	25	2	14	19	31
2008	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	120	120	120	120	70	120	120	80
2009	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	120	120	80	120	120	120	120	120
2010	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
2011	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	80	120	120	120	120	120	80	80
2012	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	80	120	60	80
2013	80	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	80
2014	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	80	120	70	60
2015	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	70	60	120	60	80
2016	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	120	80	80	120	60	80	80	60
2017	120	120	120	120	120	120	120	120	70	80	120	120	80	70	80	70	60	70	60	70
2018	120	120	120	120	120	120	120	120	120	70	120	120	120	60	70	80	40	60	40	40
2019	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120	120	80	120	80	70	80	80	40
Gem.	117	120	120	120	120	120	120	120	116	96	120	120	113	91	109	105	83	104	81	76

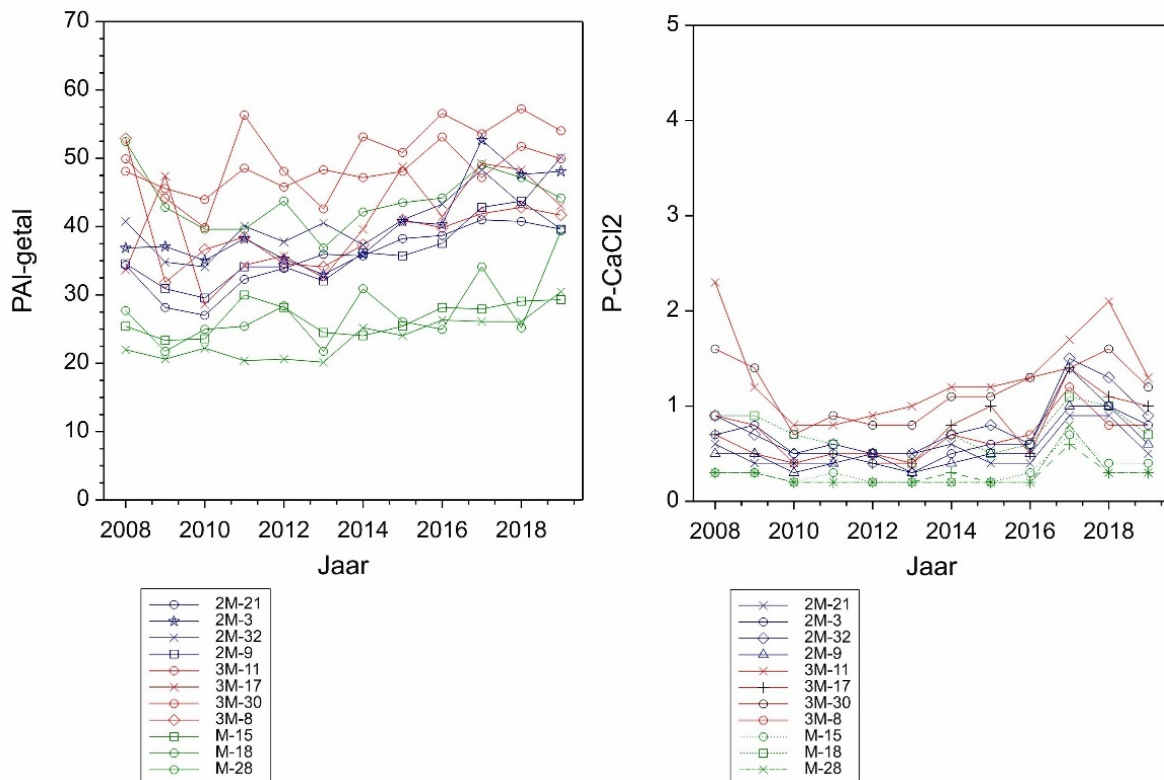
4.1.2.2 Marknesse: Behandelingen met strikte evenwichtsbemesting

In het tweede deel van de veldproef op Marknesse wordt sinds 1990 bemest met een fosfaatgift gelijk aan de fosfaatopname van het gewas in het voorgaande jaar (strikte evenwichtsbemesting, aangeduid als M). De gemiddelde fosfaatafvoer en daardoor fosfaatgift in de periode 2008-2019 bedroeg 50 kg P₂O₅/ha/jaar. Daarnaast is er een behandeling met een dubbele fosfaatgift (2M, 100 kg P₂O₅/ha gemiddeld over de periode 2008-2019) en een driedubbele fosfaatgift (3M, 150 kg P₂O₅/ha over genoemde periode). Deze huidige fosfaatbehandelingen worden gegeven sinds 1990. De data in dit rapport beperken zich tot de periode vanaf 2008, omdat vanaf dat moment het P-CaCl₂-getal jaarlijks is gemonitord. Per behandeling zijn er vier percelen die door de historische fosfaatbemesting (eerdere en opgeheven fosfaatbehandelingen) variëren in de initiële fosfaattoestand en daarom als afzonderlijke lijnen getoond zijn in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

Fout! Verwijzingsbron niet gevonden. toont een stijgende trend in het P-AL-getal bij behandelingen 2M en 3M (100 en 150 kg P₂O₅/ha/jaar). Bij evenwichtsbemesting wordt het P-AL-getal gehandhaafd tussen een waarde van 20 tot 30 g P₂O₅/100 g. Een van de veldjes bij evenwichtsbemesting kent een hoger P-AL-getal als gevolg van verschil in bemestingshistorie.

Opvallend is dat het P-AL-getal meer onderscheidend is tussen de percelen en behandelingen dan het P-CaCl₂-getal, dat grotendeels onder de grens van 1,4 mg/kg blijft waardoor de fosfaattoestand in de

klasse 'arm' blijft voor P-AL-getallen tot 46 mg P₂O₅/100 g. Twee van de vier percelen die sinds 1990 bemest worden met 150 kg P₂O₅/ha, zijn 29 jaar later o.b.v. het P-CaCl₂-getal nog niet te onderscheiden van percelen die over dezelfde periode 50 of 100 kg P₂O₅/ha ontvingen. Op deze grondsoort is het P-AL-getal een gevoeligere indicator die sterker reageert op de verschillen in de hoogte van de fosfaatgiften.



Figuur 4.3 Verloop in P-AL-getal (mg P₂O₅/100 g) en P-CaCl₂-getal (mg P/kg) bij strikte evenwichtsbemesting (M, 50 kg P₂O₅/ha (groen)) en een dubbele fosfaatgift (2M, 100 kg P₂O₅/ha, (blauw)) en driedubbele fosfaatgift (3M, 150 kg P₂O₅/ha (rood)). Per fosfaatgift zijn er vier veldjes die door bemestingshistorie verschilden in initiële P-toestand bij aanvang van deze proef. Iedere lijn geeft het verloop op één veld. De fosfaatgiften zijn toegepast sinds 1990; dat is getoond vanaf 2008, omdat vanaf dat jaar het P-CaCl₂-getal is opgenomen als onderdeel van de monitoring.

Tabel 4.3 Fosfaatgebruiksnorm op basis van het Pw-getal (2020) en de gecombineerde indicator (2021) bij strikte evenwichtsbemesting (M = 50 kg P₂O₅/ha), tweemaal M (100 kg P₂O₅/ha) en driemaal M (150 kg P₂O₅/ha) op de proeflocatie in Marknesse. Per behandeling zijn er vier veldjes met een gelijke fosfaatgift, maar met een verschillende initiële fosfaattoestand door verschillen in bemestingshistorie. Veldjesnummers (veld nr.) worden gegeven.

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v het Pw-getal (2020)

Veld nr.	M (50)				2M (100)				3M (150)			
	6	15	18	28	3	9	21	32	8	11	17	30
2008	120	120	70	120	80	120	80	70	70	40	80	60
2009	120	120	80	120	80	120	120	80	80	70	120	70
2010	120	120	80	120	120	120	120	120	120	80	120	80
2011	120	120	80	120	80	120	120	80	80	70	120	70
2012	120	120	80	120	120	120	120	80	120	80	120	70
2013	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	80
2014	120	120	80	120	80	120	80	80	80	70	80	70
2015	120	120	80	120	80	80	120	70	80	70	70	70
2016	120	120	80	120	80	120	120	80	80	70	120	70
2017	120	120	80	120	70	80	120	70	80	70	70	80
2018	120	120	80	120	80	80	80	70	80	40	80	70
2019	120	120	80	120	80	80	120	80	80	70	80	70
Gem.	120	120	83	120	89	107	110	83	89	68	98	72

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v de gecombineerde indicator (2021)

Veld nr.	M (50)				2M (100)				3M (150)			
	6	15	18	28	3	9	21	32	8	11	17	30
2008	120	120	80	120	120	120	120	120	80	70	120	70
2009	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	80
2010	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
2011	120	120	120	120	120	120	120	120	120	70	120	80
2012	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	120
2013	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80
2014	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	120	80
2015	120	120	120	120	120	120	120	120	120	80	80	80
2016	120	120	120	120	120	120	120	120	120	70	120	80
2017	120	120	80	120	70	120	120	70	120	70	70	70
2018	120	120	80	120	80	120	120	120	120	60	80	70
2019	120	120	120	120	80	120	120	80	120	80	120	80
Gem.	120	120	110	120	109	120	120	113	117	85	106	84

4.1.3 Wijster (zandgrond) fosfaathoeveelheden fosfaatvormen veldproef

Figuur 4.4 geeft het verloop in Pw-getal, P-AL-getal en P-CaCl₂-getal op het proefveld te Wijster bij bemesting met superfosfaat in giften van 0, 45, 90 en 180 tot 240 kg P₂O₅/ha. De fosfaatbehandelingen zijn sinds 1972 ongewijzigd. De figuren tonen het verloop in de fosfaatindicatoren vanaf 2008, omdat sindsdien het P-CaCl₂-getal in de monitoring is opgenomen. In de figuren is de gemiddelde waarde voor twee herhalingen gegeven.

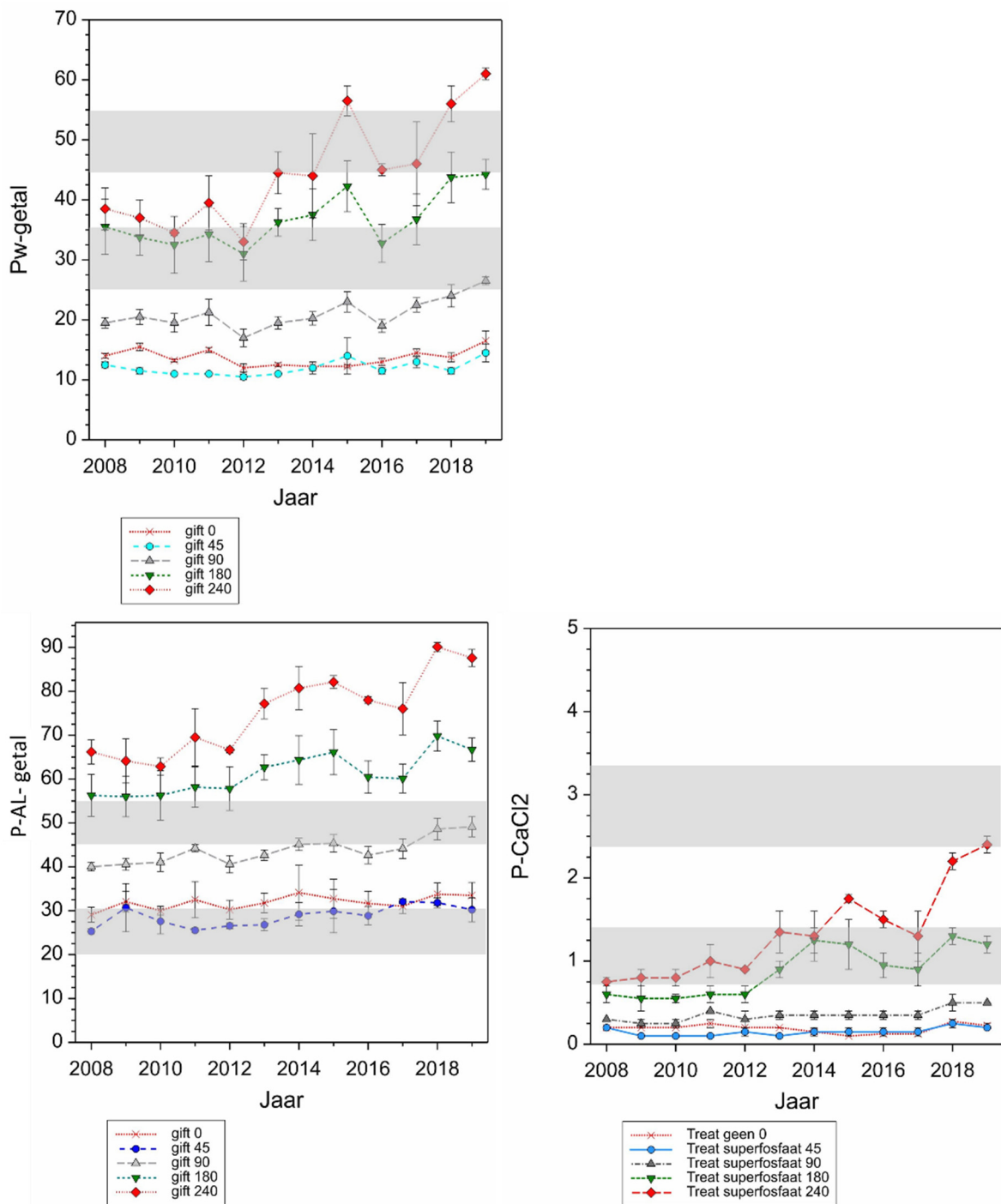
Tabel 4.4 toont het verloop in fosfaatgebruiksnormen o.b.v. het Pw-getal (2020) en de gecombineerde indicator (voorstel 2021), weergegeven per individueel veldje om tevens de variatie tussen herhalingen te duiden.

Zowel het Pw-getal als het P-AL-getal toont een toename in de tijd bij jaarlijkse fosfaatgiften van 90, 180 en 240 kg P₂O₅/ha. Het P-CaCl₂-getal neemt in de tijd toe bij de twee hoogste giften (180 en

240 kg P₂O₅/ha) en blijft bij 90 kg P₂O₅/ha constant. Bij de lage fosfaatgiften (uitmijnen en 45 kg P₂O₅/ha) treden geen veranderingen op in de fosfaatindicatoren binnen de looptijd van de monitoring. Het P-AL-getal en het Pw-getal zijn beter in staat om veldjes met een verschillende fosfaatgift te onderscheiden – met name het verschil tussen de behandelingen met 45 en 90 kg P₂O₅/ha – ten opzichte van het P-CaCl₂-getal. Het P-CaCl₂-getal is niet in staat om velden die sinds 1972 een fosfaatgift van 45 of 90 kg P₂O₅/ha hebben ontvangen van elkaar te onderscheiden en het onderscheidend vermogen van het P-CaCl₂-getal is daarmee beperkt t.o.v. het Pw-getal en het P-AL-getal.

Zowel het Pw-getal, het P-AL-getal als het P-CaCl₂-getal toont bij de hoogste fosfaatgiften een hogere mate van temporele variatie. Op percelen met een lagere fosfaatgift (uitmijnen of 45 of 90 kg P₂O₅/ha) is het verloop van de fosfaatindicatoren in de tijd aanzienlijk stabiel. Bij gebruik van de enkelvoudige indicator Pw-getal komen temporele schommelingen in de fosfaatgebruiksnormen frequenter voor dan bij gebruik van de gecombineerde indicator. Bij lage fosfaattoestanden wordt de fosfaatconcentratie in de bodem beter gebufferd door adsorptie/desorptie, waardoor met name de direct beschikbare fosfaatfractie minder variatie toont in de analyse.

Bij de overgang naar de gecombineerde indicator wordt de fosfaattoestand op enkele percelen hoger gewaardeerd dan bij gebruik van de enkelvoudige indicator, waardoor de fosfaatgebruiksnorm afneemt. Dit effect doet zich voor op veldjes met een fosfaatgift van 90 kg P₂O₅. Bij de andere fosfaatbehandelingen is geen sprake van een verandering in de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm bij de overgang naar de gecombineerde indicator. De verschuiving naar een hoog P-AL-getal wordt gecompenseerd door een laag P-CaCl₂-getal, waardoor de waardering in een gelijke klasse valt. Bij de behandeling met 90, 180 en 240 kg P₂O₅/ha neemt de fosfaattoestand binnen de monitoringsperiode toe. Bij een fosfaatgift van 45 kg P₂O₅/ha blijft de fosfaattoestand 'arm' gehandhaafd.



Figuur 4.4 Verloop van het P-getal, PAL-getal en P-CaCl₂-getal in de periode 2008-2019 op de bouwlandproef in Wijster (zandgrond) bij behandelingen met een oplopende fosfaatdosering in de vorm van superfosfaat. De datapunten geven het gemiddelde van twee herhalingen en de foutenbalken geven de standaardfout. De grijs gearceerde gebieden geven de klassegrenzen weer voor bepaling van de fosfaattoestand o.b.v. het Pw-getal (2020) en de gecombineerde indicator (indeling volgens voorstel voor 2021).

Tabel 4.4 Verloop in de fosfaatgebruiksnorm o.b.v. het Pw-getal (boven) en de gecombineerde indicator (onder) op individuele veldjes op de veldproef in Wijster bij bemestingen van 0, 45, 90, 180 en 240 kg P₂O₅/ha in tweevoud.

Fosfaatgebruiksnorm per veldje o.b.v. het Pw-getal (2020)

P2O5 gift:	0		45		90		180		240	
Herhaling:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2008	120	120	120	120	120	120	70	80	70	70
2009	120	120	120	120	120	120	80	80	70	80
2010	120	120	120	120	120	120	80	120	70	80
2011	120	120	120	120	120	120	80	120	70	70
2012	120	120	120	120	120	120	80	120	70	80
2013	120	120	120	120	120	120	80	80	60	70
2014	120	120	120	120	120	120	70	80	60	70
2015	120	120	120	120	120	80	60	70	60	40
2016	120	120	120	120	120	120	80	80	60	70
2017	120	120	120	120	120	80	80	70	70	60
2018	120	120	120	120	120	80	70	70	60	40
2019	120	120	120	120	80	80	70	70	40	40
gemiddelde	120	120	120	120	117	107	75	87	63	64

Fosfaatgebruiksnorm per veldje o.b.v. de geombineerde indicator (2021)

P2O5 gift:	0		45		90		180		240	
Herhaling:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2008	120	120	120	120	120	120	80	80	70	80
2009	120	120	120	120	120	120	80	120	70	80
2010	120	120	120	120	120	120	80	120	70	80
2011	120	120	120	120	120	80	80	80	70	70
2012	120	120	120	120	120	80	80	120	70	70
2013	120	120	120	120	120	80	70	70	60	70
2014	120	120	120	120	80	80	70	70	60	70
2015	120	120	120	120	120	80	60	70	60	60
2016	120	120	120	120	120	80	70	80	60	60
2017	120	120	120	120	120	80	80	70	70	60
2018	120	120	120	120	80	80	60	70	60	60
2019	120	120	120	120	80	80	70	70	40	60
gemiddelde	120	120	120	120	110	90	73	85	63	68

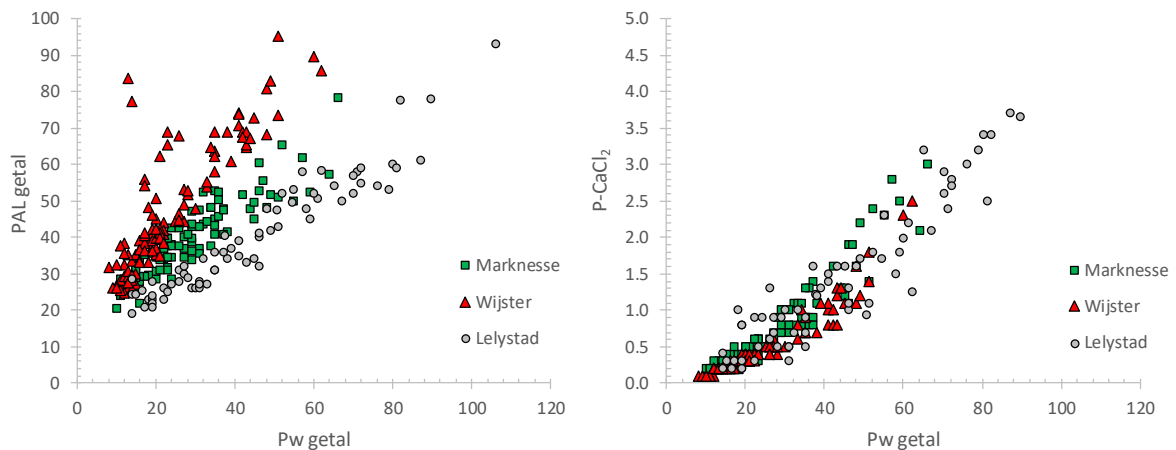
4.2 Relaties tussen fosfaatindicatoren

Figuur 4.5 toont de relatie tussen het Pw-getal met het P-AL-getal en het P-CaCl₂-getal. Binnen de proeflocaties is het Pw-getal sterk gecorreleerd met zowel het P-AL-getal als het P-CaCl₂-getal. De relatie tussen het Pw-getal en het P-AL-getal is locatiespecifiek en bij een gelijk Pw-getal neemt het P-AL-getal toe in de volgorde: Lelystad < Marknesse < Wijster. Op de zavelgronden in Lelystad en Marknesse komt een deel van de fosfaatgift niet tot uiting in P-AL-extraheerbaar fosfaat, mogelijk door omzetting naar andere stabiele fosfaatvormen (Ehlert et al., 2018). Voor Wijster is een cluster van datapunten te zien, dat afwijkt van de lineaire trend (hogere P-AL-getallen); dit zijn datapunten van percelen die bemest worden met Hyperfoskali, een natuurfosfaat dat wel bijdraagt aan de verhoging van het P-AL-getal, maar niet tot uiting komt in het Pw-getal of P-CaCl₂-getal (Ehlert et al.,

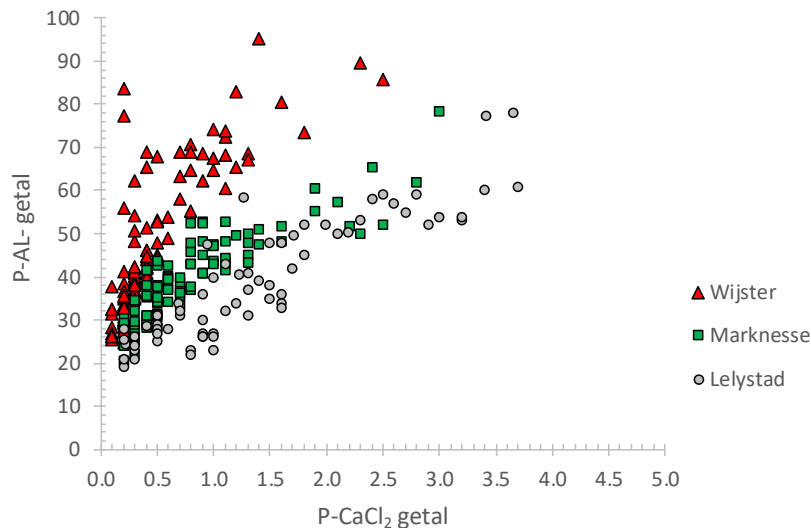
2018). De relatie tussen het Pw-getal en het P-CaCl₂-getal is daarentegen meer generiek, wat te verklaren is door het feit dat beide indicatoren het momentaan beschikbaar fosfaat extraheren, daar waar het P-AL-getal een groter aandeel van de fosfaatbodemplaat extraheert (zie Figuur 3.11).

Figuur 4.6 toont de relatie tussen het P-CaCl₂-getal en het P-AL-getal. Ook hier is binnen de proefvelden sprake van een sterke correlatie, maar zijn er tussen de drie locaties verschillen in de regressielijn. Bij een gelijk P-AL-getal neemt het P-CaCl₂-gehalte toe in de volgorde Wijster (zand), Marknesse en Lelystad. Bezien vanuit het concept van de gecombineerde indicator zou dit betekenen dat zandgrond Wijster een hogere fosfaatbufferingscapaciteit kent ten opzichte van de zavelgronden in Lelystad en Marknesse. Echter, daarmee wordt voorbijgegaan aan het feit dat deze gronden verschillen in de mate waarin het fosfaatoverschot tot uiting komt in de hoogte van het P-AL-getal of P-CaCl₂-getal. Voor het Pw-getal zijn dergelijke relaties in detail geanalyseerd (Ehlert et al., 2018).

Tussen de grondsoorten zijn er verschillen in de mate waarin het Pw-getal toeneemt onder invloed van het cumulatieve fosfaatoverschot. Ook de hoogte waarop Pw-getal stabiliseert, verschilt tussen de grondsoorten. Analyses van trends in het verloop van de fosfaatindicator versus het cumulatief fosfaatoverschot op bouwland zijn echter nog niet beschikbaar voor de nieuwe indicatoren P-AL-getal en P-CaCl₂-getal. In de bouwlandproeven is het P-CaCl₂-getal sinds 2008 toegevoegd aan de monitoring, maar de tijdsperiode is te kort om trends goed vast te kunnen stellen. Het compleet maken van de datareeks door analyse van P-CaCl₂-getal op archiefmonsters van de bouwlandproef is in principe mogelijk echter, een eerdere hermeting op archiefmonsters uit de veeljarige grasproef liet zien dat het P-CaCl₂-getal bij langdurige opslag sterk kan toenemen, terwijl dit op bouwlandgronden niet werd geconstateerd. Voordat analyses op archiefmonsters worden uitgevoerd, dient daarom eerst te worden vastgesteld of dergelijke analyses voldoende betrouwbaar zijn. Dit zal in 2021 verder onderzocht en gepubliceerd worden.



Figuur 4.5 Relatie tussen het Pw-getal in mg P₂O₅/L en het P-AL-getal in mg P₂O₅/100 g (links) en het P-CaCl₂-getal in mg P/kg (rechts) in grondmonsters van de bouwlandproeven in Lelystad, Wijster en Marknesse (data voor jaargangen 2008, 2012 en 2019).



Figuur 4.6 Relatie tussen het P-CaCl₂-getal en het P-AL-getal in grondmonsters van de bouwlandproeven in Lelystad, Wijster en Marknesse (data voor jaargangen 2008, 2012 en 2019).

4.3 Gewasopbrengst in relatie tot fosfaatgebruiksnorm

4.3.1 Lelystad

De veldproef op Lelystad bestaat sinds 2005 uit een combinatie van vier initiële fosfaattoestanden (P1-P4), gecombineerd met twee fosfaatbehandelingen (geen bemesting of bemesting). Tabel 4.5 toont de gemiddelde gewasopbrengst in de periode vanaf 2006 per gewasgroep conform het Handboek Bodem en Bemesting (2020). De gewasopbrengst is uitgedrukt in procenten ten opzichte van de opbrengst bij P2-70. Deze behandeling is bij aanvang van de proef als referentie gekozen, omdat deze velden bij beoordeling o.b.v. het Pw-getal een neutrale fosfaattoestand kennen. Bij beoordeling o.b.v. de gecombineerde indicator wordt de fosfaattoestand van dit veld beoordeeld als laag. Er is echter besloten P2-70 als referentie aan te houden.

Behandelingen P3-140 en P4-280, die een hogere fosfaatgift (140 en 280 kg P₂O₅) en een hogere fosfaattoestand van de bodem kennen, geven geen verdere toename in de drogestofopbrengst t.o.v. P2-70. Behandelingen P1-70 en P2-70 ontvangen beide jaarlijks 70 kg P₂O₅/ha, maar P1-70 kenmerkt zich door een lagere initiële fosfaattoestand, omdat deze behandeling tot 2006 geen fosfaatbemesting heeft ontvangen. P2-70 heeft daarentegen vanaf 1990 jaarlijks 70 kg P₂O₅/ha ontvangen. Deze verschillen in bemestingshistorie komen tot uiting in het P-AL-getal, maar niet het P-CaCl₂-getal, dat voor beide behandelingen < 1,4 mg P/kg ligt en waardoor de fosfaattoestand bij gebruik van de gecombineerde indicator voor beide behandelingen in klasse 'arm' valt (fosfaatgebruiksnorm 120 kg P₂O₅/ha). Vanuit landbouwkundig perspectief is een fosfaatgift van 120 kg P₂O₅/ha op P2-70 niet nodig; bij een gift van 70 kg P₂O₅ wordt reeds de optimale opbrengst bereikt. Op P1-70 is daarentegen wel sprake van 5% opbrengstderving in gewasgroep 1 bij een gift van 70 kg P₂O₅.

Uitmijnen leidt tot opbrengstderving, m.u.v. P4-0, waarbij de initiële fosfaattoestand hoog is door de hoge fosfaatgiften in de periode voorafgaand aan het uitmijnen.

Tabel 4.5 Gemiddelde relatieve gewasopbrengst ten opzichte van behandeling P2-70 per gewasgroep voor de veldproef in Lelystad voor de periode 2006-2020 op percelen met een verschillende initiële fosfaattoestand (P1, P2, P3, P4) en bij giften van 0, 70, 140 en 280 kg P₂O₅/ha als tripelsuperfosfaat met standaardfout en aantal proefjaren (n).

Gewas- groep	Geteelde gewassen	Parameter	Fosfaatobjecten en jaarlijkse giften (kg P ₂ O ₅ per ha)							
			P1-0	P1-70	P2-0	P2-70	P3-0	P3-140	P4-0	P4-280
1	aardappel, zaaiui	gemiddelde	80	95	88	100	96	101	102	102
		s.e.	2,5	1,5	1,9	1,1	1,5	1,2	1,5	1,6
		n	6	6	6	6	6	6	6	6
2	suikerbiet	gemiddelde	94	98	97	100	98	99	101	103
		s.e.	2,9	1,8	2,5	1,4	1,8	1,3	1,2	2,1
		n	4	4	4	4	4	4	4	4
3	peen, zomergerst	gemiddelde	98	99	100	100	100	102	101	100
		s.e.	1,1	1,4	1,1	0,3	1,1	1,6	1,5	1,3
		n	2	2	2	2	2	2	2	2
4	wintertarwe	gemiddelde	91	94	95	100	96	97	95	95
		s.e.	2,7	2,4	2,2	0,9	2,0	2,1	2,1	2,0
		n	3	3	3	3	3	3	3	3

¹ De opbrengst van object P2 met 70 kg P₂O₅/ha/jaar bemesting is steeds op 100 gesteld, omdat de fosfaattoestand van dit object o.b.v. de enkelvoudige indicator neutraal is (36>Pw-getal>55). Echter P2-70 wordt o.b.v. de gecombineerde indicator als 'laag tot arm' beoordeeld.

² De opbrengstgegevens van aardappel in 2005 zijn niet opgenomen, omdat de proef toen door wateroverlast op het veld geen bruikbare resultaten opleverde.

4.3.2 Marknesse

Bij de fosfaathoeveelheden-veldproef te Marknesse zijn fosfaatgiften 0, 80, 160 en 240 kg P₂O₅ vanaf 1972 jaarlijks toegediend. Evenwichtsbemesting werd in 1990 opgenomen als factor waardoor gegevens van opbrengsten vanaf 1991 beschikbaar zijn. Tabel 4.6 toont de relatieve gewasopbrengsten over de periode 1991-2018. Om de jaarlijkse variatie in fosfaatevenwichtsbemesting te ondervangen, worden in deze paragraaf de opbrengsten vergeleken met die van de hoogste fosfaatgift van 240 kg P₂O₅/ha (=100%).

Tabel 4.6 geeft de gemiddelde relatieve opbrengsten per gewasgroep voor de jaarlijks constante fosfaatgiften en de jaarlijks variabele fosfaatgiften M, 2M en 3M voor de periode 2008-2018. Voor de in 1991 gestarte behandelingen met evenwichtsbemesting (M) is tussen haakjes bij M, 2M en 3M de gemiddelde fosfaatgift over deze periode gegeven (Tabel 4.6). De gemiddelde fosfaatafvoer met het gewas bedroeg 50 kg P₂O₅/ha/jaar over de periode 1991-2018, maar varieerde tussen jaren van 17 tot 138 kg P₂O₅/ha. Hierdoor ontstaat eveneens een grote variatie in de fosfaatbemesting in het opvolgende jaar. Die variatie werkt door in de relatieve opbrengsten, omdat de giften M tot en 3M soms lager zijn dan 80 kg P₂O₅/ha en soms zijn de 3M-giften hoger dan 160 kg P₂O₅/ha. Deze werkwijze wijkt af van de werkwijze in de praktijk, waarbij de jaarlijkse fosfaatgift wordt afgestemd op de gewasbehoefte in het aankomende groeiseizoen en het op peil houden van de streefwaarde voor de fosfaattoestand.

Het achterwege laten van fosfaatbemesting leidt bij gewasgroepen 1 en 2 tot een opbrengstdaling. Bij de behandelingen met fosfaatbemesting is er geen significant verschil in de opbrengst tussen behandelingen met een jaarlijkse gift van 80, 160 of 240 kg P₂O₅/ha. Ook de opbrengsten bij evenwichtsbemesting (gemiddelde gift 52 kg P₂O₅/ha) en 2M en 3M zijn niet significant verschillend. De gewasopbrengst bij evenwichtsbemesting is lager dan bij jaarlijkse bemesting met 240 kg P₂O₅/ha, echter dit verschil is niet significant.

De overgang naar de gecombineerde indicator leidt tot een lagere waardering van de fosfaattoestand (hogere fosfaatgebruiksnorm) ten opzichte van de gebruiksnorm op basis van het Pw-getal 2020. Hierdoor verschuift de fosfaatgebruiksnorm op percelen met een jaarlijkse fosfaatgift van 80 en 160 kg P₂O₅/ha, M en 2M van 70/80 kg P₂O₅ naar 120 kg P₂O₅/ha. Omdat de gewasopbrengsten bij de giften in de veldproef (52, 80 en 160 kg P₂O₅/ha) geen significante opbrengstderving laten zien, is het vanuit landbouwkundig perspectief niet noodzakelijk om de fosfaatgift te verhogen naar 120 kg P₂O₅/ha.

Tabel 4.6 Gemiddelde relatieve¹ opbrengst per gewasgroep voor de veldproef te Marknesse (B0013) over de periode 2008-2018 bij jaarlijkse fosfaatgiften van 0, 80, 160 en 240 kg P₂O₅/ha als superfosfaat en bij evenwichtsbemesting (M) met standaardafwijking (se) en aantal proefjaren (n). De gift van 240 kg P₂O₅/ha is op 100% gesteld.

Gewasgroep	Parameter	Fosfaatgift, kg P ₂ O ₅ /ha						
		0	80	160	240	M(52) ²	2M(103) ²	3M(155) ²
1 Aardappel, pootaardappel, ui, doperwt	gemiddeld	96	99	104	100	95	101	102
	se	12	15	11	15	4	9	10
	n	6	6	6	6	6	6	6
2 Suikerbiet	gemiddeld	96	100	101	100	95	98	95
	se	5	2	1	1	4	5	3
	n	1	1	1	1	1	1	1
3 Zomergerst	gemiddelde	99	101	100	100	100	101	101
	se	7	7	9	5	5	7	3
	n	1	1	1	1	1	1	1
4 Wintertarwe, zomertarwe	gemiddelde	101	101	105	100	101	96	102
	se	6	8	6	6	8	12	9
	n	3	3	7	3	3	3	3

¹ Relatief t.o.v. de opbrengst bij 240 kg P₂O₅/ha.

² M = evenwichtsbemesting, 2M en 3M ontvangen respectievelijk twee- en driemaal de hoeveelheid fosfaat bij evenwichtsbemesting. De jaarlijkse fosfaatgift bij evenwichtsbemesting varieert, tussen haakjes is de gemiddelde fosfaatgift gegeven.

4.3.3 Wijster

De veldproef op Wijster kent vijf verschillende fosfaatgiften (0, 45, 90, 180 en 240 kg P₂O₅/ha/jaar) als superfosfaat en deze giften worden sinds 1972 gegeven. Tabel 4.7 toont de gemiddelde relatieve gewasopbrengsten over de periode 2008-2019, omdat over deze periode de fosfaatgebruiksnormen op basis van het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal bekend zijn.

Op Wijster reageert het gewas op de hoogte van de fosfaatgift bij alle gewasgroepen. Door vanaf 1972 geen fosfaatbemesting toe te dienen, toont de onbemeste behandeling bij alle gewassen fosfaatgebrek. Behandelingen met uitmijnen en een fosfaatgift van 45 kg P₂O₅/ha vallen o.b.v. de gecombineerde indicator in de klasse 'arm' (fosfaatgebruiksnorm 120 kg P₂O₅/ha) en deze percelen tonen bij alle gewasgroepen significant lagere gewasopbrengsten ten opzichte van de percelen met de hoogste fosfaatgift van 240 kg P₂O₅/ha. Percelen met een jaarlijkse fosfaatgift van 90 kg P₂O₅/ha worden op basis van de gecombineerde indicator beoordeeld als arm tot laag (fosfaatgebruiksnorm 120 of 80 kg P₂O₅/ha) en deze percelen tonen opbrengstderving ten opzichte van de hoogste fosfaatgiften. Verschillen in de behandeling met 180 en 240 kg P₂O₅/ha en zijn niet significant.

Tabel 4.7 Gemiddelde relatieve opbrengsten, vers gewicht, per gewasgroep voor de veldproef te Wijster (IB1920) voor de periode 2008-2019 bij jaarlijkse verschillende fosfaatgiften, variërend van 0 tot en met 240 kg g P₂O₅/ha als superfosfaat met standaardafwijking (se) en aantal proefjaren (n). De gift van 240 kg P₂O₅/ha is op 100% gesteld.

Gewasgroep	Parameter	Fosfaatgift (kg P ₂ O ₅ /ha/jaar)				
		0	45	90	180	240
1	Gemiddelde	69	73	78	97	100
	SE	12	13	17	13	2
	n	5	5	5	5	5
2	Gemiddelde	43	59	70	101	100
	SE	25	27	19	19	2
	n	1	1	1	1	1
3	Gemiddelde	55	75	80	96	100
	SE	13	7	11	11	7
	n	3	3	3	3	3
4	Gemiddelde	77	82	94	106	100
	SE	9	11	9	18	4
	n	3	3	3	3	3

Fosfaatgebruiksnorm per veldje o.b.v. het **Pw-getal (2020)**

P2O5 gift:	0		45		90		180		240	
Herhaling:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2008	120	120	120	120	120	120	70	80	70	70
2009	120	120	120	120	120	120	80	80	70	80
2010	120	120	120	120	120	120	80	120	70	80
2011	120	120	120	120	120	120	80	120	70	70
2012	120	120	120	120	120	120	80	120	70	80
2013	120	120	120	120	120	120	80	80	60	70
2014	120	120	120	120	120	120	70	80	60	70
2015	120	120	120	120	120	80	60	70	60	40
2016	120	120	120	120	120	120	80	80	60	70
2017	120	120	120	120	120	80	80	70	70	60
2018	120	120	120	120	120	80	70	70	60	40
2019	120	120	120	120	80	80	70	70	40	40
gemiddelde	120	120	120	120	117	107	75	87	63	64

Fosfaatgebruiksnorm per veldje o.b.v. de **gecombineerde indicator (2021)**

P2O5 gift:	0		45		90		180		240	
Herhaling:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2008	120	120	120	120	120	120	80	80	70	80
2009	120	120	120	120	120	120	80	120	70	80
2010	120	120	120	120	120	120	80	120	70	80
2011	120	120	120	120	120	80	80	80	70	70
2012	120	120	120	120	120	80	80	120	70	70
2013	120	120	120	120	120	80	70	70	60	70
2014	120	120	120	120	80	80	70	70	60	70
2015	120	120	120	120	120	80	60	70	60	60
2016	120	120	120	120	120	80	70	80	60	60
2017	120	120	120	120	120	80	80	70	70	60
2018	120	120	120	120	80	80	60	70	60	60
2019	120	120	120	120	80	80	70	70	40	60
gemiddelde	120	120	120	120	110	90	73	85	63	68

4.4 Fosfaat in bodemvocht

Bodemvochtmetingen zijn uitgevoerd gedurende zes winterseizoenen (2003/2004, 2004/2005, 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010 en 2010/2011) op drie locaties (Lelystad, Marknesse, Wijster) en met behulp van kunstwortels geplaatst op 35 cm diepte. Resultaten zijn eerder gepubliceerd in Ehlert et al. (2018). In dit rapport zijn de gemiddelde totaalfosfaat- en orthofosfaat-concentraties in bodemvocht per behandeling vergeleken met het P-Al-getal, P-CaCl₂-getal en de fosfaatgebruiksnorm volgens de gecombineerde indicator. Resultaten van bodemvochtsamenstelling op grotere diepte (>35 cm) zijn opgenomen in Ehlert et al. (2018), maar niet vergeleken met de fosfaatindicatoren.

Op alle locaties is het fosfaat in het bodemvocht nagenoeg volledig aanwezig in de vorm van orthofosfaat. De bijdrage van organisch fosfaat en/of colloïdaal fosfaat is verwaarloosbaar. Op Wijster en Marknesse zijn de fosfaatconcentraties in het bodemvocht van de bouwvoor zeer laag (0,01-0,1 mg/l). Er is geen relatie tussen fosfaatconcentratie in het bodemvocht en mate van fosfaatbemesting (0-240 kg/ha). Op de zavelgrond in Lelystad is wel een significante relatie tussen effect van bemesting op fosfaatconcentraties in het bodemvocht in de bouwvoor aangetoond en is er een breder bereik in fosfaatconcentraties in bodemvocht. Risico's op fosfaatuitspoeling naar grondwater zijn echter nihil, omdat fosfaat in de ondergrond wordt gebonden waardoor fosfaat op 75 cm niet meer aantoonbaar is (Ehlert et al., 2018).

De lage fosfaatconcentraties op Marknesse en Wijster passen bij de lage P-CaCl₂-getallen op deze proefvelden (<1 mg P/kg) en voor Marknesse bij de lage tot neutrale P-AL-getallen (<44 mg P₂O₅/100 g). Op Wijster is er een groot bereik in P-AL-getal (27-66 mg P₂O₅/100 g), terwijl dit niet

leidt tot een hogere fosfaatconcentratie in het bodemvocht. Op Lelystad is er een sterke toename in fosfaat in bodemvocht op percelen met een hoog P-AL-getal en P-CaCl₂-getal. Een hoog P-CaCl₂-getal is op basis van deze dataset een betere indicator voor het risico op fosfaatuitspoeling ten opzichte van het P-AL-getal. Het risico op fosfaatuitspoeling vanuit de bouwvoor neemt toe bij percelen met een fosfaattoestand hoog. Naast de fosfaattoestand in de bouwvoor speelt ook de fosfaattoestand in de bodemlaag onder de bouwvoor een rol bij de totstandkoming van de verschillen. Dit is in het kader van dit onderzoek niet verder onderzocht.

Tabel 4.8 Gemiddelde concentratie totaalfosfaat en orthofosfaat in bodemvocht en het gemiddelde P-CaCl₂-getal en P-AL-getal gemeten in zes jaargangen (2003-2011) op de drie proefveldlocaties op bouwland. Bodemvocht is bemonsterd middels kunstwortels op een diepte van 35 cm.

		Bodemvocht		Fosfaatindicatoren			Gebruiksnorm (kg P ₂ O ₅ /ha)	Periode
		n	Total P (mg P/l)	P-PO ₄ (mg P/l)	P-CaCl ₂ -getal (mg P/kg)	P-AL-getal (mg P ₂ O ₅ /100g)		
Lelystad	P1 (0)	99	0,02	0,01	0,4	24,9	120	2003-2011
	P2 (70)	87	0,16	0,14	1,4	38,9	101	2003-2011
	P3 (140)	101	0,43	0,42	2,7	53,8	57	2003-2011
	P4 (280)	100	2,42	2,41	5,8	78,7	40	2003-2011
Marknesse	0	101	0,02	0,02	0,4	32,1	110	2003-2011
	80	47	0,03	0,02	0,6	37,9	106	2008-2012
	160	50	0,01	0,02	0,7	39,1	110	2008-2012
	240	50	0,04	0,04	1,0	44,4	107	2008-2012
	M	56	0,02	0,01	0,3	28,5	118	2008-2012
Wijster	0	32	0,04	0,02	0,2	30,8	120	2008-2012
	45	10	0,10	0,05	0,1	27,1	120	2008-2012
	90	10	0,10	0,05	0,3	41,3	116	2008-2012
	180	17	0,15	0,12	0,8	56,9	82	2008-2012
	240	12	0,10	0,06	0,9	65,8	72	2008-2012

4.5 Synthese bouwland

Veranderingen in de fosfaatgebruiksnorm bij overgang naar de gecombineerde indicator

De introductie van de gecombineerde indicator op bouwland leidt tot een verhoging van de fosfaatgebruiksnormen op proefvelden op kalkrijke zavelgronden in Lelystad en Marknesse, maar niet op de kalkarme dekzandgrond in Wijster. Op Lelystad en Marknesse kan de fosfaatgebruiksnorm tot 50 kg P₂O₅/ha toenemen door verschuivingen van klasse 'neutraal' (70 kg P₂O₅/ha) naar 'arm' 120 (kg P₂O₅/ha). Op Wijster neemt de fosfaatgebruiksnorm bij één behandeling af van 120 naar 80 kg P₂O₅/ha en blijft op de andere velden gelijk.

Het feit dat de locaties op kalkrijke zavel anders reageren op de overgang naar de gecombineerde indicator in vergelijking met de locatie op zand, is het gevolg van verschillen in de relaties tussen het Pw-getal en het P-AL-getal tussen de locaties (paragraaf 4.2). Bij een gelijk Pw-getal kennen de zavelgronden een laag P-AL-getal in vergelijking met de dekzandgrond. Op de kalkrijke zavelgronden komt het fosfaatoverschot niet volledig tot uiting in het P-AL-getal; fosfaat wordt deels omgezet in andere vormen die niet extraheerbaar zijn met het P-AL-getal. Op de dekzandgrond stabiliseert het P-AL-getal zich op een hoger niveau in vergelijking met de zavelgrond bij een gelijke langdurige fosfaatgift.

Het P-CaCl₂-getal is op de drie locaties laag; bij veeljarige bemesting met fosfaatgiften tot 90 kg P₂O₅/ha blijft het P-CaCl₂-getal onder de 1,4 mg P/kg en dit is van invloed op de fosfaatgebruiksnorm. Bij een P-CaCl₂-getal onder 1,4 mg P/kg wordt de fosfaattoestand beoordeeld als 'arm' (120 kg P₂O₅/ha) tot een P-AL-getalswaarde van 45 mg P₂O₅/100 g.

Het Pw-getal en P-CaCl₂-getal zijn intensiteitsparameters en tonen onderling een sterke correlatie. Het P-AL-getal is een zogenaamde capaciteitsparameter en extraheert een groter deel van het fosfaat uit de bodem t.o.v. de intensiteitsparameters. Het P-AL-getal extraheert circa 20-50% van het totaal-P-gehalte uit de bodem op de veldproef in Lelystad. Voor de andere locaties kan dit niet worden afgeleid, omdat P-totaal niet jaarlijks wordt gemonitord. Wel zijn additionele profielbemonsteringen uitgevoerd die informatie geven over de fosfaatvormen; deze wordt in 2021 gepubliceerd.

Een deel van het fosfaatoverschot komt niet tot uiting in een verhoging van het P-AL-getal door een zeer sterke binding aan ijzeroxiden, vastlegging in slecht oplosbare calciumfosfaat mineralen of organisch fosfaat (Ehlert et al., 2018), waardoor relaties tussen de hoogte van de fosfaatgift en het P-AL-getal kunnen verschillen tussen grondsoorten. Om deze verschillen beter te begrijpen, is verder onderzoek nodig naar de relatie tussen de cumulatieve fosfaatgift en de fosfaatindicatoren P-AL-getal en P-CaCl₂-getal, zoals eerder ook is gedaan voor het Pw-getal (Ehlert et al., 2018).

Temporele variaties in fosfaatindicatoren

Op bouwland wordt de fosfaattoestand tot 2021 afgeleid op basis van het Pw-getal. Monitoringsdata laten zien dat het Pw-getal – een intensiteitsindicator – een sterke temporele variatie vertoont. Jaar-op-jaar variaties waarbij de fosfaattoestand op basis van Pw-getal met één of twee fosfaatklassen verspringt, komen op alle drie locaties voor. Temporele variaties komen ook voor bij het P-CaCl₂-getal en in mindere mate bij het P-AL-getal. Opvallend is dat temporele fluctuaties zich veelal gelijktijdig voordoen op alle behandelingen binnen één proefveldlocatie, hetgeen kan wijzen op invloed op weersomstandigheden, tijdstip van bemonstering of de hoogte van de fosfaatonttrekking in het seizoen voorafgaand aan de bemonstering. De schommelingen in P-AL-getal en P-CaCl₂-getal leiden tot temporele variaties in de hoogte van de fosfaattoestand, maar de mate waarmee de fosfaattoestand fluctueert, lijkt af te nemen ten opzichte van de enkelvoudige indicator Pw-getal.

Onderscheidend vermogen van fosfaatindicatoren

Het P-AL-getal is beter in staat om velden met verschillen in de fosfaatbemestingshistorie te onderscheiden ten opzichte van het P-CaCl₂-getal. Dit geldt met name voor dekzandgrond en in mindere mate voor kalkrijke zavelgronden. Op Marknesse zijn veldjes die 29 jaar zijn bemest met een jaarlijkse fosfaatgift van 50 of 100 kg P₂O₅/ha op basis van het P-CaCl₂-getal niet van elkaar te onderscheiden, terwijl het P-AL-getal wel onderscheidenlijk is. Ook op dekzandgrond is dit zichtbaar voor de velden die sinds 1972 een fosfaatgift van 45 of 90 kg P₂O₅/ha/jaar ontvangen. In 2002-2018 kennen deze velden een onderscheidenlijk P-AL-getal van respectievelijk 30 en 45 mg P₂O₅/ha, terwijl het P-CaCl₂-getal bij beide behandelingen onder de 0,8 mg P/kg blijft.

Het P-CaCl₂-getal wordt gecontroleerd door desorptieprocessen in de bodem. Bij lage P-CaCl₂-getallen (<1,4 mg P/kg) wordt het P-CaCl₂-getal sterk gebufferd, wat wil zeggen dat een grote verandering nodig is in de fosfaatvoorraad om het P-CaCl₂-getal te doen veranderen. Bij een hoge fosfaattoestand en hoge P-CaCl₂-waarden neemt de bufferende werking van de bodem af, waardoor het P-CaCl₂-getal een grotere verandering toont bij een relatief kleine verandering in de fosfaatcapaciteit. Op bouwland is het P-CaCl₂-getal bij de meeste behandelingen < 1,4 mg P/kg en bevindt zich daarmee in de range waarin het P-CaCl₂-getal sterk gebufferd wordt. Zodoende komen verschillen in de hoogte van de fosfaatgift eerder tot uiting in het P-AL-getal t.o.v. het P-CaCl₂-getal. Hoge P-CaCl₂-getallen veranderen sneller onder invloed van verschillen in de hoogte van de fosfaatgift.

Relevant is hier om te beschouwen welk bereik het P-CaCl₂-getal kent in de landbouwpraktijk. Oenema et al. (2007) rapporteren een mediane waarde voor het Pw-getal van 40 mg P₂O₅/l voor bouwlandgronden in Nederland (data Eurofins Agro). Voor de afleiding van de indeling van de fosfaatklassen hebben Oenema et al. (2007) een logaritmisch model afgeleid waarmee het P-CaCl₂-getal wordt berekend uit het Pw-getal ($\text{LN}(\text{P-CaCl}_2) = 3-5,35*0,98^{\text{Pw}}$). Deze omrekening is afgeleid op basis van data van Eurofins Agro. Hieruit volgt een mediane waarde voor het P-CaCl₂-getal van 1,8 mg P/kg voor bouwlandgronden. In onderhavige studie is een plot gemaakt van het gemeten Pw-getal versus het gemeten P-CaCl₂-getal (Figuur 4.1), waaruit volgt dat een Pw-getal van 40 correspondeert met een P-CaCl₂-getal van 0,7 tot 1,5 mg P/kg (Figuur 4.5) en daarmee lager is dan berekend wordt met het door Oenema et al. (2007) afgeleide model. In het onderhavige onderzoek is louter gebruikgemaakt van Pw-getallen die nat-chemisch zijn vastgesteld en mogelijk verklaart dat de

verschillen tussen de gevonden relaties tussen het Pw-getal en het P-CaCl₂-getal. Ook kunnen er verschillen zijn tussen laboratoria; dit is niet onderzocht.

Gewasopbrengsten

Op de bouwlandproeven in Lelystad en Marknesse is geen of nauwelijks sprake van opbrengstdervingen bij lage fosfaatgiften of het onthouden van fosfaatbemesting. Op deze kalkrijke zavelgronden wordt bij fosfaatgiften van 52 kg P₂O₅/ha of 70 kg P₂O₅/ha alleen in gewasgroep 1 (de meest fosfaatbehoefte gewassen) een gemiddeld lagere gewasopbrengst gevonden, al zijn de verschillen veelal niet significant. De verschuiving naar een hogere fosfaatgebruiksnorm bij overgang naar de gecombineerde indicator is op deze gronden vanuit landbouwkundig oogpunt niet nodig, omdat geen sprake is van opbrengstderving.

Op de dekzandgrond in Wijster is daarentegen wel sprake van opbrengstdervingen onder invloed van de fosfaatgiften. Op percelen met een lage fosfaattoestand (fosfaatgebruiksnorm 80 kg P₂O₅/ha, indeling 2021) is een fosfaatgift van 90 kg P₂O₅/ha niet voldoende om opbrengstderving te voorkomen. Opbrengstderving doet zich voor bij gewasgroepen 1, 2 en 3. Bij de overgang naar de gecombineerde indicator is de fosfaatgebruiksnorm op deze percelen verlaagd van 120 naar 80 kg P₂O₅/ha. Vanuit landbouwkundig perspectief is hier een hogere fosfaatgift gewenst om opbrengstderving te voorkomen.

De veldproeven wijken op een aantal punten af van de praktijk. Zo wordt in de praktijk de fosfaatgift per teeltjaar wordt afgestemd op de fosfaatbehoefte van het gewas terwijl op de proefvelden jaarlijks dezelfde fosfaatgift ontvangen. De landbouwpraktijk kan daarom de beschikbare fosfaat efficiënter aanwending t.o.v. de uitvoering op de proefvelden.

4.6 Conclusies bouwland

De overgang naar de gecombineerde indicator P-AL-getal en P-CaCl₂-getal leidt op de twee proefvelden in Marknesse en Lelystad (beide zavelgrond) tot een lagere waardering van de fosfaattoestand en daardoor tot een verschuiving naar een hogere fosfaatgebruiksnorm. Hierbij kan de fosfaatgebruiksnorm 40 tot 50 kg P₂O₅/ha toenemen t.o.v. de waardering op basis van het Pw-getal in 2020. Op zandgrond (Wijster) blijft de fosfaatgebruiksnorm daarentegen ongeveer gelijk aan de fosfaatgebruiksnorm in 2020 of neemt de fosfaatgebruiksnorm af.

De twee kalkrijke zavelgronden (Marknesse en Lelystad) kenmerken zich door relatief lage P-AL-getallen ten opzichte van het Pw-getal. Het fosfaatoverschot komt niet volledig tot uiting in P-AL-extraheerbaar fosfaat. De combinatie van een laag P-AL-getal met een laag P-CaCl₂-getal leidt tot een lagere waardering van de fosfaattoestand t.o.v. de enkelvoudige indicator Pw-getal.

Het P-CaCl₂-getal heeft een laag vermogen om velden met een verschillende bemestingshistorie te onderscheiden. Het P-AL-getal en Pw-getal hebben een hoger onderscheidend vermogen, wat wil zeggen dat verschillen sneller tot uiting komen in deze parameters.

Temporele fluctuaties in de hoogte van de fosfaatindicatoren leiden tot fluctuaties in de hoogte van de daaruit afgeleide fosfaatgebruiksnormen. De mate waarin temporele fluctuaties in de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm voorkomen bij afleiding op basis van de gecombineerde indicator is lager of vergelijkbaar met de fluctuaties bij afleiding op basis van het Pw-getal. Het P-CaCl₂-getal is stabiel bij lage waarden (<1,4 mg P/kg), maar toont een hogere mate van temporele fluctuatie bij hogere waarden voor het P-CaCl₂-getal en beïnvloedt daarmee de fosfaatgebruiksnorm. De fosfaatgebruiksnorm kan hierdoor 10 tot 50 kg P₂O₅/ha verschuiven t.o.v. het voorgaande jaar, zonder dat daarbij sprake is van een trend.

De fosfaattoestand 'arm' (gebruiksnorm 120 kg P₂O₅/ha) omvat veldjes met een P-AL-getal tot 45 mg P₂O₅/100 g. De veeljarige proeven op de kalkrijke zavelgronden in Marknesse en Lelystad geven aanwijzingen dat er binnen de fosfaattoestand 'arm' verschillen zijn in de gewasreactie op de hoogte van de fosfaatgift afhankelijk van het P-AL-getal. Op Lelystad bijvoorbeeld is sprake van 6%

opbrengstderving bij een jaarlijkse fosfaatgift van 70 kg P₂O₅/ha/jaar op velden met een P-AL-getal <30 mg P₂O₅/100 g, terwijl dezelfde fosfaatgift voldoende is om opbrengstderving te voorkomen bij een P-AL-getal tussen 30-45 mg P₂O₅/100 g. Op de dekzandgrond in Wijster is sprake van 20-30% opbrengstderving bij een jaarlijkse fosfaatgift van 90 kg P₂O₅/ha ten opzichte van hogere fosfaatgiften en deze opbrengstderving komt voor bij gewasgroepen 1, 2 en 3. Op deze veldjes zou een hogere fosfaatgebruiksnorm vanuit landbouwkundig perspectief gewenst zijn. De overgang naar de gecombineerde indicator leidt hier tot een gelijkblijvende of een lagere fosfaatgebruiksnorm ten opzichte van de fosfaatgebruiksnorm in 2020.

Fosfaatconcentraties in het bodemvocht onder de bouwvoor (35 cm) zijn laag (<0,1 mg P/l) op proefvelden Marknesse en Wijster, ongeacht de hoogte van de fosfaatgift. Dit komt overeen met lage P-CaCl₂-getallen. Op Lelystad worden hoge fosfaatconcentraties aangetroffen in het bodemvocht van veldjes die langdurig met 140 of 280 kg P₂O₅/ha zijn bemest en dit correspondeert met hoge P-CaCl₂-getallen.

5 Beantwoording onderzoeksvragen

Welke verschuivingen in de fosfaatklassen treden op bij de overgang van de enkelvoudige indicator naar de gecombineerde indicator voor grasland en bouwland?

Op de grasproeflocaties treden geen structurele verschuivingen op door invoering van de gecombineerde indicator ten opzichte van de waardering van de fosfaattoestand op basis van de enkelvoudige indicator P-AL-getal.

Op de bouwlandproeven zijn er grote verschillen tussen de locaties. Op de dekzandgrond in Wijster leidt de overgang naar de gecombineerde indicator tot een hogere waardering van de fosfaattoestand (lagere gebruiksnorm) of een gelijkblijvende waardering. Op de kalkrijke zavelgronden in Marknesse en Lelystad is sprake van een verschuiving naar een lagere fosfaattoestand (hogere fosfaatgebruiksnorm) ten opzichte van de waardering op basis van het Pw-getal. Hierbij is ook sprake van verschuivingen van fosfaattoestand 'laag' naar 'neutraal'. Omdat de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm hierbij in één stap verschuift van 80 kg P₂O₅/ha naar 120 kg P₂O₅/ha, heeft dit in de landbouwpraktijk een grote invloed op de hoogte van de mestgiften.

Wat is de mate van temporele variatie in de gecombineerde indicator grasland en bouwland bij heranalyse binnen vier jaar of bij heranalyse bij een ander laboratorium?

Op grasland is sprake van temporele variaties in zowel het P-AL-getal als het P-CaCl₂-getal, waardoor tevens de waardering van de fosfaattoestand in de tijd fluctueert zonder dat daarbij sprake is van een trend. Op veengrond worden schommelingen van één tot drie klassen t.o.v. het voorgaande jaar geconstateerd zonder dat daarbij sprake is van een trend. Ook op kleigrond is sprake van fluctuaties in de fosfaatgebruiksnorm. Op de twee zandgronden daarentegen is de temporele variatie in het P-AL-getal en P-CaCl₂-getal zeer beperkt en treden aanzienlijk minder fluctuaties op in de fosfaatgebruiksnorm. Echter, voor alle grondsoorten geldt dat de afbakening van fosfaatklasse 'neutraal' (95 kg P₂O₅/ha) nauw is ten opzichte van de temporele fluctuaties van de fosfaatindicatoren en ten opzichte van de reproduceerbaarheid bij herbemonstering of bij heranalyse in een andere laboratorium. De overgang naar de gecombineerde indicator heeft geen effect op de frequentie en mate waarin de fosfaatgebruiksnorm fluctueert; ook bij de enkelvoudige indicator P-AL-getal komen vergelijkbare fluctuaties voor.

Op bouwland vertonen de fosfaatindicatoren Pw-getal, P-AL-getal en P-CaCl₂-getal eveneens temporele variaties. Uitgedrukt in de meeteenheid van de fosfaatindicator is de mate van de temporele schommelingen op de bouwlandlocaties geringer ten opzichte van grasland. Echter, de uitwerking voor de landbouwpraktijk is evenwel groot, omdat de fosfaatgebruiksnormen op bouwland per fosfaatklasse met 10 tot 40 kg P₂O₅/ha veranderen. Dit in tegenstelling tot grasland, waar de fosfaatgebruiksnorm stappen van 5 tot 15 kg P₂O₅/ha maakt. Het P-AL-getal is minder variabel in vergelijking met het Pw-getal. De overgang naar de gecombineerde indicator leidt tot minder frequent voorkomen van fluctuaties in de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm ten opzichte van de enkelvoudige indicator Pw-getal.

Er zijn onduidelijkheden over de verklarende mechanismen die de temporele fluctuaties in het P-AL-getal of P-CaCl₂-getal veroorzaken. Mogelijk is er sprake van beïnvloeding door weerscondities in de periode voorafgaand aan bemonstering, wat van invloed is op het vochtgehalte en de mate van biologische activiteit in de bodem. Op bouwland kunnen daarnaast het tijdstip van de bemesting en jaarvariatie in de hoogte van de fosfaatonttrekking (beide gewasafhankelijk) een rol spelen. Deze effecten zullen een groter effect hebben in de toplaag van de bodem, wat de hogere temporele variatie verklaart op de grasproeven (0-5 cm, 5-10 cm) ten opzichte van de bouwlandproeven (0-30 cm).

Is de gecombineerde indicator beter in staat om veldjes met verschillen in de hoogte van de historische fosfaatgift te onderscheiden?

Op grasland is het onderscheidend vermogen van de gecombineerde indicator vergelijkbaar met de enkelvoudige indicator P-AL-getal voor de proefveldjes op de Waiboerhoeve (jonge zeeklei) en Zegveld (veen). Op de zandgrondlocaties (Cranendonck en Heino) is de gecombineerde indicator eerder in staat om veldjes met verschillende hoogten van de fosfaatgift te onderscheiden ten opzichte van de enkelvoudige indicator, wat deels komt door de andere indeling voor het P-AL-getal en deels door de toevoeging van het P-CaCl₂-getal. De snelheid waarmee de fosfaatindicatoren – en daarmee de fosfaattoestand van de bodem – verandert, is zeer traag. Op alle proeflocaties was in de periode na 2004 een verschil in de gemiddelde waardering van de fosfaattoestand op veldjes met een fosfaatgift van 0 en 40 kg P₂O₅ boven de gewasonttrekking; echter, deze verschillen zijn niet consistent en daar waar het verschil in de fosfaatgift tussen veldjes 20 kg P₂O₅/ha bedraagt, zijn de verschillen tussen de fosfaattoestanden niet consistent aanwezig. Het P-CaCl₂-getal reageert trager op verschillen in de hoogte van de fosfaatgift en was op basis van de statistische analyse niet onderscheidenlijk op veldjes met een verschillende fosfaatgift.

Op bouwland heeft de gecombineerde indicator een vergelijkbaar vermogen om veldjes met een verschillende bemestingshistorie te onderscheiden ten opzichte van de enkelvoudige indicator.

Het P-CaCl₂-getal reageert zeer traag op de hoogte van de fosfaatgift en blijft veelal laag (<1,4 mg P/kg) op veldjes met fosfaatgiften gelijk aan de hoogte van de fosfaatgebruiksnormen. Daarentegen is het P-AL-getal, evenals het Pw-getal, beter in staat om veldjes met een verschillende historische fosfaatgift te onderscheiden. Op de kalkrijke zavelgronden echter 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.

Hoe verhoudt zich de fosfaattoestand op basis van de gecombineerde indicator met de landbouwkundige fosfaattoestand van de bodem zoals afgeleid op basis van gewasopbrengsten (bouwland en grasland) en het fosforgehalte van het gewas (grasland)?

Op grasland is geen sprake van een verschuiving in de hoogte van de fosfaatgebruiksnorm bij de overgang naar de gecombineerde indicator. Op grasland is de drogestofopbrengst circa 6% lager bij evenwichtsbemesting (gemiddelde gift 77-93 kg P₂O₅/ha) in vergelijking met een fosfaatgift van 20 of 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking. Deze lagere opbrengst werd van meet af aan vastgesteld. De beoordeling van de fosfaattoestand van de bodem op basis van de gecombineerde indicator past bij verschillen in de gewasreactie op de hoogte van de fosfaatgift. Op de Waiboerhoeve (zeeklei) is de fosfaattoestand hoog en is evenwichtsbemesting voldoende om een gemiddeld fosforgehalte van 3,5 g P/kg droge stof in het gras te realiseren. Op Zegveld en Cranendonck is de fosfaattoestand bij evenwichtsbemesting 'ruim voldoende' en is sprake van een toenemend fosforgehalte in het gras bij een hogere fosfaatgift. De combinatie van een fosfaattoestand 'ruim voldoende' met een fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking was niet voldoende om een fosforgehalte van 3,5 g P/kg droge stof in het gras te realiseren (gemiddeld over de jaren). Naast de fosfaattoestand in de bodem – afgeleid op basis van de 0-10 cm-bodemlaag – dragen ook de onderliggende bodemlagen bij aan de fosfaatopname door het gras. Er zijn tussen de locaties grote verschillen in de hoogte van de fosfaatparameters in de 10-20 cm- en 20-30 cm-bodemlaag, mede als gevolg van het wel of niet uitvoeren van grondkerende bewerkingen. Dit is een aspect dat ook in de landbouwpraktijk meer onder de aandacht gebracht zou moeten worden.

Op de bouwlandproeven op de kalkrijke zavelgronden in Lelystad en Marknesse is sprake van circa 6% opbrengstderving bij evenwichtsbemesting (50-70 kg P₂O₅/ha) op veldjes met fosfaattoestand 'arm' en een laag P-AL-getal (<30 mg P₂O₅/100 g). Fosfaatgiften van 70-80 kg P₂O₅ bij een fosfaattoestand 'arm' en een P-AL-getal tussen 30-45 mg P₂O₅/100 g gaven geen opbrengstderving. De velden van de laatstgenoemde behandelingen vallen op basis van de gecombineerde indicator in fosfaatklasse 'arm' (fosfaatgebruiksnorm 120 kg P₂O₅/ha), terwijl deze in 2020 een fosfaatgebruiksnorm van 70 of 80 kg P₂O₅/ha toebedeeld kregen. Vanuit landbouwkundig oogpunt is deze verschuiving naar een hogere fosfaatgebruiksnorm op deze gronden niet noodzakelijk. De fosfaattoestand 'arm' kent een breed

bereik in P-AL-getallen, waardoor binnen deze klasse verschillen kunnen ontstaan in de mate van een gewasreactie op de hoogte fosfaatgift.

Op de dekzandgrond in Wijster is bij een jaarlijkse fosfaatgift van 90 kg P₂O₅ sprake van opbrengstdervingen van 20-30% voor de gewasgroepen 1, 2 en 3. Bij de overgang naar de gecombineerde indicator daalt de fosfaatgebruiksnorm op de betreffende veldjes van 120 naar 70-80 kg P₂O₅/ha in een deel van de jaren. Vanuit landbouwkundig oogpunt is de lagere fosfaatgebruiksnorm ongewenst, omdat opbrengstdervingen hiermee niet voorkomen kunnen worden.

Door verstrengeling van de hoogte van de fosfaatgift met de fosfaattoestand lenen de veeljarige bouwlandproeven zich niet voor het afleiden van bemestingsadviezen. Aanbevolen wordt om middels data van bemestingsproeven na te gaan of aanpassingen in de indeling van de fosfaatgebruiksnormen gewenst zijn.

Is de gecombineerde indicator een betere voorspeller van de fosfaatconcentratie in het bodemvocht onder de bouwvoor ten opzichte van de enkelvoudige indicator?

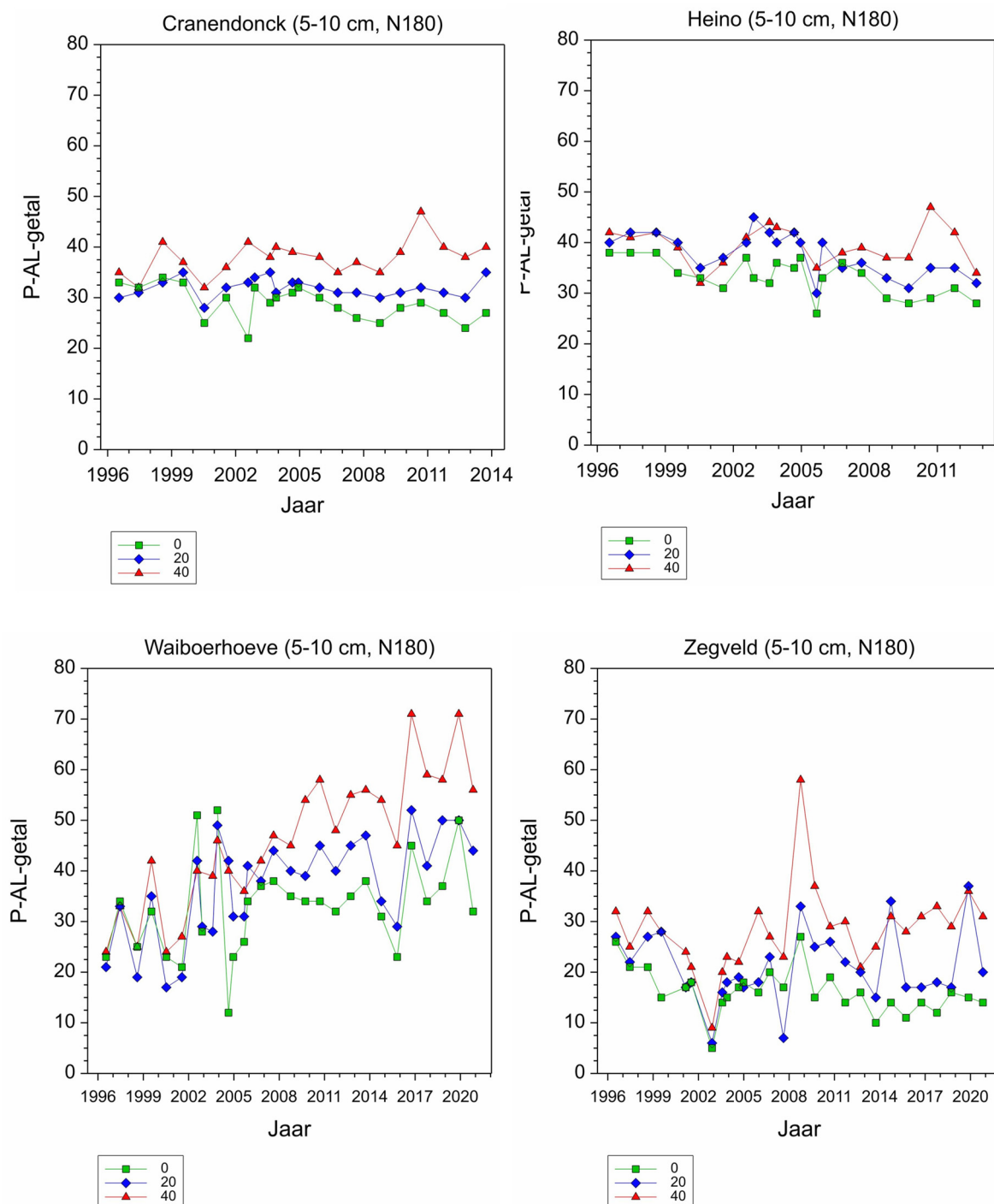
Op grasland toont de orthofosfaat-concentratie in het bodemvocht een matige correlatie met het P-CaCl₂-getal (lineaire relatie) en een betere correlatie met het P-AL-getal (kromme lijn). Bij een P-AL-getal boven 40 mg P₂O₅/100 g neemt fosfaat in bodemvocht sterk toe. Op de grasproef wordt fosfaat in bodemvocht bepaald in de bovenste 0-5 cm-, 5-10 cm-, 10-20 cm- en 20-30 cm-bodemlaag. In hoeverre verhoogde fosfaatconcentraties in het bodemvocht daadwerkelijk leiden tot een verhoogde uitspoeling, hangt samen met de hydrologische condities en de fosfaatbindingscapaciteit van de ondergrond.

Op bouwland zijn de fosfaatconcentraties in bodemvocht bij alle behandelingen laag (<0,1 mg P/l), met uitzondering van de behandelingen op Lelystad met een fosfaattoestand 'ruim voldoende en hoog', die jaarlijks 160 en 240 kg P₂O₅/ha ontvangen. In 2019-2021 zijn zowel op de grasland- als de bouwlandproefvelden additionele metingen aan bodemvocht verricht, waarbij onder andere verschillende methoden voor het verkrijgen van bodemvocht zijn vergeleken. Publicatie van deze resultaten is voorzien voor 2021. Hierin zal ook aandacht zijn voor de relatie tussen de fosfaattoestand van de bodem en het fosfaatgehalte in het bodemvocht.

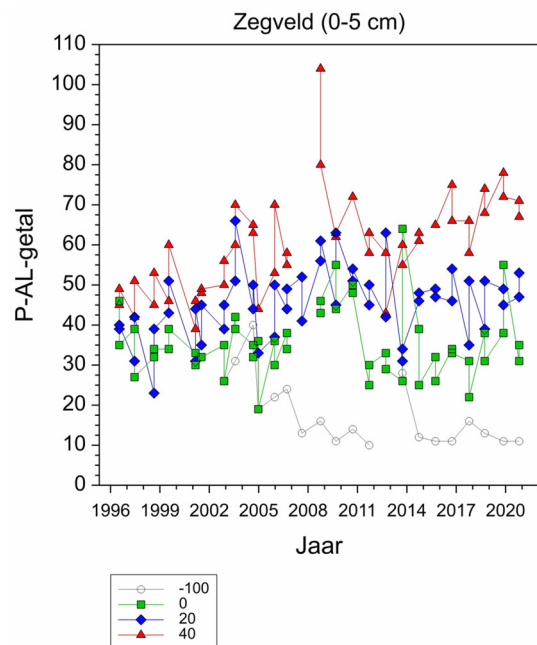
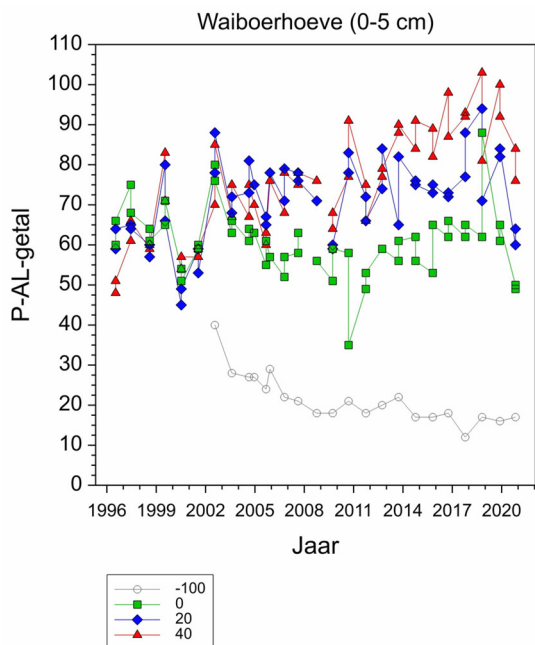
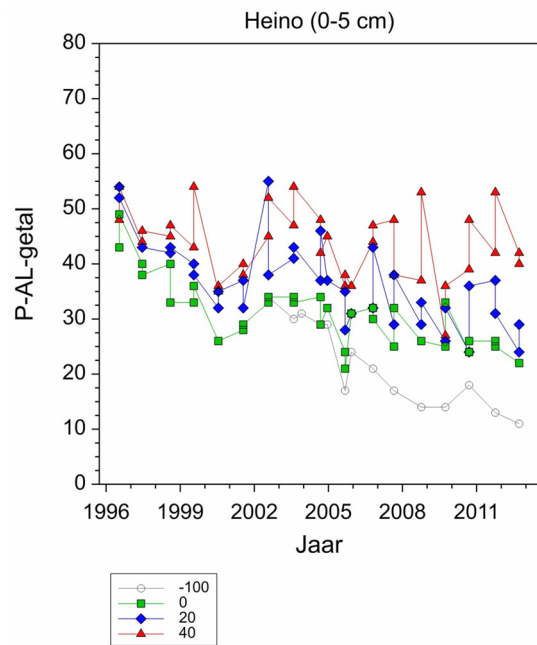
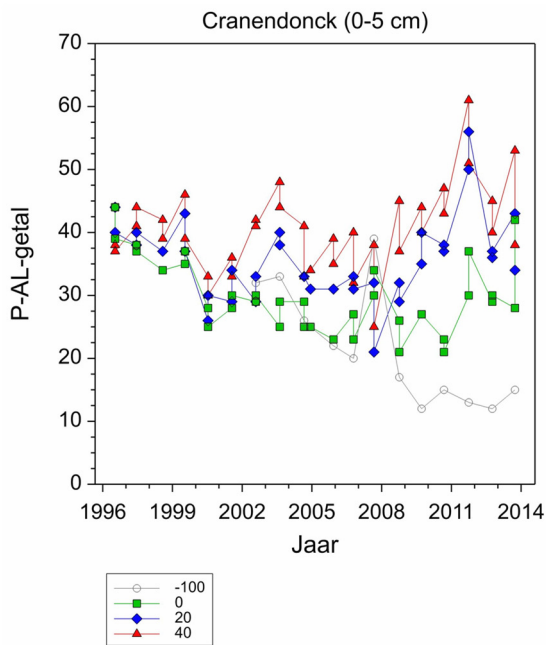
Literatuur

- CVB (2016) Tabellenboek Veevoeding Rundvee. CVB-reeks 52 Centraal Veevoeder Bureau, Wageningen.
- Ehlert, P., Middelkoop, J. Van, Geel, W. van, Haan, J. de, Regelink, I.C., 2018. Veeljarige fosfaatveldproeven op gras- en bouwland. Wageningen. Synthese rapport. Wageningen. Wageningen Environmental Research Rapport 2906. <https://doi.org/10.18174/460816>.
- Oenema, O., Mol-Dijkstra, J.P., Voogd, J.C., Ehlert, P.A.I., Velthof, G.L., 2017. Klassenindelingen voor de fosfaattoestand van de bodem, ten behoeve van de afleiding van fosfaatgebruiksnormen. Alterra-rapport 2743. <https://doi.org/10.18174/390048>.
- Regelink, I.C., L. Weng, G. Lair, G. Koopmans. 2015. Adsorption of phosphate and organic matter on metal (hydr)oxides in arable and forest soil: A mechanistic modelling study. *European Journal of Soil Science* 66, 867-875. <https://doi.org/10.1111/ejss.12285>.
- Rommelse, H., 2020. Effectiveness of struvite as a phosphorus fertilizer for maize. MSc thesis report. Wageningen University and Research. (verkrijgbaar op aanvraag).
- Schils R, P. Snijders. 2004. The combined effect of fertiliser nitrogen and phosphorus on herbage yield and changes in soil nutrients of a grass/clover and grass-only sward. *Nutr Cycl Agroecosyst* 68:165-179. doi:10.1023/B:FRES.0000019045.90791.a4.
- Van der Salm, C., van Middelkoop, J.C., Ehlert, P.A.I., 2017. Changes in soil phosphorus pools of grasslands following 17 yrs of balanced application of manure and fertilizer. *Soil Use Manag.* 33, 2-12. <https://doi.org/10.1111/sum.12333>.
- Van Middelkoop, J.C., van der Salm, C., Ehlert, P.A.I., de Boer, I.J.M., Oenema, O., 2016. Does balanced phosphorus fertilisation sustain high herbage yields and phosphorus contents in alternately grazed and mown pastures? *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 106, 93-111. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9791-0>.

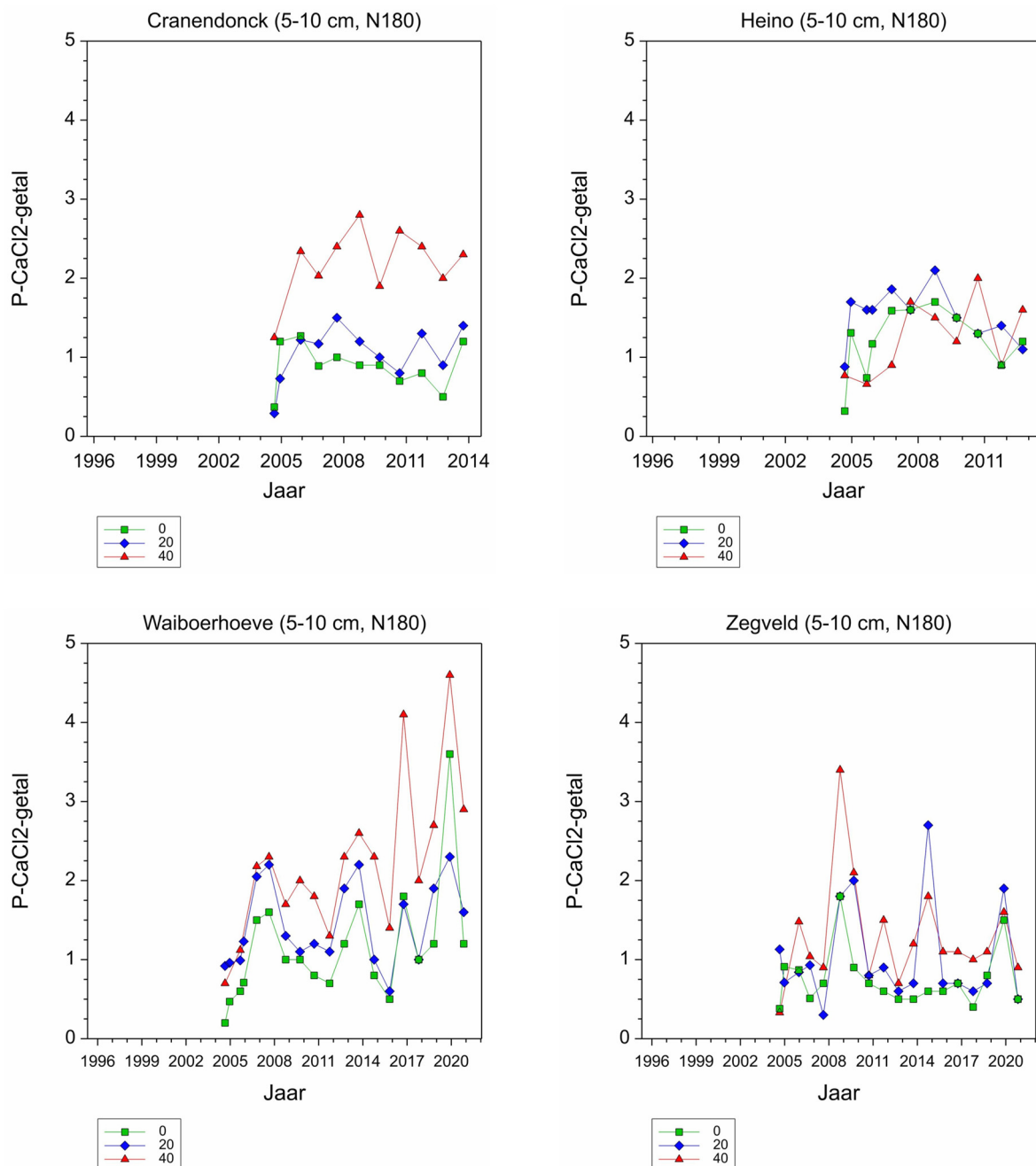
Bijlage 1



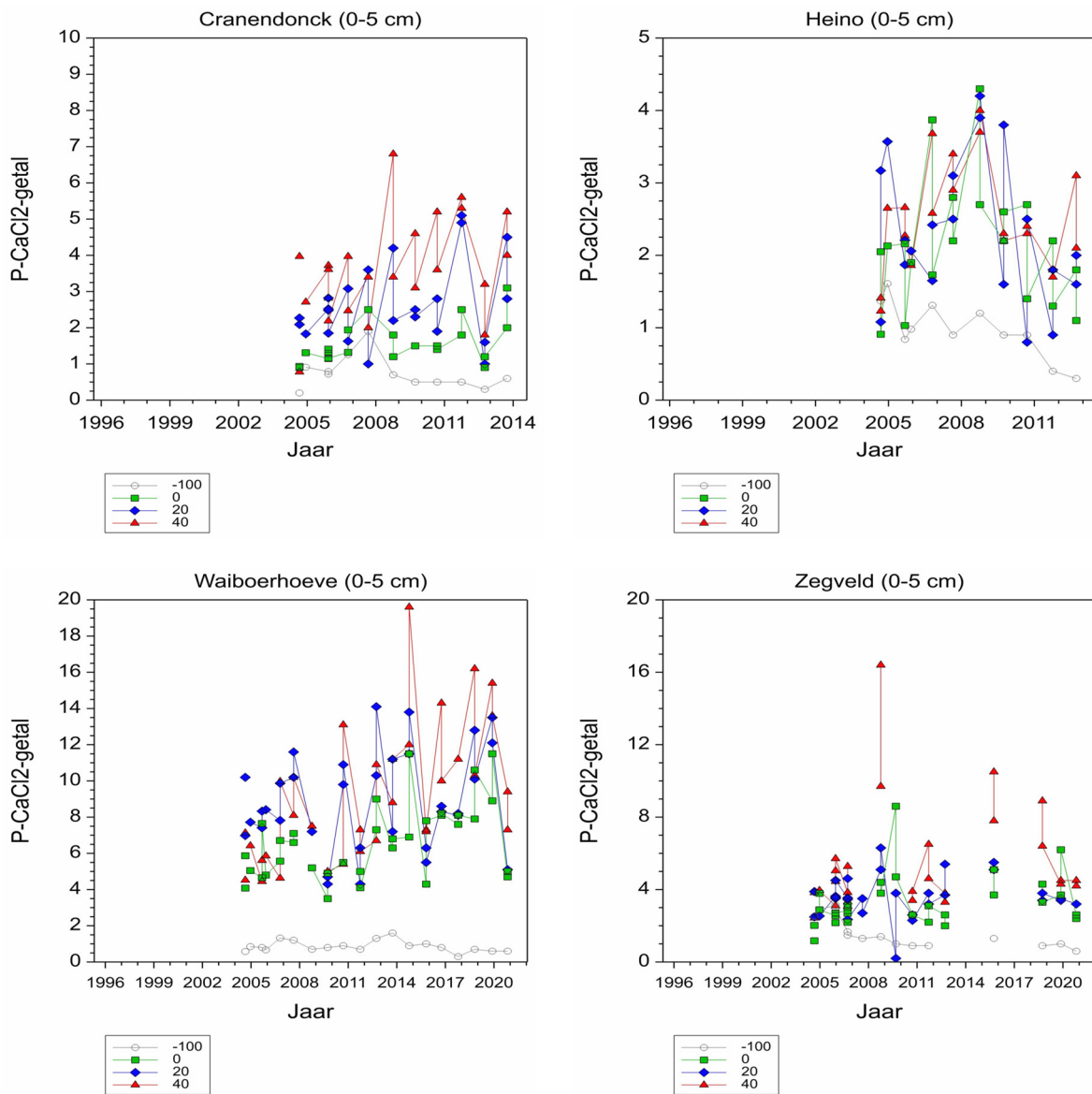
Figuur B1 Verloop in het P-AL-getal (mg P₂O₅/100 g) op de veeljarige grasproeflocaties op Heino, Cranendonck, Waiboerhoeve en Zegveld voor grondmonsters van de **5-10 cm-bodemlaag**, bij drie verschillende fosfaatgiften (evenwichtsbemesting (0), een overschot van 20 kg P₂O₅/ha/jaar (20) en een overschot van 40 kg P₂O₅/ha/jaar (40) gecombineerd met een stikstofoverschot van 180 kg N/ha/jaar. Ieder punt is één grondmonster (n:1). *Figuur 3.2 toont het verloop in P-AL-getal in dezelfde bodemlaag, maar op de veldjes met een stikstofoverschot van 300 kg N/ha/jaar.*



Figuur B2 Verloop in het P-AL-getal (mg $P_2O_5/100$ g) op de veeljarige grasproeflocaties op Heino, Cranendonck, Waiboerhoeve en Zegveld voor grondmonsters van de 0-5 cm-bodemlaag, bij drie verschillende fosfaatgiftes (evenwichtsbemesting (0), een overschot van 20 kg $P_2O_5/ha/jaar$ (20) en een overschot van 40 kg $P_2O_5/ha/jaar$ (40)). Per jaargang en per fosfaatgift zijn er twee punten die corresponderen met de veldjes met een stikstofbehandeling van 180 en 300 kg N/ha/jaar. Ieder punt is één grondmonster (n:1).



Figuur B3 Verloop in het P-CaCl₂-getal (mg P/kg) op de veeljarige grasproeflocaties op Heino, Cranendonck, Waiboerhoeve en Zegveld voor grondmonsters van de **5-10 cm-bodemlaag**, bij drie verschillende fosfaatgiften (evenwichtsbemesting (0), een overschot van 20 kg P₂O₅/ha/jaar (20) en een overschot van 40 kg P₂O₅/ha/jaar (40) gecombineerd met een stikstofoverschot van 180 kg N/ha/jaar. Ieder punt is één grondmonster (n:1). *Figuur 3.3 toont het verloop in P-CaCl₂-getal in dezelfde bodemlaag, maar op de veldjes met een stikstofoverschot van 300 kg N/ha/jaar.*



Figuur B4 Verloop in het P-CaCl₂-getal (mg P/kg) op de veeljarige grasproeflocaties op Heino, Cranendonck, Waiboerhoeve en Zegveld voor grondmonsters van de **0-5 cm-bodemlaag**, bij drie verschillende fosfaatgiftten (evenwichtsbemesting (0), een overschot van 20 kg P₂O₅/ha/jaar (20) en een overschot van 40 kg P₂O₅/ha/jaar (40)). Per tijdstip en per fosfaatgift zijn twee punten gegeven voor veldjes met een (i) stikstofoverschot van 180 kg N/ha/jaar en (ii) 300 kg N/ha/jaar. Ieder punt is één grondmonster (n:1).

Tabel B1 Het verloop van de fosfaatgebruiksnorm in de 5-10 cm-bodemlaag op de veldjes waarbij de fosfaatgift is afgestemd op de gewasonttrekking (0) of 20 of 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking (20, 40) en bij een stikstofoverschot van 180 kg N/ha. Iedere getal komt overeen met een individuele meting. De grasproef bestaat uit drie fosfaatgiften, gecombineerd met twee stikstofniveaus. In paragraaf 3.2.3 is het verloop van de fosfaatgebruiksnorm in de velden met een stikstofgift van 300 kg N/ha weergegeven. Bijlage bij paragraaf 3.2.3.

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. het **P-AL-getal (2020)** (veldjes met 180 kg N overschot)

P ₂ O ₅ overschot:	Cranendonck (zand)				Heino (zand)				Waiboerhoeve (klei)				Zegveld (veen)			
	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40
2004		95	95	95		95	90	90		120	90	90		105	105	105
2005		95	95			95	92.5	95		100	95	95		105	105	
2006		95	95	95		95	90			95	90			105	105	95
2007		95	95	95		95	95	95		95	92.5	90		105	120	105
2008		105	95	95		95	95	95		95	90	90		95	95	75
2009		95	95	95		95	95	95		95	95	75		120	105	95
2010		95	95	90		95	95	90		95	90	75		105	95	95
2011		95	95	90		95	95	90		95	90	90		120	105	95
2012		105	95	95		95	95	95		95	90	75		105	105	105
2013		95	95	90						95	90	75		120	120	105
2014										95	95	75		120	95	95
2015										105	95	90		120	105	95
2016										90	75	75		120	105	95
2017										95	90	75		120	105	95
2018										95	75	75		105	105	95
2019										75	75	75		120	95	95
2020										95	90	75		120	105	95
gemiddelde		97	95	93		95	94	93		96	89	81		112	104	96

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de **gecombineerde indicator (2021)** (veldjes met 180 kg N overschot)

P ₂ O ₅ overschot:	Cranendonck (zand)				Heino (zand)				Waiboerhoeve (klei)				Zegveld (veen)			
	-100	0	20	40	-100	0	20	40	0	20	40	-100	0	20	40	
2004		105	105	95		105	95	105		120	95	105		120	120	105
2005		95	105			100	90	105		105	95	95		120	120	
2006		95	95	90		95	90			105	95			120	112.5	97.5
2007		105	92.5	90		90	90	92.5		90	90	90		120	120	105
2008		105	95	90		95	90	90		95	95	90		95	90	75
2009		105	95	90		95	90	95		95	95	90		120	95	90
2010		105	95	75		105	95	90		95	90	75		120	105	105
2011		105	95	90		95	90	95		105	95	90		120	105	90
2012		105	95	90		105	95	90		95	90	75		120	120	105
2013		105	90	90						90	90	75		120	120	105
2014										95	95	90		120	90	90
2015										105	105	90		120	120	105
2016										90	90	75		120	120	95
2017										95	95	75		120	120	95
2018										95	90	75		120	120	105
2019										75	90	75		105	90	90
2020										95	90	75		120	120	95
gemiddelde		103	96	89		98	92	95		97	93	84		118	111	97

Tabel B2 Het verloop van de fosfaatgebruiksnorm op basis van bemonstering van de **0-5 cm-bodemlaag** op de veldjes zonder fosfaatbemesting (-100) en waarbij de fosfaatgift is afgestemd op de gewasonttrekking (0) of 20 of 40 kg P₂O₅/ha boven de gewasonttrekking (20, 40) en bij een stikstofoverschot van 300 kg N/ha. Ieder getal komt overeen met een individuele meting. De grasproef bestaat uit drie fosfaatgiften, gecombineerd met twee stikstofniveaus. In paragraaf 3.2.3 is het verloop van de fosfaatgebruiksnorm op basis van bemonstering van de 5-10 cm-bodemlaag weergegeven. Bemonstering van de 0-10 cm-bodemlaag – wat tegenwoordig de aangewezen bemonsteringsdiepte is – was geen onderdeel van de monitoringscampagne. Bijlage bij paragraaf 3.2.3.

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. het **P-AL-getal (2020)** in de 0-5 cm bodemlaag (veldjes met 300 kg N/ha overschot)

P2O5 overschot:	Cranendonck (zand)				Heino (zand)				Waiboerhoeve (klei)				Zegveld (veen)			
	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40
2004	95	95	95	95	95	95	95	90	95	75	75	75	90	95	75	75
2005	105			95	100	105	95	92.5	100	75	75	75	105	105		90
2006	105	105	95	95	105			95	95			75	105	95	80	75
2007	100	95	95	100	105	95	95	90	105	75	75	75	120		90	
2008	105	95	95	95	120	95	95	95	105	75	75	75	105	90	75	75
2009	120	95	95	90	120	95	95	95	105	75	75	75	120	90	75	
2010	120	105	95	90	105	95	105	95	105	95	75	75	120	90	75	75
2011	120	95	75	75	120	105	95	90	105	75	75	75	120	95	75	75
2012	120	95	95	90	120	105	105	90	105	75	75	75		95	75	75
2013	120	95	90	95					105	75	75	75				
2014									105	75	75	75				
2015									105	75	75	75	120	95	90	
2016									105	75	75	75				
2017									120	75	75	75				
2018									112.5	85	75	75	120	100	85	85
2019									105	75	75	75	120	75	90	75
2020									105	90	75	75	120	95	75	75
gemiddelde	111	97	92	92	110	99	98	93	105	77	75	75	113	93	80	78

Fosfaatgebruiksnorm o.b.v. de **gecombineerde indicator (2021)** in de 0-5 cm bodemlaag

P2O5 overschot:	Cranendonck (zand)				Heino (zand)				Waiboerhoeve (klei)				Zegveld (veen)			
	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40	-100	0	20	40
2004	105	105	90	105	105	105	95	90	105	75	75	75	90	90	75	75
2005	105			90	108	105	90	83	105	75	75	75	95	95		75
2006	105	100	90	90	105			90	105			75	93	90	75	75
2007	105	98	83	93	113	90	90	75	105	75	75	75	120		90	
2008	120	95	75	75	120	90	90	75	120	75	75	75	105	75	75	75
2009	120	95	90	90	120	90	95	95	120	75	75	75	120	75	75	
2010	120	95	90	75	120	95	105	90	105	105	75	75	120	75	90	75
2011	120	90	75	75	120	105	95	90	120	75	75	75	120	90	75	75
2012	120	105	95	90	120	105	95	90	120	75	75	75		95	75	75
2013	120	95	75	75					95	75	75	75				
2014									120	75	75	75				
2015									120	75	75	75	120	90	75	
2016									120	75	75	75				
2017									120	75	75	75				
2018									120	83	75	75	120	105	83	83
									120	75	75	75	120	75	75	75
									120	75	75	75	120	75	75	75
gemiddelde	114	98	85	86	114	98	94	86	114	78	75	75	111	87	78	76

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3129
ISSN 1566-7197

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, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten 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.



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



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Rapport 3129
ISSN 1566-7197

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, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten 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.

