



**EINDRAPPORT**  
**“MILIEUKUNDIG EN**  
**ECONOMISCH**  
**VERANTWOORD**  
**FOSFORGEBRUIK”**

APLM/2014/3 in opdracht van VLM  
/29.01.2019



## INHOUD

Afkortingen.....	6
Inleiding .....	8
Samenvatting volledig project.....	9
<b>1</b> Luik 1 .....	<b>15</b>
<b>2</b> DWP 1.1: Literatuurstudie .....	<b>17</b>
2.1 Algemeen	17
2.2 Fosforbeschikbaarheid voor het gewas	17
2.3 Mechanismen achter verschillende bodemfosfortesten	18
2.4 Verschillende chemische extracties: capaciteit	19
2.5 Verschillende chemische extracties: intensiteit	36
2.6 Combinaties van chemische extracties: intensiteit en capaciteit	42
2.7 Sink-methodes	46
2.8 Onderlinge correlaties en conversiefactoren	51
2.9 Relatie tussen bodemfosfortesten en fosforverliezen uit bodems	52
2.10 Overzicht	56
2.11 Selectie bodemtesten voor verder onderzoek	59
<b>3</b> DWP 1.2: Kwaliteitscontrole .....	<b>61</b>
3.1 P-AL	61
3.2 P-ox en fosfaatverzadigingsgraad	62
3.3 P-Olsen	64
3.4 P-CaCl <sub>2</sub>	64
3.5 P-DGT	65
3.6 Besluit	66
<b>4</b> DWP 1.2: Robuustheidsanalyse van intensiteitstesten .....	<b>68</b>
4.1 Materiaal en methoden	68
4.2 Resultaten en bespreking	70
<b>5</b> DWP 1.3: gewasrespons relateren aan bodemfosfortesten met behulp van depletieproef	<b>74</b>
5.1 Inleiding	74
5.2 Materiaal en Methoden	74
5.3 Resultaten	81
5.4 Evaluatie bodem-P-testen - potproef	88
5.5 Conclusie	93
<b>6</b> DWP 1.3: Gewasrespons relateren aan bodemfosfortesten met behulp van bemestingsproeven in omliggende regio's .....	<b>95</b>
6.1 Inleiding	95
6.2 Materiaal en Methoden	95
6.3 Resultaten	104
6.4 Discussie	115
6.5 Conclusie	119

<b>7</b>	<b>DWP 1.4: Kolomproeven i.f.v. overschrijden van milieudrempels bij P-uitloging uit bodems..</b>	<b>121</b>
7.1	Inleiding	121
7.2	Materiaal en methoden	121
7.3	Resultaten	123
7.4	Algemene conclusie kolomproeven	135
<b>8</b>	<b>DWP 1.5: Evaluatie.....</b>	<b>136</b>
8.1	Kostprijs	136
8.2	Prestatiekenmerken	136
8.3	Algemene evaluatie van de fosforbeschikbaarheids-testen	137
<b>9</b>	<b>Protocol en controle .....</b>	<b>140</b>
9.1	Protocols	140
9.2	Protocol: Bepaling van fosfor in grond extraheerbaar met 0,01 M CaCl <sub>2</sub> (P-CaCl <sub>2</sub> )	140
9.3	Controle met ringtesten	141
<b>10</b>	<b>Referenties luik 1 .....</b>	<b>144</b>
<b>11</b>	<b>Luik 2 .....</b>	<b>150</b>
<b>12</b>	<b>DWP 2.1: Opstellen opbrengstcurve.....</b>	<b>151</b>
12.1	Initiële opbrengstcurves opgesteld op basis van veldproeven buiten Vlaanderen	151
12.2	Bemestingsproeven uit het verleden in België	153
12.3	Nieuwe bemestingsproeven	156
12.4	Bemestingsproef UGent	208
12.5	Afleiden van kritische fosforbeschikbaarheid voor het gewas in Vlaanderen	208
12.6	Monitoringsproeven kritische P-AL voor gewassen in Vlaanderen	210
<b>13</b>	<b>DWP 2.2: Kritische drempel voor verschillende gewassen.....</b>	<b>212</b>
13.1	Gemodelleerde versus gemeten kritische drempels	212
13.2	Korte beschrijving van het model en interpretatie van de kritische drempels per gewas	214
<b>14</b>	<b>DWP 2.3: verliescurve .....</b>	<b>216</b>
14.1	Kadering en doel	216
14.2	Fosfaatverzadigingsgraad	216
14.3	Relatie tussen FVG en P-AL	218
<b>15</b>	<b>DWP 2.4: Bodem-Plant-Model.....</b>	<b>223</b>
<b>16</b>	<b>Referenties luik 2 .....</b>	<b>224</b>
<b>17</b>	<b>Luik 3 .....</b>	<b>226</b>
<b>18</b>	<b>DWP 3.1: Literatuurstudie fosforgesdrag in de bodem.....</b>	<b>227</b>
<b>19</b>	<b>DWP 3.2: opstellen van fosforbemestingsadvies voor het bereiken van de streefzone .....</b>	<b>228</b>
19.1	Algemeen	228
19.2	Labo- en serreproeven	228
19.3	Veldproeven	235
19.4	Bemestingsadvies op lange termijn	245
<b>20</b>	<b>DWP 3.2: Evolutie van fosforbeschikbaarheid en fosforopname bij uitmijnen .....</b>	<b>250</b>
20.1	Chemische depletie in labo	250
20.2	Modellering	255

<b>21</b>	<b>DWP 3.3 Bemestingsadviezen op korte termijn .....</b>	<b>260</b>
21.1	Op basis van de bemestingsproeven	260
21.2	Vuistregels voor fosforbemesting bij P-AL onder de streefzone	263
<b>22</b>	<b>DWP 3.4: Fosfor dieper dan de bouwlaag .....</b>	<b>267</b>
22.1	Ammoniumlactaat	268
22.2	P-ox	274
22.3	P-CaCl <sub>2</sub> 0,01 M	280
22.4	Invloed bemesting op fosforgehaltes	282
22.5	Besluit	282
<b>23</b>	<b>DWP 3.5: Erosie- versus uitspoelingsverliezen .....</b>	<b>283</b>
<b>24</b>	<b>DWP3.6: bemestings- en managementtechnieken .....</b>	<b>286</b>
24.1	Veldproef Vlaco en UGent (professor Dirk Reheul)	286
24.2	Literatuurstudie	286
<b>25</b>	<b>Referenties luik 3 .....</b>	<b>288</b>
<b>26</b>	<b>Beleidsadviezen .....</b>	<b>290</b>
26.1	Methode voor meten van fosforbeschikbaarheid in de bodem	290
26.2	Streefzone	290
26.3	Bemestingsadviezen	291
26.4	Andere nutriënten en koolstof	292
26.5	Risico op Erosie en uitloging in Vlaanderen	292
26.6	Onderzoeksnoden	292
<b>27</b>	<b>Communicatie .....</b>	<b>293</b>
27.1	Persbericht	293
27.2	Code Goede Landbouwpraktijk	293
27.3	Presentaties voor landbouwers en andere geïnteresseerden	293
27.4	Webinar voor landbouwers (onder voorbehoud)	293
27.5	Voorlichtingssessies	293
27.6	Artikel op maat van landbouwers voor MAP-man	293
<b>28</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>294</b>
<b>29</b>	<b>Bijlage 1: Veldproef 'digestaatproef' van UGent/vlaco (Dirk Reheul) .....</b>	<b>295</b>
29.1	Inleiding	295
29.2	Opzet	295
29.3	Resultaten	296
<b>30</b>	<b>Bijlage 2: monitoringsproeven .....</b>	<b>298</b>
30.1	Kadering	298
30.2	Algemeen	298
30.3	Kritisch fosforgehalte in de plant	298
30.4	Monitoringsproeven 2016	299
30.5	Monitoringsproeven 2017	304
30.6	Tabellen kritische fosforgehaltes	309
<b>31</b>	<b>Bijlage 3: Literatuurstudie DWP 3.1: Veranderingen in fosforbeschikbaarheid .....</b>	<b>321</b>

31.1	Kadering	321
31.2	Inleiding: gedrag van fosfor in de bodem	321
31.3	Fosforbuffercapaciteit	324
31.4	Fixatie- en vrijstellingssnelheid	329
31.5	Waargenomen evoluties in fosforbeschikbaarheid in de tijd	333
31.6	Referenties	341
<b>32</b>	<b>Bijlage 4: Literatuurstudie DWP 3.6: Bemestings- en management-technieken voor duurzaam fosforgebruik.....</b>	<b>345</b>
32.1	Inleiding	345
32.2	Bemestingstijdstip	345
32.3	Rijenbemesting	346
32.4	Extra toediening andere nutriënten	356
32.5	Toepassing fosforvastleggende componenten	357
32.6	Bekalken	359
32.7	Bemestingstype	364
32.8	Samenvatting	376
32.9	Referenties	377

## AFKORTINGEN

Al-Ox: oxalaat extraheerbaar aluminium

BI: betrouwbaarheidsinterval

CVtest: coëfficiënt van variatie van de bodem testwaarden

DGT: Diffusieve gradiënt in dunne film techniek

DWP: Deelwerkpakket

FBV: fosfaatbufferend vermogen

Fe-Ox: Oxalaat extraheerbaar ijzer

FVG: fosfaatverzadigingsgraad

HWP: heet water extraheerbare P

I: P-test indicatief voor de P-intensiteit van de bodem, d.i. de P in bodemoplossing

NF: niet gefilterd

P-AAEDTA: P in ammoniumacetaat en EDTA

P-AL: P in ammoniumlactaat

P-AL<sub>ini</sub>: initiële P-AL

P-AL<sub>fin</sub>: finale P-AL

$\Delta$ P-AL: verandering in P-AL:  $P-AL_{fin} - P-AL_{ini}$

P-Bray: P in ammoniumfluoride en HCl

P-CaCl<sub>2</sub>: P in 0,01 M CaCl<sub>2</sub>

P-CaCl<sub>2ini</sub>: initiële P-CaCl<sub>2</sub>

P-CAL: P in Ca-lactaat, Ca-acetaat en azijnzuur

P-Colwell: P in 0,5M NaHCO<sub>3</sub> (andere methode dan P-Olsen)

P-DGT: P-bepaling via diffusiemethode

P<sub>FeO</sub>: P extraheerbaar met FeO-papier

P<sub>krit</sub>: kritische P testwaarden

P-Mehlich: P in het Mehlich 3-extract

P-Olsen: P in 0,5M NaHCO<sub>3</sub>

P-ox: P in ammoniumoxalaat

P-Ox<sub>ini</sub>: initiële P-Ox

P-resin: P extraheerbaar met anionuitwisselaar

P-tot: totaal P-gehalte

PV: porievolume

Pw: waterextraheerbare P

Q: P-test indicatief voor de voor de P-kwantiteit (Q) van de bodem

RMSE: root mean square error

RO: relatieve opbrengst

Stdev: standaarddeviatie

TSP: triple superfosfaat (TSP)

## INLEIDING

Dit onderzoek heeft als doel om input te geven aan het actualiseren van de kennis en ideeën over verantwoord fosforgebruik, met het oog op een afbouw van de fosfaatvoorraad in bodems met (te) hoge P-reserves en het aanhouden van een wetenschappelijk verantwoorde fosfaatbodemvoorraad. Hierbij gaan economische en milieudoelstellingen hand in hand. Dit project werd gestart naar aanleiding van de vraag voor een goede diagnostiek van fosfor (P) in de bodem die zowel optimale opbrengsten (economisch) als beperkte fosforverliezen (milieukundig) bewerkstelligen. De bestaande bodemtesten voor beschikbaar P werden ooit opgesteld in de periode waarbij de bodemvoorraad aan P laag was of de bodembalans van P positief was. Het doel van dit project is na te gaan of die testen ook geldig zijn bij de huidige situatie van hoge P-bodemvoorraden en een negatieve bodembalans van P, welk van de verschillende testen meest betekenisvol zijn voor P-beschikbaarheid voor het gewas en in welke mate die testen iets kunnen aanduiden over het risico op P-verliezen.

Luik 1 bestaat uit het selecteren en vergelijken van zes bodemtesten om zowel de gewasrespons als het milieurisico voor bodems in Vlaanderen te voorspellen. Op basis van de verzamelde informatie wordt aan de hand van verschillende criteria de beste (combinatie van) bodemfosfortest(en) geselecteerd. Luik 2 bestaat uit de evaluatie van drempelwaarden, afgeleid in luik 1, om tot streefwaarden te komen voor fosforbeschikbaarheid gemeten met de geselecteerde bodemtest(en). Luik 3 & 4 omvatten de implementaties van de bevindingen voor bemestingsadviezen, prognoses en beleid.

Het project werd uitgevoerd tussen 1 januari 2015 en 31 december 2018 door ILVO (Afdeling Plant), Bodemkundige Dienst van België en KU Leuven (Departement Aard- en Omgevingswetenschappen, Afdeling Bodem- en Waterbeheer).



# SAMENVATTING VOLLEDIG PROJECT

Van januari 2015 tot december 2018 liep het project “Milieukundig en economisch verantwoord fosforgebruik”, geïnitieerd en gefinancierd door de Vlaamse LandMaatschappij (VLM). In vier luiken werd kennis verzameld met het oog op verantwoord fosforgebruik in Vlaanderen. In luik 1 wordt op zoek gegaan naar geschikte bodemfosfortesten voor gebruik in Vlaanderen, waarbij zowel economische als milieudoelstellingen in beschouwing worden genomen. In luik 2 wordt/worden de geselecteerde beste bodemfosfortest(en) van luik 1 gekalibreerd. Er wordt op zoek gegaan de relatie van de fosfortest met de relatieve gewasopbrengst en de fosforverliezen. Daarbij wordt nagegaan voor welke waarden zowel de opbrengsten als de fosforverliezen aanvaardbaar zijn. In luik 3 wordt nagegaan hoe fosfor verantwoord kan gebruikt worden. Meer bepaald wordt nagegaan hoe het fosforgehalte in de bodem verandert in de tijd en wat de adviezen voor bemesting en goed management zijn om tot de streefwaarden, goed voor gewas en milieu, te evolueren. In luik 4 zijn conclusies, aanbevelingen en communicatie over het project terug te vinden.

## **Luik 1**

Met behulp van een literatuurstudie werd een eerste selectie gedaan van meest beloftevolle testen voor het meten van de fosforbeschikbaarheid in de bodem. Er bestaan heel veel verschillende intensiteitstesten (zijn een maat voor het onmiddellijk beschikbare fosforgehalte) en capaciteitstesten (zijn een maat voor het bodemfosforgehalte dat op langere termijn kan vrijkomen). Veelal wordt gebruik gemaakt van chemische extracties, die evenwel het proces van aanvulling van fosfor vanuit de vaste bodemfase naar de bodemoplossing bij plantopname, moeilijk in rekening kunnen brengen. Voor een groot aantal testen werd een grondige vergelijking gedaan met behulp van literatuurgegevens: P-AL, P-ox en FVG, P-Olsen, P-Bray, P-Colwell, P-Mehlich, P-AAEDTA, P-CAL, P-CaCl<sub>2</sub> (0,01 M en 0,001 M), P<sub>w</sub>, HWP, P<sub>FeO</sub>, P-resin en P-DGT. Voor elke test werden volgende zaken beschouwd: beschrijving, toepassing en toepassingsgebied, methode, score in ringtesten, praktische haalbaarheid en prijs, relatie met gewasopbrengst, relatie met fosforverliezen uit bodem en andere voor- en nadelen. Op basis van een scoretabel voor de verschillende criteria en een extra vergelijkend experiment voor P-CaCl<sub>2</sub> met 0,01 M en 0,001 M CaCl<sub>2</sub> werd samen met de stuurgroep van dit project beslist om volgende testen voor verder onderzoek mee te nemen: P-AL (P in ammoniumlactaat), P-ox (P in ammoniumoxalaat), de FVG (fosfaatverzadigingsgraad), P-Olsen (P in 0,5 M NaHCO<sub>3</sub>), P-CaCl<sub>2</sub> (P in 0,01 M CaCl<sub>2</sub>) en P-DGT (P-bepaling via diffusiemethode).

De geselecteerde bodemfosfortesten werden eerst aan een kwaliteitscontrole onderworpen. De protocollen die gebruikt worden bij de drie uitvoerende partners van het project werden vergeleken en bijgestuurd om zo vergelijkbaar mogelijke resultaten van eenzelfde staal door de verschillende partners te bekomen. Dit werd voor alle testen nagegaan met behulp van een interne ringtest op 8 verschillende bodemstalen. Door uitgebreide vergelijking, bijkomende testen en aanpassingen waar nodig, werden methodes en protocollen voor de 5 bodemfosfortesten geselecteerd die beperkte variaties in resultaten tussen de drie partners geven. De variaties tussen de resultaten bekomen door de drie partners namen in de ringtest toe volgens de volgorde P-AL < P-ox < FVG ≈ P-CaCl<sub>2</sub> < P-Olsen. Het onderscheidend vermogen nam toe volgens de volgorde P-ox < FVG < P-CaCl<sub>2</sub> < P-Olsen < P-AL << P-DGT. Een bodemfosfortest die op routinebasis geanalyseerd moet kunnen worden, mag niet te afhankelijk zijn van het seizoen of bepaalde omstandigheden als regenval, droogte,... Vooral intensiteitstesten kunnen hierop minder goed scoren. Op basis van vijf staalnames doorheen het jaar bleek P-CaCl<sub>2</sub> gemiddeld over 4 proeflocaties vrij sterk te variëren (standaarddeviatie 18% van de gemiddelde P-CaCl<sub>2</sub> van het perceel). Er was ook geen duidelijk moment in het jaar dat P-CaCl<sub>2</sub> systematisch laagst of hoogst was. Een beperkte analyse op de andere testen toonde aan dat de seizoensvariatie voor P-AL (10%) en P-ox (15%) kleiner en voor FVG (22%) en P-Olsen (53%) groter was dan voor P-CaCl<sub>2</sub>.

Eén van de belangrijkste criteria voor een geschikte bodemfosfortest is het kunnen voorspellen van de gewasrespons, en dit bij verschillende omstandigheden (o.a. verschillende bodemeigenschappen) en scenario's (bijvoorbeeld opbouw of afbouw van bodemfosforgehalte). Dit werd nagegaan met behulp van twee proeven/analyses: (i) lange termijn proefvelden met een duidelijke en grote respons op gewasopbrengst en (ii) een situatie met een negatieve P-balans door een versnelde P-uitmijning van bodem in de serre.

Bodemstalen werden verzameld bij elf lange-termijn-veldproeven in vijf Europese landen, de oudste proeven zijn > 100 jaar oud. Het totale aantal bodemmonsters ( $n = 218$ ) werd geanalyseerd met de zes testen. Alle zes testen waren positief gerelateerd aan de gewasopbrengst van 33 verschillende proefvelden ( $n = 317$  opbrengstdata, verschillende akkerbouwgewassen). Alle testen toonden een positief verband met de gewasopbrengst, uitgedrukt relatief t.o.v. de maximale waarde. Geen van deze tests was duidelijk superieur in het voorspellen van gewasopbrengst t.o.v. de andere tests. Er is een aanzienlijke onverklaarde variatie en de volgorde van succes van de test varieerde naargelang het gehanteerde statistisch criterium. De P-ox test scoorde algemeen slecht. P-AL en P-Olsen presteerden beter dan P-CaCl<sub>2</sub>, FVG en P-DGT wat betreft de R<sup>2</sup> van het Mitscherlich-model. De kritische drempels (bij < 5% opbrengstderving), afgeleid op de veldproeven afzonderlijk waren meer afhankelijk van de locatie dan van het gewas. Dit is logisch aangezien de variabele 'locatie' alle effecten omvat die kunnen worden waargenomen op één locatie (gewas, bodem, klimaat,...). De drempels van de P-CaCl<sub>2</sub>-test per gewas waren beduidend meer consistent tussen locaties of opeenvolgende jaren dan die van P-AL of P-Olsen. Deze unieke compilatie van data liet toe om gewasspecifieke drempels af te leiden. Zo is de kritische drempel (< 5% opbrengstderving) van P-AL gelijk aan 73 mg P/kg bodem (alle gewassen) en varieert die tussen 46 mg/kg voor maïs tot 200 mg/kg voor aardappel. Deze data zijn voorlopige kritische waarden, op basis van lange-termijn-veldproeven in vijf Europese landen, die in luik 2 via bijkomend onderzoek worden gevalideerd voor Vlaanderen.

In de serre werd gedurende bijna twee jaar een uitmijningsproef uitgevoerd. Er werden 8 bodems (P-AL: 110-310 mg P/kg) bemonsterd en in een bakkenproef met deze bodems werd gras gekweekt in aan- of afwezigheid van extra P (respectievelijk +P en -P) en bij twee N-trappen om de snelheid van P-onttrekking te variëren i.f.v. het nutriëntenaanbod (-N voor de behandeling met een lage N compensatie, +N voor de behandeling met voldoende N compensatie). Bij het afsluiten van de proef was er P-gebrek in de -P behandelingen bij hoog N-aanbod, de opbrengstderving (% reductie t.o.v. +P) varieerde naargelang de bodem en was maximaal 62%. Bij laag N-aanbod was de groei en onttrekking beperkter en was de opbrengstderving beperkt tot maximaal 26% (cijfers als combinatie van de laatste twee oogsten om variatie te reduceren). Geen enkele van de zes bodemtesten, toegepast op de bodemstalen op het eind van de uitmijning slaagde erin om de opbrengstderving te voorspellen. De totale onttrekking van P door de plant, uitgedrukt als de cumulatieve P-opname per eenheid bodemgewicht was in overeenstemming met de daling van de P-AL tussen het begin en het einde van de uitmijning, m.a.w. de nutriëntenbalans klopt voor die test. Hetzelfde werd geobserveerd voor de P-ox test, maar voor andere testen was de daling in het beschikbaar P kleiner dan de onttrekking, m.a.w. de twee eerste testen geven een correcter beeld van de direct toegankelijke hoeveelheid dan de andere testen. Door interpolatie werd het tijdstip bepaald vanaf wanneer de opbrengstdaling in de -P 10% was ( $t_{90}$ ), dit varieerde tussen 288 en 514 dagen na inzaaien afhankelijk van het bodemtype en N-behandeling. De cumulatieve P-opname op dat moment werd afgeleid en gedefinieerd als een kritische cumulatieve P-opname (CCP, mg P/kg bodem), De betekenis van die CCP is de hoeveelheid beschikbaar P in de bodem om tot een aanvaardbare opbrengstderving (10%) te komen. Bij het uitzetten van deze waarde ten opzichte van de *initiële* bodem P-testwaarden werd de hoogste R<sup>2</sup> geobserveerd voor P-AL en P-DGT. De combinatie van dit gegeven en het feit dat met de P-AL waarden een correcte nutriëntenbalans kan gemaakt worden, suggereert dat de P-AL test de meest zinvolle betekenis heeft in een uitmijns scenario in vergelijking met de andere testen.

Vervolgens werden de zes testen vergeleken om het risico op uitloging van P uit bodems in te schatten. Op 21 bodemstalen werd gedurende 4 weken de uitloging van P gemeten in onverzadigde kolommen.

De gemiddelde fosforconcentratie in het uitloogwater nam toe met het gehalte P gemeten met elk van de zes bodemtesten. Er zijn geen uitgesproken verschillen in de geschiktheid van de bodemtesten om P-uitloging te voorspellen. De FVG scoort vaak goed, maar komt niet voor alle criteria als winnaar uit de bus. P-DGT, P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL scoren algemeen gezien gelijkaardig, maar de score hangt af van de keuze van het belangrijkste criterium. P-Olsen scoort minder goed en P-ox presteert het minst goed van alle fosfortesten. De verhouding van P-AL over Fe-AL (naar analogie van FVG) scoorde beter dan P-AL alleen en gelijkaardig als FVG. De kolomexperimenten worden verder niet gebruikt voor het afleiden van een milieugrens voor fosforbeschikbaarheid, daarvoor wordt in luik 2 een andere aanpak gevolgd.

Samengevat stelt luik 1 dat P-ox geen goede test is maar dat de vijf andere testen gelijkaardig scoorden voor gewas- of uitlogingsrespons en de voorkeur varieert naargelang het gebruikte criterium. P-AL scoort gemiddeld wat beter dan de andere testen. Met het meenemen van andere criteria als kostprijs, vertrouwdheid, prestatiekenmerken,... blijkt P-AL op zowat alle criteria goed tot zeer goed te scoren. Daarom wordt beslist om P-AL als beste test te selecteren voor verder gebruik in Vlaanderen. Bijkomend werd de beste intensiteitstest, P-CaCl<sub>2</sub>, waarvoor een protocol opgesteld werd, verder opgevolgd in het project (in de veldproeven van luik 2 en de bemestingsadviezen van luik 3). Verschillen tussen resultaten van de twee analyses, bekomen door verschillende laboratoria, worden opgevolgd in de Vlarisub-ringtest.

## **Luik 2**

Als eerste werd de gewasopbrengstcurve gekalibreerd voor P-AL. Er werd initieel gestart met de data van de langetermijn bemestingsproeven uit omliggende regio's, zoals verzameld in luik 1. De initiële kritische P-AL (gerelateerd aan 95% relatieve opbrengst) afgeleid uit deze curves waren een goed richtcijfer voor de zoektocht naar percelen voor nieuwe bemestingsproeven. De bodemtextuur had weinig invloed op deze kritische waarden. Er werden 23 nieuwe bemestingsproeven in Vlaanderen uitgevoerd op percelen met de texturen zand, zandleem en leem, voor de gewassen wintertarwe, maïs en aardappelen. Bij slechts 5 proeven werden significant hogere gewasopbrengsten waargenomen bij toenemende fosforbemestingsdosis. Bij uitzetten van de relatieve gewasopbrengst (opbrengst van de behandeling zonder fosforbemesting ten opzichte van de opbrengst bij de hoogste bemestingstrap) ten opzichte van P-AL in de 23 bemestingsproeven kon een kritische P-AL van 81 mg P/kg (95% BI 42-120 mg P/kg) afgeleid worden. Ook P-CaCl<sub>2</sub> werd opgevolgd in de bemestingsproeven, maar er werden onvoldoende waarden boven de bepalingsgrens gemeten voor een afleiding van de kritische P-CaCl<sub>2</sub>.

Er waren ook nog andere data beschikbaar voor het afleiden van de kritische P-AL voor gewasopbrengst: een bemestingsproef van UGent/Vlaco (2010-2018) en bemestingsproeven uitgevoerd door BDB in het verleden.

Zestien meerjarige proefvelden, aangelegd door BDB tussen 1970 en 1988, werden geselecteerd. Door deze proefvelden werden meer gewassen in de dataset ingesloten en was het mogelijk om het belang en het effect van pH op de kritische fosforbeschikbaarheid te duiden. Deze kritische waarde blijkt lager te zijn voor bodems met een gunstige dan met een suboptimale bodem-pH.

Er werd een algemene kritische P-AL voor gewasopbrengst (95% relatieve opbrengst) in Vlaanderen afgeleid uit de data van de nieuwe bemestingsproeven, de bemestingsproef van UGent en de proeven van BDB uit het verleden. Daarbij werden enkel percelen met gunstige bodem-pH geselecteerd (1158 data). De afgeleide kritische waarde voor P-AL bedraagt afgerond 110 mg P/kg, bij deze waarde is de kans kleiner dan 5% dat de gemiddelde relatieve opbrengst van het gewas beneden 95% daalt door fosforgebrek in de bodem. Bij ongunstige bodem-pH is een hogere kritische P-AL nodig voor 95% relatieve opbrengst. De afgeleide kritische P-AL voor Vlaanderen is dus enkel geldig bij gunstige bodem-pH, en is een oproep om de bodem-pH te optimaliseren.

De kritische P-AL voor Vlaanderen werd afgeleid voor alle gewassen samen omdat P-AL niet van jaar tot jaar snel kan veranderen. Echter de kritische P-AL kan per gewas sterk verschillen. Zo is de gemiddelde kritische P-AL voor maïs 154 mg P/kg (grens 95% eenzijdig betrouwbaarheidsinterval 188

mg P/kg), terwijl deze voor tarwe maar 58 mg P/kg (grens 95% eenzijdig betrouwbaarheidsinterval 87 mg P/kg) bedraagt. Via modellering werd de oorzaak van deze grote verschillen achterhaald. Het gebruikte model is een update van het model van Barber (1984), waaraan de vraagsnelheid van de plant en fosfordesorptie uit snelle en trage bodemfracties werd toegevoegd. De gemodelleerde kritische P-AL-waarden voor maïs en tarwe kwamen goed overeen met de afgeleide waarden op basis van de veldproeven in Vlaanderen. De gevoeligheidsanalyse toont aan dat hogere kritische P-AL-waarden kunnen verwacht worden bij snellere gewasgroei, dikkere wortels, lager bodemvochtgehalte en grotere verhouding trage over snelle bodem-P (bijvoorbeeld na een periode van uitmijning).

Het fosforgehalte in de bodem (P-AL) moet hoog genoeg zijn voor de gewassen, maar mag niet te hoog zijn om ongewenst hoge fosforverliezen richting milieu te voorkomen. Om de uitloogconcentratie te beperken tot 0,1 mg oP/l, de algemene milieugrens voor oppervlaktewater in Vlaanderen, mag de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem niet hoger zijn dan 25% (uitzondering: veenbodems en kalkgedomineerde zandgronden). Daarbij wordt gebruik gemaakt van de fosfaatverzadigingsgraad, voor alle bodemtexturen op dezelfde manier berekend tot 90 cm zoals nu alleen gangbaar in Vlaanderen voor kalkarme zandgronden (uitzondering: kalkgedomineerde zandgronden). Uit een uitgebreide dataset van BDB blijkt dat een individuele bodem met P-AL van 160 mg P/kg 10% kans heeft om een fosfaatverzadigingsgraad (berekend tot 90 cm) hoger dan 25% te hebben. Deze waarde van 160 mg P/kg wordt als milieugrens voor bodems aangenomen.

De streefzone voor P-AL wordt tussen de kritische waarden 110 en 160 mg P/kg gedefinieerd. In deze streefzone worden vanuit de resultaten van dit project de gewasopbrengsten als goed en de milieuverliezen als aanvaardbaar beschouwd. In luik 3 worden bemestingsadviezen geformuleerd om naar deze streefzone te evolueren.

### **Luik 3**

Als eerste werd in de literatuur opgezocht hoe fosforgehaltes en fosforconcentraties in de bodem veranderen. Sommige bodems hebben een hogere fosforbuffercapaciteit zodat voor eenzelfde fosforbemestingsdosis het gemeten fosforgehalte of fosforconcentratie minder verandert. De fosforbuffercapaciteit kan op verschillende manieren gemeten worden. De zeer intensieve laboproeven voor het meten van de fosforbuffercapaciteit zijn interessant voor onderzoek, maar moeilijk om op routinebasis gemeten te worden. Alternatief kan de fosforbuffercapaciteit ingeschat worden op basis van bodemeigenschappen. Vooral het ijzer- en aluminiumgehalte blijken positief gecorreleerd te zijn met de fosforbuffercapaciteit van een bodem. Bij hoge fosfortoestand daalt de fosforbuffercapaciteit. Daarnaast kan een bodem ook fosfor 'fixeren', waarbij het gemeten fosforgehalte of fosforconcentratie daalt in de tijd door vastleggingsmechanismen. Ook hier zal rekening mee gehouden moeten worden om veranderingen van P-AL in de tijd te voorspellen.

Er werd specifiek ingegaan op de veranderingen van P-AL, de bodemfosfortest die in luik 1 als beste test werd geselecteerd. Als eerste werd met behulp van labo- en serre-experimenten nagegaan welke parameters bepalend zijn voor de veranderingen in P-AL. Acht Vlaamse bodems kregen in labo en serre drie verschillende fosforbalansen opgelegd, van pure uitmijning tot zware overbemesting. De veranderingen in P-AL, zowel positief als negatief, waren daarbij minder groot dan op basis van de massabalans ingeschat. Fixatie van P-AL in de tijd bleek groter bij een hoog ijzergehalte en een kleine initiële verhouding van fosforgehaltes gemeten via oxalaat- en AL-extract (P-ox/P-AL). Enkel het ijzergehalte (geen andere bodemeigenschappen of (verhoudingen van) fosforbepalingen als P-CaCl<sub>2</sub>) had een bufferende werking op de verandering van P-AL bij het toevoegen of onttrekken van fosfor. Ook bij andere labotesten met toevoeging van fosfor aan verschillende bodems werden geen invloeden van de initiële P-AL, pH of organisch koolstofgehalte op de verandering van P-AL waargenomen.

Om realistische inschattingen van veranderingen in P-AL te kunnen maken, zijn veldproeven nodig. Er werden resultaten van 33 veldproeven geanalyseerd op de veranderingen in P-AL. Met behulp van multiple lineaire regressie werd een model ( $R^2=0,89$ ) bekomen om de verandering in P-AL in te

schatten. Hierbij bleek het ijzergehalte in de bodem niet bepalend, maar wel de initiële P-AL. Hoe hoger deze was, hoe meer fixatie in de tijd én hoe groter de verandering van P-AL bij een bepaalde fosforbalans. Daarnaast had de tijd een bufferend effect op de verandering van P-AL door een positieve of negatieve fosforbalans. Dit model wordt gebruikt voor langetermijnsbestedingsadvies om een te hoge of te lage waarde van P-AL naar de streefzone voor P-AL te veranderen. Het valt daarbij op dat deze verandering veel tijd vergt. Voor bijvoorbeeld een daling van 260 naar 160 mg P/kg is een negatieve fosforbalans van 450 tot 550 kg P/ha nodig, waarvoor meer dan 10 tot zelfs tientallen jaren uitmijning nodig is. Voor een toename in P-AL is een (sterk) positieve fosforbalans nodig. Daarnaast werd ook een model opgesteld om de jaarlijkse verandering in P-AL in te schatten. Hierin blijkt fixatie en ook de initiële P-AL belangrijk. Hierdoor is de benodigde jaarlijkse fosforbalans om P-AL constant te houden groter voor de bovengrens van de streefzone (160 mg P/kg) dan voor de ondergrens van de streefzone (110 mg P/kg): 13 versus 3 kg P/ha/jaar.

Voor de 33 geanalyseerde veldproeven werd ook een fosforbalans opgesteld. Daaruit bleek dat gemiddeld slechts 27% van de toegediende of onttrokken fosforhoeveelheid teruggevonden of onttrokken werd in/uit de P-AL fractie van de bemonsterde toplaag. De massabalans kon ook niet gesloten worden indien een totale fosforanalyse van de toplaag werd uitgevoerd. Voor de veldproef in Gembloux kon wel 64-76% van de fosforbalans gesloten worden indien totale fosforgehaltes gemeten werden tot 90 cm diepte. Vooral gewassen blijken in staat in diepe bodemlagen fosfor uit fracties te onttrekken die niet gemeten worden met de AL-methode. Uit de analyse van 200 Vlaamse percelen blijkt dat er ook onder 30 cm nog heel wat fosfor te vinden is. De P-AL-waarde gemeten in de 30-60 cm laag was gemiddeld nog de helft van deze gemeten in de 0-30 cm laag. Ook in de 60-90 cm laag was nog een kwart van de P-AL gemeten in de 0-30 cm laag terug te vinden. Voor de P-Ox-meting is de afname met de diepte zelfs nog minder groot, voor P-CaCl<sub>2</sub> is deze wel groter.

Om gevolgen van uitmijnen op lange termijn te gaan voorspellen, werden chemische depletieproeven in het labo uitgevoerd. Met behulp van een adsorbens met grote sorptiecapaciteit kan op relatief korte termijn een grote fosforverwijdering uit de bodem gerealiseerd worden. De fosforonttrekking uit acht Vlaamse bodems werd zo opgevolgd in de tijd. De experimentele data werden gebruikt om een tweepool-model van desorptiekinetieken te modelleren. Uit een bodem kan fosfor onttrokken worden uit een kleinere snel desorbeerbare pool, die kan aangevuld worden door een grotere traag desorbeerbare pool. Dit model werd in luik 2 gebruikt om verschillen in kritische P-AL voor verschillende gewassen te verklaren.

Er werd eveneens een empirisch model opgesteld met deze twee bodemfosforpools, de bijbehorende snelheidsconstanten afgeleid uit de potproef van luik 1 en een reductiefactor voor de fosforopname door het gewas in functie van de verhouding tussen en de som van de twee fosforpools. Dit model laat toe om de evolutie in fosforbeschikbaarheid en fosforopname over lange tijd te modelleren in functie van de gebruikte bemestingsdosis. Indien de fosforbemesting lager is dan de fosforopname, resulteert dit in veranderingen van de fosforpools, groei en fosforopname door het gewas. Dit werd voor verschillende scenario's uitgevoerd met tarwe als modelgewas, en waarbij verondersteld werd dat er fosforopname was tot 45 cm diepte. Startend van een hoge P-AL van 400 mg P/kg werd gemodelleerd dat bij een bemesting van 24 kg P/ha/jr (55 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jr, MAP 5), dit is een beperkte uitmijning, er geen tekort in aanbod voor tarwe te verwachten valt in de volgende 75 jaar. Zelfs bij nulbemesting duurt het 140 jaar voor de P-AL zakt onder de kritische waarde voor tarwe. Als er gestart wordt bij 160 mg P/kg (bovengrens streefzone, milieugrenswaarde) valt er bij lichte uitmijning enkel een kleine daling in fosforopname maar niet in opbrengst waar te nemen. Bij volledige uitmijning is er voor tarwe een opbrengstdaling van 5% te verwachten na 45 jaar. Deze modelberekeningen worden ondersteund door de waarnemingen in de veldproef van Gembloux.

Naast een bemestingsadvies op lange termijn, om de streefzone voor P-AL te bereiken, is voor percelen met lage P-AL ook een bemestingsadvies op korte termijn nodig. De fosforbalans dient daarvoor duidelijk positief te zijn (meer bemesten dan onttrekken), maar de bemestingsproeven uitgevoerd in luik 2 kunnen geen uitsluitsel geven over hoeveel extra fosforbemesting precies nodig is voor een

optimale opbrengst op korte termijn. Er kunnen dus geen adviezen geformuleerd worden over hoe het hierboven afgeleide advies op lange termijn best verdeeld wordt over de tijd. In elk geval kan het interessant zijn om fosfobemesting te plaatsen (bijvoorbeeld rijenbemesting), de bemesting kort voor de teelt uit te voeren, rekening te houden met de fosforwerkingscoëfficiënt van het mesttype en te kiezen voor minder fosforgevoelige gewassen zoals tarwe en suikerbieten. Daarnaast is een gunstige bodem-pH, een goede bodemstructuur, vochtigheid en bodemleven belangrijk voor de fosforvoorziening voor het gewas.

Fosforverliezen treden op via uitspoeling alsook door oppervlakkige afstroming en erosie. Er kan berekend worden wat op termijn de maximaal uitlopende fosforconcentratie op 90 cm diep is in Vlaanderen, vertrekkende van de grote databank van gemeten P-AL-waarden in Vlaanderen in 2010-2012 (standaard grondontledingen BDB), en met behulp van de waargenomen relatie tussen P-AL en FVG (0-90 cm), en de theoretische relatie tussen FVG en de op termijn maximaal uitlopende fosforconcentratie op de referentiediepte. De berekende maximale uitlopende fosforconcentratie op lange termijn varieert sterk tussen Vlaamse gemeentes (0,031 – 0,321 mg o-P/l). Voor de stroombekkens in West-Vlaanderen worden de hoogste waarden vastgesteld. Het afspoelingsrisico voor P, berekend door het NEMO model, is daarentegen het hoogst voor het Bovenscheldebekken en het Demerbekken.

In een literatuurstudie werd ingegaan op het belang van bemestingstechnieken en managementstrategieën voor het veranderen van de fosforbeschikbaarheid voor gewas en milieu. Het bemestingstijdstip kan een beperkte invloed hebben op de gewasopbrengst, maar indien er kort voor regenval bemest wordt, kan de invloed op fosforverliezen wel groot zijn. Via rijenbemesting kan efficiënter bemest worden, maar een hogere opbrengst in vergelijking met volleveldsbemesting wordt niet altijd waargenomen. Dit wordt bijvoorbeeld ook waargenomen bij het gebruik van startfosfor bij maïs. Voor fosforverliezen zijn de gevolgen van rijenbemesting weinig gekend. Fosforvastleggende componenten kunnen in de bodem toegepast worden voor een effectieve daling van de fosforverliezen, maar het gebruik is controversieel. Ook bekalking kan fosforverliezen soms beperken, maar door de veelheid van meespelende processen is ook het omgekeerde effect mogelijk. Bij suboptimale bodem-pH is de minimaal benodigde P-AL voor optimale gewasopbrengst hoger dan voor gunstige bodem-pH. Aanpassen van de bodem-pH kan in dergelijke situatie bijgevolg sneller en efficiënter dan fosfobemesting de gewasopbrengst optimaliseren.

Voor sommige bemestingsvormen is de werking van fosfor kleiner dan deze van snelwerkende kunstmest, maar enkel op korte termijn. Voor verschillende bemestingsvormen werd deze verminderde werking uit de literatuur en nieuwe proeven afgeleid. Op lange termijn wordt vastgesteld dat de bemestende waarde voor verschillende types zowel op het vlak van verhogen van fosforbeschikbaarheid als opbrengst, gelijkaardig is. In een veldproef van UGent werden ook nog geen duidelijke verschillen in fosforbeschikbaarheid en opbrengst bij verschillende bemestingstypes waargenomen na acht jaar. Soms worden hogere fosforverliezen vastgesteld bij bemesting met stalmest, digestaat en drijfmest in vergelijking met kunstmest, wat gelinkt kan worden aan effecten via organische zuren en calcium.

#### **Conclusie (luik 4)**

In Luik 4 worden beleidsadviezen geformuleerd die voortvloeien uit het project: P-AL als geselecteerde bodemfosfortest, de streefzone voor P-AL tussen 110 en 160 mg P/kg, bemestingsadviezen om tot deze streefzone te komen, voorspellingen op lange termijn, verliezen via uitspoeling en afspoeling en het belang van andere nutriënten en koolstof. Een onderzoeksnood is bijkomend onderzoek rond streefzonewaarden en bemestingsadviezen voor graslanden. De resultaten van dit onderzoeksproject zullen via verschillende communicatiekanalen (praktijkguides, webinar, studiedagen en artikels) tot bij de landbouwers, beleidsmakers en geïnteresseerden gebracht worden.

# 1 LUIK 1

In luik 1 wordt op zoek gegaan naar (een) goede bodemtest(en) voor het meten van de fosforbeschikbaarheid. Daarbij is het de vraag of een intensiteits- of capaciteitsmeting of een combinatie van beiden bijdragen tot een goede inschatting van de fosforbeschikbaarheid van een bodem.

Een plant neemt fosfor op uit de bodemoplossing, een zeer kleine fractie van het totale fosforgehalte in de bodem. Door heraanvulling van de bodemoplossing vanuit de fosforvoorraad op de vaste bodemfase, wordt ook (een deel van) deze vaste fosforfractie beschikbaar voor de plant. Omgekeerd wordt fosfor, toegediend via bemesting, in de bodem grotendeels vastgelegd in/op deze vaste bodemfase door processen als sorptie en precipitatie. Door de grote variatie aan vastleggingsprocessen en interagerende bodemcomponenten, ontstaat er een breed scala van zeer labiele tot zeer sterk gefixeerde fosforfracties in de bodem. Hierbij zal vooral de **snelheid** waarmee fosfor kan vrijkomen uit deze vaste fracties - en de mate waarin die snelheid overeenkomt met de vraagsnelheid van de plant - kritisch zijn voor een optimale gewasgroei (Koopmans *et al.*, 2004a).

Het is een uitdaging om de plantbeschikbare fosforfractie in de bodem te kwantificeren, gezien het dynamische en complexe proces van fosforvastlegging en -vrijstelling. Veelal wordt de fosforbeschikbaarheid bepaald met behulp van een chemische bodemextractie, waarna de geëxtraheerde fosforhoeveelheid gemeten wordt. Een mild extractiemiddel zoals 0,01 M CaCl<sub>2</sub> of water maakt enkel de onmiddellijk beschikbare fosforfractie, de **fosforintensiteit**, vrij. Hardere extractiemiddelen als ammoniumlactaat en -oxalaat zetten daarnaast ook sterker vastgelegde fosfor vrij, zodat een maat voor de **fosforcapaciteit** bekomen wordt.

Enkelvoudige chemische extracties gaan voorbij aan het dynamische en complexe karakter van de fosforbeschikbaarheid. Het inschatten van depletie en heraanvulling kan wel gebeuren indien tijdens de extractie gebruik gemaakt wordt van een *sink* die fosfor uit de bodemoplossing vastlegt. Belangrijke nadelen van de *sink*-methodes zijn de omslachtigheid en de kostprijs van de analyse. Een eenvoudiger en goedkoper alternatief is de combinatie van twee chemische extracties (van Rotterdam-Los, 2010). Met informatie over zowel de fosforintensiteit als de fosforcapaciteit kan de fosforbeschikbaarheid voor gras en maïs beter ingeschat worden dan op basis van een enkelvoudige fosforextractie (Bussink *et al.*, 2011a, b). Bovendien geeft de verhouding van de capaciteit en intensiteit een beeld van de buffercapaciteit van de bodem, i.e. het vermogen om fosfor na te leveren.

In Vlaanderen wordt momenteel gebruik gemaakt van de fosforextractie met behulp van ammoniumlactaat in azijnzuur op pH 3,75 (PAL) (Goetelen *et al.*, 2011), die een maat geeft voor de fosforcapaciteit. Een probleem met deze methode is dat de fosforbeschikbaarheid anders wordt ingeschat afhankelijk van het bodemtype (Csathó *et al.*, 2002), vermoedelijk door overschattingen bij hoge bodem-pH (Sibbesen, 1983; Otabong *et al.*, 2009; van Rotterdam-Los, 2010) en onderschattingen bij bodems met veel klei of hoge gehalten aan gehydrateerde aluminium- of ijzeroxides (Hammond and White, 2008). Dit illustreert het feit dat het meten van de beschikbaarheid met behulp van chemische extracties op empirische en niet op mechanistische gronden gebaseerd is (Jordan-Meille *et al.*, 2012).

In dit luik wordt nagegaan of **alternatieve methodes** een meerwaarde kunnen bieden voor het bepalen van de **fosforbeschikbaarheid** in Vlaamse bodems. Met behulp van een literatuurstudie worden een aantal beloftevolle testen (zowel intensiteits- als capaciteitsbepalingen) geselecteerd voor verdere vergelijking (DWP1.1). In DWP1.2 worden de geselecteerde bodemfosfortesten onderworpen aan een kwaliteitscontrole en robuustheidstest. In DWP 1.3 wordt de geschiktheid van de testen voor het voorspellen van de gewasrespons nagegaan. Dit wordt nagegaan met (i) een serre-experiment met versnelde P-uitmijning (negatieve P-balans) en (ii) lange termijn proefvelden met een duidelijke en grote respons op gewasopbrengst. Vervolgens wordt ook de geschiktheid van de

fosfortesten voor het voorspellen van fosforuitloging geëvalueerd met behulp van kolomexperimenten.

Voor de evaluatie (DWP 1.5) van de verschillende bodemfosfortesten en hun combinaties naar hun geschiktheid wordt de term **'fosforbeschikbaarheidsindex'** gedefinieerd. Een fosforbeschikbaarheidsindex is een bodemfosfortest of een combinatie van twee bodemfosfortesten (intensiteit en capaciteit) waarmee de fosforbeschikbaarheid in een bodem wordt ingeschat. Deze benadering laat toe om intensiteits-, capaciteits- en buffercapaciteitstesten (en hun combinaties) te vergelijken qua geschiktheid.

Het is belangrijk dat de fosforbeschikbaarheidsindices onder verschillende bodemomstandigheden geëvalueerd worden. Daartoe moeten ze getest worden onder verschillende, voor Vlaanderen relevante, bodemtexturen, pH's, gehalten aan fosforsorberende van –vastleggende elementen (oa ijzer- en aluminium(hydr)oxides, calcium,...), ... Daarnaast moeten de fosforbeschikbaarheidsindices geëvalueerd worden op hun gevoeligheid aan hysteresis. Met andere woorden: kunnen de testen het verschillend gedrag van fosfor bij toenemend fosforgehalte (jarenlange bemesting) versus bij afnemend fosforgehalte (jarenlange uitmijning) detecteren? Het is bijgevolg van belang zowel bemeste als uitgemijnde bodems in het onderzoek op te nemen. Andere evaluatiecriteria voor de fosforbeschikbaarheidsindices als kosten, robuustheid, bruikbaarheid onder veldomstandigheden en herhaalbaarheid worden meegenomen in de evaluatie.

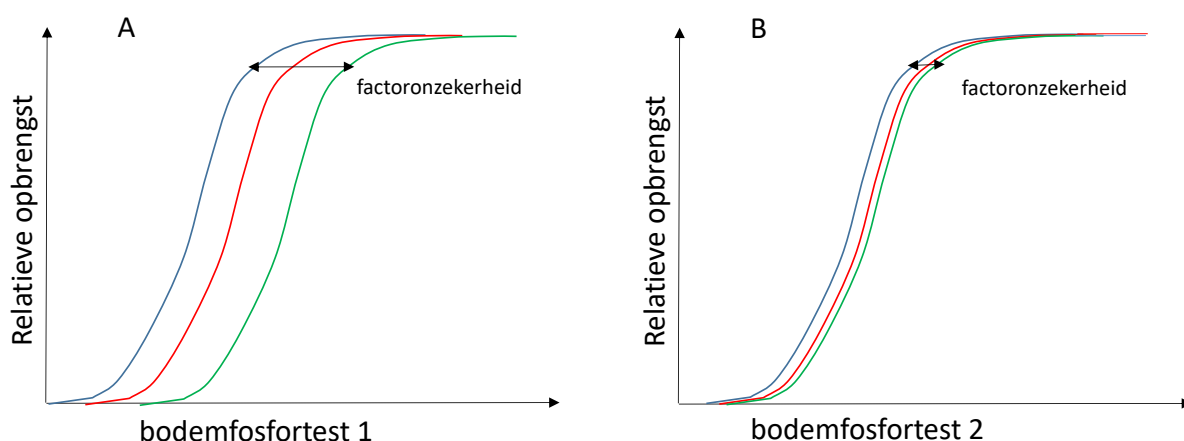
In DWP 1.3 worden reeds voorlopige kritische waarden voor fosforbeschikbaarheid voor de gewassen afgeleid, waarmee in luik 2 verder gewerkt wordt. Kritische waarden voor fosforbeschikbaarheid voor het milieu worden pas in luik 2 afgeleid.



## 2 DWP 1.1: LITERAATUURSTUDIE

### 2.1 ALGEMEEN

In deze literatuurstudie wordt een overzicht gegeven van de talrijke verschillende **methodes** die gebruikt worden om fosforbeschikbaarheid in de bodem voor het gewas te meten. Voor elke methode wordt gedetailleerd weergegeven wat de mechanismen achter de methode zijn, waar ze toegepast wordt en wordt er ingegaan op het protocol, de praktische haalbaarheid, en de voor- en nadelen. Een belangrijk onderwerp voor elke methode is de relatie tussen de relatieve gewasopbrengst (gewasopbrengst ten opzichte van de maximale gewasopbrengst zonder limitatie van fosforbeschikbaarheid) en het meetresultaat van de bodemfosfortest. Een goede bodemfosfortest is een goede maat voor de fosforbeschikbaarheid gemeten **bij verschillende bodemcondities**. In deze zin moet de relatieve opbrengst van een gewas gelijkaardig zijn bij een gelijk bodemfosfortestresultaat in verschillende bodems (hogere  $R^2$  in voor test 2 (rechts) dan voor test 1 (links) bij beschouwing van verschillende bodems in Figuur 1). Omgekeerd moet de kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling van een bepaald gewas gelijkaardig zijn voor verschillende bodemcondities (beperkte breedte van de dubbele pijl in Figuur 1). Bij een goede bodemfosfortest zijn algemene uitspraken over te lage, voldoende of te hoge fosforbeschikbaarheid in een bodem mogelijk, en kunnen algemeen geldende fosforbestedingsadviezen opgesteld worden.



Figuur 1. Variatie van de relatieve opbrengst bij verschillende fosforbeschikbaarheid gemeten door twee verschillende (combinaties van) bodemfosfortest(en) toegepast op dezelfde bodemstalen. Bodemfosfortest 1 (links) scoort minder goed dan bodemfosfortest 2 (rechts) voor drie verschillende bodems (blauw, rood en groen), omdat er in test 1 een te grote factoronzekerheid is om de kritische drempel voor opbrengstvermindering af te leiden tussen bodems onderling, m.a.w. de tweede test is meer robuust.

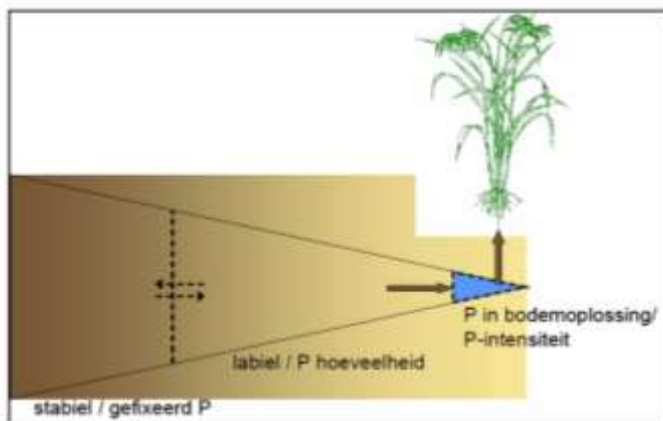
De robuustheid van een test voor het voorspellen van de relatieve gewasopbrengst is een belangrijk **criterium** voor het selecteren van een (combinatie van) test(en) die intensief getest zullen worden in pot- en veldproeven. Daarnaast is het ook belangrijk dat er relaties gevonden worden tussen de bodemfosfortest en het risico op fosforverliezen (milieukundig aspect). Er zal echter ook rekening gehouden worden met de praktische haalbaarheid voor toepassing in Vlaanderen, het gebruik in andere landen/regio's, gegevens over kwaliteitscontrole,...

### 2.2 FOSFORBESCHIKBAARHEID VOOR HET GEWAS

Planten nemen fosfor op via de bodemoplossing (het waterige deel van de bodem). Van de totale hoeveelheid fosfor in de bodem is er echter maar een zeer kleine fractie aanwezig in de

bodemoplossing (de “**P-intensiteit**”, zie Figuur 2), het overige deel is gebonden aan de vaste bodemfase door sorptie of precipitatie. Toch is de plantbeschikbare fractie groter dan alleen maar de hoeveelheid fosfor in de bodemoplossing omdat de fosfor aanwezig op de vaste bodemfase (deels) in oplossing kan komen. Dit kan doordat de **fosfor in de bodemoplossing aangevuld wordt door de vaste bodemfase bij depletie** (=“lediging van de bodemoplossing”) als gevolg van opname door planten. De fosforfractie die vanuit de vaste fase in oplossing kan komen, wordt ook wel de uitwisselbare P-fractie genoemd. Daarenboven hebben wortels vaak bepaalde strategieën, zoals excretie van organische zuren, die de fosfor van de vaste bodemfase deels kunnen vrijzetten.

**Niet alle fosfor in de vaste bodemfase kan even gemakkelijk of snel in de bodemoplossing terecht komen en zo beschikbaar worden** voor de plant. Fosfor kan immers op veel verschillende manieren vastgelegd worden. Ook binnenin één sorptieklasse zijn er veel verschillen in sterkte van fosforsorptie, bijvoorbeeld naargelang de kristalliniteit van de aanwezige ijzeroxides in de bodem of naargelang de afbreekbaarheid van het organisch materiaal. Zo bevindt er zich in de vaste bodemfase een fosforfractie met een continuüm aan sorptiestertes en desorptiesnelheden, bepalend hoe gemakkelijk en hoe snel de fosfor kan vrijkomen in de bodemoplossing. Er wordt vaak een opdeling van de vaste fosforfractie gemaakt in een labiele en een gefixeerde fractie naargelang de gemakelijkheid of snelheid waarmee de fosfor in oplossing kan komen (Figuur 2). Zo zal fosfor aanwezig in gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal zich eerder in de labiele fractie bevinden, terwijl fosfor gesorbeerd op ijzeroxides eerder in de gefixeerde fractie onderverdeeld wordt. Deze opdeling is echter arbitrair, want ook tussen de labiele en gefixeerde fractie is er uitwisseling mogelijk (zie Figuur 2) waardoor uiteindelijk bij langdurige depletie alle P in de bodemoplossing kan terechtkomen (Syers *et al.*, 2008).



Figuur 2. De direct plantbeschikbare fosforfractie in de bodemoplossing kan aangevuld worden vanuit de labiele vaste fase (uit Bussink *et al.* (2011a)).

De mogelijkheid van een bodem om de P in de bodemoplossing aan te vullen vanuit de vaste fase wordt ook wel de **P-buffercapaciteit** genoemd. De hoeveelheid fosfor die vrij kan komen voor plantopname binnen de groeiperiode hangt af van de snelheid waarmee de fosfor op de vaste fase de waterige fase kan aanvullen. Deze snelheid moet hoger zijn dan de kritische opnamesnelheid van de plant; anders zijn er limiterende condities voor de plant (Koopmans *et al.*, 2004a). De aanvulling vindt continu plaats en kan zeer lang doorgaan, zoals blijkt uit veldexperimenten waarbij meerdere decennia geen fosforbemesting werd toegepast (Syers *et al.*, 2008).

### 2.3 MECHANISMEN ACHTER VERSCHILLENDE BODEMFOSFORTESTEN

Er bestaan **zeer veel verschillende methodes** voor het meten van de fosforbeschikbaarheid. Gezien de fosforbeschikbaarheid voor planten een dynamisch en complex proces is (zie 2.2), zal de meting van de beschikbaarheid altijd een vereenvoudiging van de werkelijkheid zijn.

### 2.3.1 Chemische extracties

Het meest bekende en meest toegepaste type van bodemfosfortest is de chemische bodemextractie. Naargelang het **extractiemiddel** worden bepaalde fosforfracties opgelost of gedesorbeerd en deze worden dan gemeten en als 'beschikbaar' gecatalogeerd.

Er zijn **zwakke middelen, die een maat zijn voor de fosforintensiteit, en sterke middelen, die een maat zijn voor de fosforcapaciteit** van de bodem (Dekker and Postma, 2008). De fosforintensiteit is de hoeveelheid P aanwezig in de bodemoplossing (blauw deel in Figuur 2), eventueel vermeerderd met de fosforhoeveelheid op de vaste fase die onmiddellijk kan vrijkomen. Deze fosforintensiteit is direct beschikbaar voor het gewas gedurende een korte periode. De fosforcapaciteit is een maat voor de hoeveelheid labiel P (of uitwisselbaar P): deze is aanwezig op de vaste fase en levert een bijdrage aan het weer aanvullen van P in de bodemoplossing bij depletie (deel van bruin gedeelte in Figuur 2). De fosforcapaciteit geeft daarom een indicatie van de hoeveelheid P die over een langere periode (meerdere jaren) beschikbaar kan komen voor het gewas.

### 2.3.2 Isotopische technieken

Met behulp van isotopen is het mogelijk om de plantbeschikbare fosforfractie en de snelheid van fosfrovrijgave door de bodem te meten (Frossard *et al.*, 2000). Deze methodes zijn echter niet geschikt voor metingen op routinebasis wegens te complex, te veel afval en te duur.

### 2.3.3 Sink-methodes

Om het depletie- en aanvullingsproces van bodemfosfor zoals geïnitieerd door plantenwortels in rekening te brengen, kan gebruik gemaakt worden van een *sink*. Deze *sink* legt fosfor uit de bodemoplossing vast (bijvoorbeeld door sorptie) waardoor aanvulling vanuit de vaste bodemfase wordt gestimuleerd en in stand gehouden door verdere vastlegging van fosfor door de *sink*, **gelijkaardig aan de fosforopname door wortels**. De hoeveelheid fosfor vastgelegd door de *sink* gedurende een bepaalde tijdsperiode is dan een maat voor de fosforbeschikbaarheid.

## 2.4 VERSCHILLENDE CHEMISCHE EXTRACTIES: CAPACITEIT

Relatief agressieve extractiemiddelen kunnen fosfor van de vaste fase vrijmaken. De hoeveelheid geëxtraheerde fosfor is dan een maat voor de fosforcapaciteit van de bodem. Naargelang de aard van het extractiemiddel komt meer of minder fosfor vrij. Algemeen kan deze volgorde van grootte van de geëxtraheerde fosforfracties aangenomen worden (meer uitleg over de specifieke methodes hieronder): P-ox > P-AL > P-Mehlich > P-Bray > P-AAEDTA, P-CAL > P-Olsen (Neyroud and Lischer, 2003).

De werking van de extractiemiddelen is *grosso modo* in 3 categorieën op te splitsen (Jordan-Meille *et al.*, 2012):

- **zure oplossing:** het extractiemiddel lost calciumfosfaten op en valt in meer of mindere mate aluminium- en ijzeroxides aan waardoor de op het oxideoppervlak gesorbeerde fosfor vrijkomt.
- **anionuitwisseling:** anionen in het extractiemiddel als acetaat, bicarbonaat, citraat, lactaat of sulfaat worden tegen gesorbeerde fosfaat uitgewisseld.
- **kationcomplexatie en -hydrolyse:** kationen als aluminium en calcium die neergeslagen componenten met fosfor vormen, kunnen gecomplexeerd worden door fluoride of organische anionen (citraat, lactaat) aanwezig in het extractiemiddel. Deze kationen kunnen ook neerslaan met bicarbonaat dat aanwezig is in het extractiemiddel. Bij al deze processen komt fosfor vrij.

Hieronder worden verschillende gangbare chemische extracties besproken. Per extractie wordt niet alleen de methode en toepassing overlopen, maar worden ook voor- en nadelen aangehaald. Er zijn echter ook **algemene voor- en nadelen** verbonden aan het gebruik van chemische extracties

(capaciteitsbepaling). Deze worden hier besproken en worden niet telkens herhaald bij de specifieke extracties.

#### *Voordelen*

- Chemische extracties kunnen relatief **snel** uitgevoerd worden, zijn praktisch haalbaar en relatief **goedkoop**. Zo vraagt BDB voor de analyse van P-AL (zie verder) op een vochtig aangeleverd bodemstaal 21€ (exclusief BTW). De prijs zakt relatief per analyse indien ook andere analyses op het bodemstaal aangevraagd worden.
- Extracties die een maat geven voor de fosforcapaciteit zijn relatief robuust en zullen **weinig variëren door tijdelijke veranderingen** als kleine variaties in bodem-pH, weersomstandigheden,... (Koopmans *et al.*, 2003)

#### *Nadelen*

- Chemische extractiemiddelen werken helemaal anders dan plantenwortels. Ze kunnen bijvoorbeeld niet het proces van depletie van P in de bodemoplossing en heraanvulling vanuit de vaste fase in rekening brengen (Holford, 1997). De extractiemiddelen kunnen fosforfracties vrijmaken waar een plant niet aan kan, of omgekeerd (Cooperband and Logan, 1994). Ze brengen het tijdsaspect niet in rekening en vaak werken ze met een opgelegde, niet altijd even realistische, pH. Met andere woorden, de **relatie tussen P-beschikbaarheid en de chemische extracties is gebaseerd op empirische gronden en niet op mechanistische gelijkenissen** (Jordan-Meille *et al.*, 2012). Een theoretische wetenschappelijke fundering ontbreekt dan ook.
- De reacties veroorzaakt in de bodem door het extractiemiddel zullen anders zijn bij verschillende bodemtypes, bij aanwezigheid van andere mineralen en neerslagen,... Als gevolg daarvan kan de relatie tussen de geëxtraheerde fosforhoeveelheid en de plantbeschikbaarheid sterk **variëren volgens het bodemtype** (Frossard *et al.*, 2000). Daarbij komt dat een plant fosfor opneemt uit de bodemoplossing waardoor de **fosforbeschikbaarheid binnen één jaar eerder bepaald wordt door de fosforintensiteit dan de fosforcapaciteit**. Verschillen in fosforbuffercapaciteit, i.e. de verhouding van de capaciteit over de intensiteit, tussen bodemgroepen zullen bijgevolg ook verschillen geven in kritieke fosforcapaciteit voor opbrengstdaling tussen deze groepen (Johnston *et al.*, 2014). Algemeen geldende correlaties tussen deze bodemfosfortesten voor fosforcapaciteit, en fosforbeschikbaarheid en de daaraan gelinkte bemestingsadviezen zijn dus moeilijk te formuleren. De mate waarin opdelingen in bodemgroepen moeten gemaakt worden, hangt af van het specifieke extractiemiddel en de beschouwde bodems.
- Extracties die een maat geven voor de fosforcapaciteit zijn **relatief ongevoelig aan veranderingen** doordat ze een grote fosforhoeveelheid extraheren. Slechts na meerdere jaren van een positieve of negatieve fosforbodembalans zullen veranderingen in de geëxtraheerde fosforhoeveelheid duidelijk worden, hoewel door veranderingen in intensiteit wel reeds wijzigingen in fosforbeschikbaarheid voor het gewas (Koopmans *et al.*, 2004b) en voor fosforuitloging (Vanden Nest, 2015) mogelijk zijn. Dit fenomeen zal uitgesprokener zijn bij meer agressieve extractiemiddelen (grotere fosforfracties vrijgemaakt).

### **2.4.1 Fosfor geëxtraheerd met behulp van een ammoniumlactaat-extract (P-AL)**

#### **2.4.1.1 Beschrijving**

Door een bodemstaal met ammoniumlactaat in azijnzuur op pH 3,75 te extraheren, wordt fosfor via verschillende processen in oplossing gebracht: door de lage gebufferde pH (3,75) lossen calciumfosfaten op en worden aluminium- en ijzeroxides gedeeltelijk aangetast waardoor gesorbeerde fosfor vrijkomt. Lactaat en acetaat kunnen in competitie treden met fosfaat waardoor

anionuitwisseling optreedt. Lactaat kan ook aluminium en calcium complexeren (kationcomplexatie) waardoor neerslagen van aluminium en calcium met fosfor in oplossing komen. Bij al deze processen komt relatief veel fosfor vrij van de vaste bodemfase.

#### 2.4.1.2 Toepassing

De AL-extractie is de **standaardmethode** om de plantbeschikbare P te kwantificeren in Vlaanderen, Hongarije, Zweden, Noorwegen, Slovenië en Litouwen (Jordan-Meille *et al.*, 2012). In Nederland wordt deze methode voor grasland gebruikt (ook in de wetgeving). In Vlaanderen wordt deze methode gebruikt door de Bodemkundige Dienst van België (BDB) voor het vaststellen van de fosforklasse van de bodem en voor het opstellen van bemestingsadviezen. De analyse is tevens opgenomen in het BAM-analysecompendium in het kader van het mestdecreet (Anonymous, 2010b). Daar wordt evenwel vermeld dat de methode niet geschikt is voor bodems met pH-KCl > 7,0.

#### 2.4.1.3 Methode

De P-AL bepaling is een 1:20 (massa bodem:massa extract) extractie met 0,1 M ammoniumlactaat en 0,4 M azijnzuur bij een gebufferde pH van 3,75. Er wordt 4 uur geschud (Goetelen *et al.*, 2011). De methode is in detail uitgewerkt in het **Compendium** bemonstering- en analysemethodes voor mest, bodem en veevoeder (BAM) (Anonymous, 2010b), beschikbaar op <http://emis.vito.be>. In Nederland bestaat de NEN-norm 5793:2010: 'Bepaling van fosfaat in grond extraheerbaar met een ammoniumlactaat-azijnzuurbuffer (P-AL).

De meetmethodiek werd **gevalideerd** in een VITO-studie (Goetelen *et al.*, 2011) waarin aanbevelingen over de methode geformuleerd worden die nog moeten opgenomen worden in het analysecompendium, zoals het bewaren van de stockoplossing bij 4°C in afwezigheid van licht en het gebruik van glazen recipiënten bij de extractie. Uit de validatiestudie bleek dat analyse van P in het extract met behulp van spectrofotometrie of met ICP-AES geen verschil geeft. In een Zweedse studie werd echter een verschil van 16% tussen beide methodes gevonden (Ulén, 2006). Ook in andere studies worden soms hogere concentraties met behulp van ICP-AES waargenomen (Pierzynski *et al.*, 2005; Eriksson, 2009), wellicht doordat organische P wel door ICP-AES maar niet met behulp van de kleurreactie wordt gemeten (Van Moorleghem *et al.*, 2011).

Een andere -mogelijks belangrijke- invloedsfactor is de **pH** van de extractie. Hoewel de pH van het extractiemiddel gebufferd is bij pH 3,75, kan de pH van het extract zelf toch hoger of lager liggen door de aanwezigheid van zuren of basen in de geëxtraheerde bodem. Zo kunnen pH's hoger dan 4,0 gemeten worden in extracten van kalkhoudende polderbodems. De invloed van de pH van het extractiemiddel werd duidelijk in de VITO-studie (Goetelen *et al.*, 2011) waar een extractiemiddel op pH 3,9 gemiddeld (over 10 bodems) maar 82% extraheerde van de P geëxtraheerd door een extractiemiddel op pH 3,75. De BDB voert daarom een **theoretische wiskundige correctie** uit voor bodems waarvan het extract een pH hoger heeft dan 3,75 (voor zeer kalkrijke bodems, zelden in Belgische bodems). Deze correctie wordt niet doorgevoerd in andere Vlaamse en Nederlands laboratoria.

Recente resultaten van Vlaamse **ringtesten** georganiseerd door ILVO en VITO geven goede (= lage) variaties in gemeten P-AL getallen door Vlaamse en buitenlandse laboratoria en een relatief klein aantal laboratoria met een te hoge of te lage Z-score (Tabel 1). Resultaten van metingen van P-AL op verschillende bodemstalen door vijf laboratoria in verschillende landen waren voor slechts 4 van de 10 labo-labo-combinaties gelijkaardig (Neyroud and Lischer, 2003).

Laboratoria die analyses van P-AL binnen het kader van het mestdecreet willen uitvoeren, dienen hiervoor een erkenning van de Vlaamse Overheid te hebben. Aan de erkenning hangen diverse voorwaarden vast, o.a. gebruik van het voorgeschreven compendium voor staalname en analyse, slagen voor ringtesten en audits door VITO.

Tabel 1. Resultaten van recente Vlaamse ringtesten voor de analyse van P-AL op bodems

Ringtest	Aantal labo's	Gemiddelde <sup>a</sup> (mg P/100g)	Standaard-deviatie <sup>a</sup> (mgP/100g)	Variatie <sup>a</sup> (CV%)	N( Z >2) /N <sub>totaal</sub> <sup>b</sup>	Referentie
ILVO mei 2010	9	26.8	0.4	1,3%	3/9	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2010)
ILVO nov 2010	9	86,0	7,5	8,7%	1/9	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2011a)
ILVO mei 2011	6	22,9	1,2	5,2%	1/6	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2011b)
ILVO nov 2011	5	59,9	2,3	3,8%	0/6	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2012a)
ILVO mei 2012	7	19,4	1,7	8,8%	1/7	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2012b)
ILVO nov 2012	11	81,6	3,1	3,8%	1/11	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2013)
Coalla VITO 2012	12	32,9	2,9	8,8%	1/12	(Anonymous, 2012)
ILVO mei 2013	6	29,0	2,4	8,3%	1/6	(Amery <i>et al.</i> , 2013)
Coalla VITO 2013	10	29.0	1.5	5.2%	0/10	(Anonymous, 2013)
ILVO nov 2013	11	27,5	3,8	13,8%	1/11	(Amery <i>et al.</i> , 2014a)
ILVO mei 2014	7	3,88	0,3	7,7%	1/7	(Amery <i>et al.</i> , 2014b)
Coalla VITO 2014	8	22.3	0.5	2.2%	1/8	(Anonymous, 2014)

<sup>a</sup> Berekend zonder outliers; <sup>b</sup> aantal labo's op het totaal aantal labo's die een Z-score hoger dan 2 of lager dan -2 halen (= niet slagen voor de ringtest).

#### 2.4.1.4 Praktische haalbaarheid

De methode is relatief eenvoudig en reeds decennia standaard in Vlaanderen gebruikt. De extractietijd is vrij beperkt (4 uur). Ook andere elementen kunnen in het extract geanalyseerd en gebruikt worden voor bemestingsadviezen. Voor de analyse van P-AL in een vochtig aangeleverd bodemstaal vraagt BDB 21€ (exclusief BTW).

#### 2.4.1.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

In **Zweden** zijn zoals in Vlaanderen bemestingsadviezen gebaseerd op P-AL (Albertsson, 2008). In de onderbouwende proeven worden soms wel en soms geen opbrengstveranderingen bij toenemende P-AL waargenomen voor verschillende granen (Bertilsson *et al.*, 2005). Over het algemeen wordt geen opbrengstverhoging bij een P-AL boven 10 mg P/100 g bodem vastgesteld, zoals ook waargenomen voor gerst in een potexperiment met 4 Zweedse bodems (Aurell, 2000). Ook in **Noorwegen** wordt P-AL gebruikt voor bemestingsadviezen (Krogstad *et al.*, 2008). Gegevens van onderbouwende experimenten in Noorwegen zijn niet beschikbaar (ook niet na navraag).

Op een lange termijn fosforveldproef in Ath werden geen significante opbrengstreducties waargenomen voor zomergranen, wintertarwe, wintergerst en suikerbieten op de behandelingen zonder fosforbemesting (Vanderdeelen *et al.*, 1985; Vandendriessche *et al.*, 1994). Dit wil zeggen dat het P-AL-gehalte gemeten in deze behandeling, 8 mg P/100 g, hoger is dan de kritische P-AL voor opbrengstreductie van deze gewassen op deze leembodem. Voor aardappelen werden wel significante opbrengstreducties waargenomen, zodat de kritische P-AL voor aardappelen hoger is dan 8 mg P/100 g. De kritieke P-AL voor opbrengstdaling van suikerbieten (suiker) lag op een leembodem in Gembloux tussen 7 en 14 mg P/100 g (Legrand *et al.*, 2012).

## **Opstelling van beoordelingsklassen en bemestingsadviezen in Vlaanderen**

*In België is Prof. Joseph Baeyens de grondlegger van de beoordelingsklassen. Als pas aangestelde professor aan de Katholieke Universiteit te Leuven ondernam hij in 1933 verschillende studiereizen naar vooraanstaande wetenschappers, zoals Hissink (toenmalig secretaris-generaal van ISSS) te Groningen, Mitscherlich te Koningsbergen en Neubauer te Dresden. Volgens Baeyens zorgde hun aanpak ervoor dat bemestingstheorieën evolueerden van empirische wetenschap naar een rationale wetenschap.*

*De studiereis die Prof. Baeyens in 1934-1935 op vraag van de Minister van Koloniën De Vleeschouwer ondernam in Kongo ligt aan de basis van het opstellen van beoordelingsklassen en bijhorende bemestingsadviezen voor Belgische bodems. De doelstelling van die studiereis was een studie van de vruchtbaarheid van de gronden in Kongo en van de bodemvereisten voor belangrijke tropische gewassen. Met behulp van een uitgebreid netwerk werden op 18 maanden meer dan 6000 bodemmonsters genomen. Deze werden verscheept naar het Bodemkundig Station te Leuven voor analyse en interpretatie. De resultaten van deze reis en de interpretatie van de analyses verschenen in 'Les sols d'Afrique Centrale' dat in 1938 gepubliceerd werd door het INEAC (Institut National pour l'Etude Agronomique au Congo belge). De inleiding geschreven door Sir Russel (directeur van het onderzoeksstation te Rothamsted en voorzitter van ISSS) alsook de gouden medaille van de "Académie d'Agriculture de France" onderlijnen de internationale relevantie en appreciatie van dit werk.*

*Naar aanleiding van het bodemvruchtbaarheidsonderzoek uitgevoerd in Congo, verleende in 1937 het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek een toelage aan het Bodemkundige Station (Katholieke Universiteit Leuven), onder leiding van Professor Baeyens, met als doel de vruchtbaarheidsnormen voor Belgische bodems vast te leggen. Hierbij lag de focus op pH, humus, fosfor en kali. Professor Baeyens voerde hiervoor een uitgebreide survey in gans België uit. Ook het Ministerie van Landbouw verleende steun voor het uitvoeren van dit werk. Via een uitgebreid netwerk van onderwijzers, geestelijken en andere geschoolde vrijwilligers (1-2 staalnemers per gemeente) werden over gans België bodemstalen verzameld en ter analyse naar het Bodemkundige Station te Leuven verstuurd. Behalve het bodemstaal (niet alleen de bouwvoor, maar ook een dieper bodemstaal was een vereiste) werd nog heel wat extra informatie verzameld en meegestuurd: bodemprofielbeschrijving, de perceelshistoriek (teelten, bemestingen, opbrengsten, etc.) en de perceelstoestand. Het voorkomen van gebreksverschijnselen en/of ziekten werd genoteerd. Daarnaast werden ook veldproeven (uitgevoerd door opgeleide medewerkers op het terrein) en potproeven (te Heverlee) uitgevoerd om de relatie tussen bodem en opbrengst te bestuderen en in kaart te brengen. Fosfor werd in deze tijd nog als P-CaL en niet als P-AL gemeten. Op basis van de onderzoeken konden vanaf 1939 de eerste bemestingsadviezen in de praktijk worden uitgevoerd. In 1943 publiceerde ir. Domien Stenuit, hoofdassistent aan het Bodemkundig Station, 'Grondontleding in de praktijk'. Hierin werden de bodemanalyses voor het eerst geëvalueerd in bodemvruchtbaarheidsklassen. Door het toenemende succes en het toenemend aantal bodemstalen richtte Baeyens in 1946 de Bodemkundige Dienst van België op als onafhankelijk organisme. Vanaf haar ontstaan heeft de Bodemkundige Dienst van België het wetenschappelijk onderzoek naar plantenvoeding en bemesting steeds verdergezet. Dit onderzoek werd gefinancierd door het I.W.O.N.L. en focuste zich naast P en K vooral op Mg, spoorelementen en N. In 1948 verscheen het eerste bodemvruchtbaarheidsoverzicht 'De vruchtbaarheidstoestand en meststoffenbehoefte van de Belgische gronden', door Baeyens en Stenuit. In dit werk wordt een overzicht gegeven van 130.000 ontlede bodemstalen en evenveel bemestingsadviezen die leidden tot een oogstvermeerdering van 20-30%. Ter illustratie wordt in onderstaande uittreksel de bodemvruchtbaarheidstoestand voor de*

Zandstreek Mechelen-Gent weergegeven. Merk op dat dit voor fosfor nog steeds waarden zijn voor P-CaL en nog niet voor P-AL.

TABEL V  
**LANDBOUWSTREEK IIIb : DE ZANDSTREEK MECHELEN-GENT.**  
 Totaal aantal ontlede gronden : 7.252.

Reactie (PH)	Beoordeling	% gronden	Fosfor	Beoordeling	% gronden
— 4,8	Overdreven zuur	7,7	— 5,0	Sterk uitgeput	8,0
4,9 — 5,2	Sterk zuur	19,2	5,1 — 10,0	Tam. sterk uitgeput	20,4
5,3 — 6,0	Tam. sterk zuur	44,6	10,1 — 16,0	Onvold. gehalte	26,2
6,1 — 7,0	Licht zuur	23,9	+ 16,0	Goed geh. tot res.	45,4
+ 7,0	Neutraal of alcaal	4,6			
Kali	Beoordeling	% gronden	Koolstof (humus)	Beoordeling	% gronden
— 7,0	Sterk uitgeput	19,9	— 1,00	Laag gehalte	9,7
7,1 — 15,0	Tam. sterk uitgeput	32,9	1,01 — 1,40	Onvold. gehalte	27,6
15,1 — 20,0	Onvold. gehalte	22,1	1,41 — 1,80	Middelst. geh.	28,2
+ 20,0	Goed geh. tot res.	24,1	+ 1,80	Goed tot z.g. geh.	34,5
Stikstof	—	% gronden	Verhouding C/N	—	% gronden
— 100	—	10,7	— 8,0	—	4,5
101 — 140	—	47,2	8,1 — 10,0	—	16,4
141 — 180	—	23,7	10,1 — 12,0	—	27,2
+ 180	—	12,4	+ 12,0	—	51,9

Naast wetenschappelijke onderbouwing waren ook kostprijen, het kunnen bepalen van meerdere elementen per extractie en het internationale kader belangrijke aspecten bij het verder ontwikkelen van bodemanalyses en bijhorende bemestingsadviezen. Zo gingen ir. Stenuit en Piot in 1954 op werkbezoek naar Duitsland, met als doel de organisatie van grondonderzoek op grote schaal in Duitsland en de kostprijs van een grondontleding te bestuderen, om de kostprijs van dergelijke grondontleding in België te verminderen. Tijdens deze studiereis bezochten zij dr. Riehm in Augustenberg. Via hun contacten met dr. Riehm nam de Bodemkundige Dienst van België in de periode 1957-1959 deel aan internationale ringtesten voor de P-AL-methode die op eigen initiatief werden georganiseerd door dr. Riehm (Augustenberg, Duitsland), dr. Egner (Uppsala, Zweden), dr. Balks (Munster, Duitsland), Bedrijfslabo in Oosterbeek (Nederland, voorloper van BLGG) en de Bodemkundige Dienst van België. Vervolgens werd geleidelijk aan overgestapt van de P-CaL-methode naar de P-AL-methode in België. Studies uitgevoerd eind jaren '50 en begin jaren '60, in opdracht van IWONL, hebben voor een verdere verfijning gezorgd van de vruchtbaarheidsklassen die oorspronkelijk voor P-CaL werden opgesteld. Deze verslagen zijn niet meer in het bezit van de Bodemkundige Dienst van België. Er zal nog gepoogd worden om deze in andere archieven (KaDOC, Nationaal Rijksarchief) op te sporen. Momenteel loopt ook een doctoraatsstudie bij de Bodemkundige Dienst van België en ICAG, KU Leuven, waarin het ontstaan en de ontwikkeling van de plantenvoeding en bemestingsleer in Vlaanderen onderzocht wordt.



Veldgegevens uit Hongarije (Sárdi *et al.*, 2009) toonden een hogere opbrengst en P-gehalte van gerst bij toenemend P-AL gehalte (een logaritmische correlatie). Boven een P-AL gehalte van 4 (zure bodems) of 7 mg P/100 g (kalkrijke bodems) werd in 9 lange termijn veldexperimenten in Hongarije geen opbrengststijgingen voor maïs meer waargenomen (Csathó *et al.*, 2002). Voor wintertarwe was dit het geval rond 10 mg P/100g op een leembodem met pH 7 (Bercz *et al.*, 2005).

In Nederland werd op een landbouwbedrijf geen correlatie gevonden tussen de opbrengst van het grasland en het P-AL getal van verschillende percelen (15-48 mg P/100g), wellicht doordat P geen limiterende factor was (Corré *et al.*, 2004). Veldproeven met gras over een groot aantal Nederlandse locaties gaven aan dat bij een P-AL van 4 mg P/100 g 80% relatieve opbrengst bekomen wordt, bij P-AL 13 mg P/100 g 94% en bij P-AL 22 mg P/100 g 98% (Bussink *et al.*, 2011b).

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie tussen maïsopbrengst en P-AL waargenomen, hoewel hier ook bodems met lage fosforbeschikbaarheid meegenomen werden (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote spreiding van de percelen zijn wellicht andere factoren (weer, bodemtextuur, ziekten,...) bepalend voor de opbrengst.

Potproeven uitgevoerd met 74 bodems afkomstig vanuit Europa, Amerika en Australië toonden aan dat de tarweopbrengst goed gecorreleerd was met  $P_w$ , maar niet met P-AL (2-41 mg P/100 g) (Van der Pauw, 1971).

Voor fosfaatgevoelige groenten werd vastgesteld dat P-CaCl<sub>2</sub> er in slaagt om Vlaamse bodems te onderscheiden waarop wel dan niet een gewasreactie op fosforbemesting kan verwacht worden, wat niet het geval was voor P-AL (Verhaeghe, 2014).

Hoewel de ammoniumlactaatextractie een relatief harde extractie is, wordt **niet alle fosfor die beschikbaar is op lange termijn voor het gewas, vrijgemaakt**. Na 23 jaar nulbemesting in een experiment in Ath (België) werd een daling van P-AL van 16 mg P/100 g naar 8 mg P/100 g geobserveerd (Vandendriessche *et al.*, 1994). Dit komt overeen met het 'verdwijnen' van ongeveer 630 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha gemeten door de ammoniumlactaatextractie. De gewassen hebben echter bijna het dubbele van deze hoeveelheid afgevoerd, waaruit besloten kan worden dat het gewas meer fosfor ter beschikking heeft dan gemeten door de P-AL-methode in de bouwvoor.

Zoals voor de meeste fosforcapaciteitstesten, is de **kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling verschillend tussen bodemtypes**. Dit kan verklaard worden door verschillen in fosforbuffercapaciteit tussen bodems (Johnston *et al.*, 2014) en door variaties in reacties van het extractiemiddel bij verschillende bodemtypes (zie 2.3.1). Zo geeft deze zure extractie andere reacties in zure en kalkrijke bodems waardoor er grote verschillen waren in Hongaarse langetermijnexperimenten tussen de voorspelling in beschikbaarheid voor zure en kalkrijke bodems bij gelijke relatieve opbrengst van maïs (Csathó *et al.*, 2002). Wellicht overschat de P-AL-methode de P-beschikbaarheid in kalkrijke bodems aangezien CaCO<sub>3</sub> (met gesorbeerde P) en Ca-P neerslagen oplossen bij de lage pH van de P-AL methode, wat niet het geval is in natuurlijke omstandigheden (Sibbesen, 1983; Otabbong *et al.*, 2009; van Rotterdam-Los, 2010). Zure extracten als ammoniumlactaat zouden dan weer de fosforbeschikbaarheid in bodems met veel klei of veel gehydrateerde aluminium- of ijzeroxides onderschatten (Hammond and White, 2008).

Het ammoniumlactaatextract is een relatief agressief extract, P-AL is bijgevolg relatief weinig gevoelig voor het detecteren van een daling in fosforbeschikbaarheid voor het gewas. Dit wordt geïllustreerd met een labo-experiment waarin gedurende 3 jaar op een bodem intensief aan 'fosfornijmining' werd gedaan, dit is afvoer van grote hoeveelheden gras (met relatief hoge P-opname) zonder toevoeging van fosforbemesting. Het fosforgehalte in het gras was na een klein jaar reeds gedaald tot 2,34 g P/kg, onder de P-behoefte van runderen (2,8-3,0 g P/kg (van Krimpen *et al.*, 2012)), terwijl het P-AL-getal pas na twee jaar onder de streefzone voor fosforbeschikbaarheid in grasland (zoals gedefinieerd door de BDB, nl. 19-25 mg P/100g bodem) daalde (Koopmans *et al.*, 2004b). Een Vlaamse zandleembodem (P-AL 20 mg P/100 g) gedurende enkele jaren niet bemesten gaf geen daling in P-AL maar wel minder

risico op fosforuitloging (Vanden Nest, 2015). Fosforintensiteitsparameters daalden wel sneller en volgden meer de reële fosforbeschikbaarheid voor het gras en voor uitloging.

## 2.4.2 Fosfor geëxtraheerd met behulp van een oxalaatextract (P-ox)

### 2.4.2.1 Beschrijving

Met behulp van een ammoniumoxalaatextract bij pH 3 kunnen amorfe en microkristallijne ijzer- en aluminiumoxides vrijgemaakt worden (Schwertmann, 1964). Hierdoor komt **fosfor, geassocieerd met deze oxides, vrij**. De ammoniumoxalaatextractie is agressiever dan de ammoniumlactaatextractie waardoor doorgaans meer fosfor vrijkomt uit de bodem (Neyroud and Lischer, 2003).

### 2.4.2.2 Toepassing

P-ox wordt in wetenschappelijke literatuur veelvuldig gemeten als de totale fosforfractie die op lange termijn beschikbaar is voor het gewas. Ze wordt **nauwelijks gebruikt voor commerciële toepassingen en fosforbestedingsadviezen**.

In Vlaanderen en Nederland wordt P-ox gebruikt voor de **bepaling van de fosfaatverzadigingsgraad** (FVG) van kalkarme zandbodems (van der Zee *et al.*, 1990b). Dit is de verhouding van P-ox ten opzichte van de fosfaatbindingscapaciteit van de bodem, bepaald door de hoeveelheid aluminium- en ijzeroxiden geëxtraheerd met oxalaat. De fosfaatverzadigingsgraad zou gerelateerd zijn aan het risico op fosforuitloging (van der Zee *et al.*, 1990a).

De methode is **onbruikbaar voor kalkrijke bodems** doordat de pH van het extract van deze bodems boven pH 3 ligt. Bij hogere pH kan de geëxtraheerde fosforhoeveelheid afnemen (Guo and Yost, 1999).

### 2.4.2.3 Methode

Volgens de methode van Schwertmann (1964) wordt een oplossing van 0,2 M oxaalzuur/oxalaat op pH 3 gebruikt om een bodem te extraheren (1:50). Er moet gedurende twee uur in het donker geschud worden. Er bestaan echter **verschillende protocols** van deze methode, waardoor ook variaties in geëxtraheerde fosforconcentraties mogelijk zijn.

In Vlaanderen wordt de methode voor oxalaatextractie beschreven in de methode voor de fosfaatverzadigingsgraad, in het Compendium bemonstering- en analysemethodes voor mest, bodem en veevoeder (BAM) (Anonymous, 2010a), beschikbaar op <http://emis.vito.be>. In Nederland bestaat de NEN-norm 5776:2014: 'Bodem - Bepaling van ijzer, aluminium en fosfor in een ammoniumoxalaat-oxaalzuurextract voor het vaststellen van de fosfaatverzadiging'. Recente resultaten van Vlaamse ringtesten georganiseerd door ILVO en VITO geven **relatief lage variaties in gemeten P-ox getallen** door Vlaamse en buitenlandse (vooral Nederlandse) laboratoria en een relatief klein aantal laboratoria met een te hoge of te lage Z-score (Tabel 2).

Tabel 2. Resultaten van recente Vlaamse ringtesten voor de analyse van P-ox op bodems

Ringtest	Aantal labo's	Gemiddelde <sup>a</sup> (mmolP/kg)	Standaard-deviatie <sup>a</sup> (mmol/kg)	Variatie <sup>a</sup> (CV%)	N( Z >2) /N <sub>totaal</sub> <sup>b</sup>	Referentie
ILVO nov 2010	8	24.7	4.1	16.6%	2/8	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2011a)
ILVO nov 2011	8	29.5	1.9	6.4%	0/8	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2012a)
ILVO nov 2012	9	24.2	1.4	5.8%	1/9	(Vandecasteele <i>et al.</i> , 2013)
Coalla VITO 2012	12	18.0	2.1	11.3 %	1/12	(Anonymous, 2012)
Coalla VITO 2013	10	23.0	0.6	2.6%	1/8	(Anonymous, 2013)
ILVO nov 2013	8	19,5	1,3	6.8%	1/8	(Amery <i>et al.</i> , 2014a)
Coalla VITO 2014	8	36.6	1.0	2.7%	2/8	(Anonymous, 2014)

<sup>a</sup> Berekend zonder outliers; <sup>b</sup> aantal labo's op het totaal aantal labo's die een Z-score hoger dan 2 of lager dan -2 halen (= niet slagen voor de ringtest).

#### 2.4.2.4 Praktische haalbaarheid

De methode is relatief eenvoudig en wordt momenteel reeds standaard in Vlaanderen gebruikt. De extractietijd is beperkt (2 uur).

#### 2.4.2.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

Een oxalaatextractie brengt relatief veel fosfor in oplossing, ook fosfor die niet onmiddellijk beschikbaar is voor het gewas. Depletie-experimenten met gras gaven echter wel aan dat **op lange termijn een groot deel van de P-ox beschikbaar kan komen voor het gewas** (Koopmans *et al.*, 2004b). Dit was ook reeds aangetoond via chemische uitmijning (Lookman *et al.*, 1995).

In veldexperimenten op 3 locaties in **Zwitserland** werd de variatie in relatieve opbrengst van gras voor 28% verklaard door P-ox, veel minder dan door P-resin (69%) (Liebisch, 2011). De relatieve breedte van het 95% betrouwbaarheidsinterval van kritische P-ox (95% relatieve opbrengst) was wel smaller voor P-ox (54%) dan voor P-resin (88%), wellicht door de lage waarde van P-resin (4 mg P/kg) t.o.v. P-ox (230 mg P/kg).

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie tussen maïsoopbrengst en P-ox waargenomen, hoewel ook bodems met lage fosforbeschikbaarheid meegenomen werden (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote geografische spreiding van de percelen zijn wellicht andere factoren (weer, bodemtextuur, ziekten,...) bepalend voor de opbrengst.

Overige studies rond P-ox betreffen **vooral tropische bodems**. Van negen bodemfosfortesten scoorde P-ox eerder gemiddeld voor het verklaren van de variatie in relatieve maïsoopbrengst (53%, alle testen: 41-84%) en voor de relatieve breedte van het betrouwbaarheidsinterval van de kritische P-ox voor maïsoopbrengstdaling (43%, alle testen: 30-69%) (Six *et al.*, 2013).

### 2.4.3 Fosfor geëxtraheerd met behulp van NaHCO<sub>3</sub>: P-Olsen

#### 2.4.3.1 Beschrijving

Het extractiemiddel NaHCO<sub>3</sub> zorgt ervoor dat in kalkbodems de vrije Ca<sup>2+</sup> concentratie wordt verlaagd door CaCO<sub>3</sub>-vorming. In zure bodems wordt de pH verhoogd door de gebufferde pH 8,5 van het extractiemiddel, treden hydroxylanionen in competitie met P voor sorptie en wordt de oppervlaktelading van oxiden meer negatief (Olsen *et al.*, 1954). Al deze mechanismen hebben een P-desorptie tot gevolg. P-Olsen is **van de vele capaciteitsmethoden één van de minder sterke extracties**. P-Olsen is bijgevolg over het algemeen kleiner dan P-AL en P-ox (Neyroud and Lischer, 2003). Dit maakt dat P-Olsen wat gevoeliger is voor veranderingen in fosforbeschikbaarheid dan P-AL en P-ox.

### 2.4.3.2 Toepassing

De Olsen-methode om plantbeschikbare fosfor te meten, wordt onder andere gebruikt in Frankrijk, Denemarken, VK, Italië, Spanje, Australië en Nieuw-Zeeland (Soinne, 2009). Deze methode wordt ook in wetenschappelijke literatuur **veelvuldig gebruikt**.

### 2.4.3.3 Methode

Bodem wordt in een 1:20-verhouding met 0,5 M NaHCO<sub>3</sub> geschud gedurende 0,5 uur. Er bestaat een ISO-norm voor de methode (ISO 11263:1994, Soil quality – determination of phosphorus – Spectrometric determination of P soluble in sodium hydrogen carbonate solution).

Uit ringtestresultaten van WEPAL blijkt dat er een vrij grote variatie in meetresultaten van laboratoria kan voorkomen en dat er voor sommige stalen een relatief groot aantal laboratoria zijn met een te hoge of te lage Z-score (Tabel 3). Metingen van P-Olsen op verschillende bodemstalen door vier laboratoria in verschillende landen toonden gelijkaardige resultaten tussen 3 laboratoria en één laboratorium met afwijkende waarden (Neyroud and Lischer, 2003). De gemiddelde variabiliteit over 9 verschillende laboratoria van 24 sterk verschillende bodems uit de VS was het kleinst voor P-Mehlich (0,10), iets groter voor P<sub>FeO</sub> (0,12) en P-Bray (0,13) en beduidende groter voor P-Olsen (0,22) (Kleinman *et al.*, 2001).

Tabel 3. Ringtestresultaten voor P-Olsen van WEPAL-ringtesten

Ringtest	Bodemstaal	Aantal labo's	Gemiddelde <sup>a</sup> (mg/kg)	Standaard-deviatie <sup>a</sup> (mg/kg)	Variatie (CV%)	N( Z >2) /N <sub>totaal</sub> <sup>b</sup>
<b>WEPAL 2010.1</b>	Klei	38	57.7	8.6	15%	5/38
	Zand	38	69.6	22.0	32%	4/38
	Klei	38	8.3	2.1	25%	6/38
	Zand	38	112.3	22.9	20%	4/38
<b>WEPAL 2010.4</b>	Pseudoklei	41	7.3	1.8	25%	8/41
	Klei	42	57.4	8.4	15%	3/42
	zand	41	140.1	28.6	20%	6/41
<b>WEPAL2011.3</b>	Klei	34	48.4	6.8	14%	4/34
	Pseudoklei	34	24.2	4.8	20%	8/34
	Rivierklei	33	204.1	31.7	16%	4/33
	Zandige klei	32	94.3	12.5	13%	5/32

<sup>a</sup> Berekend met NDA model; <sup>b</sup> aantal labo's op het totaal aantal labo's die een Z-score hoger dan 2 of lager dan -2 halen (= niet slagen voor de ringtest).

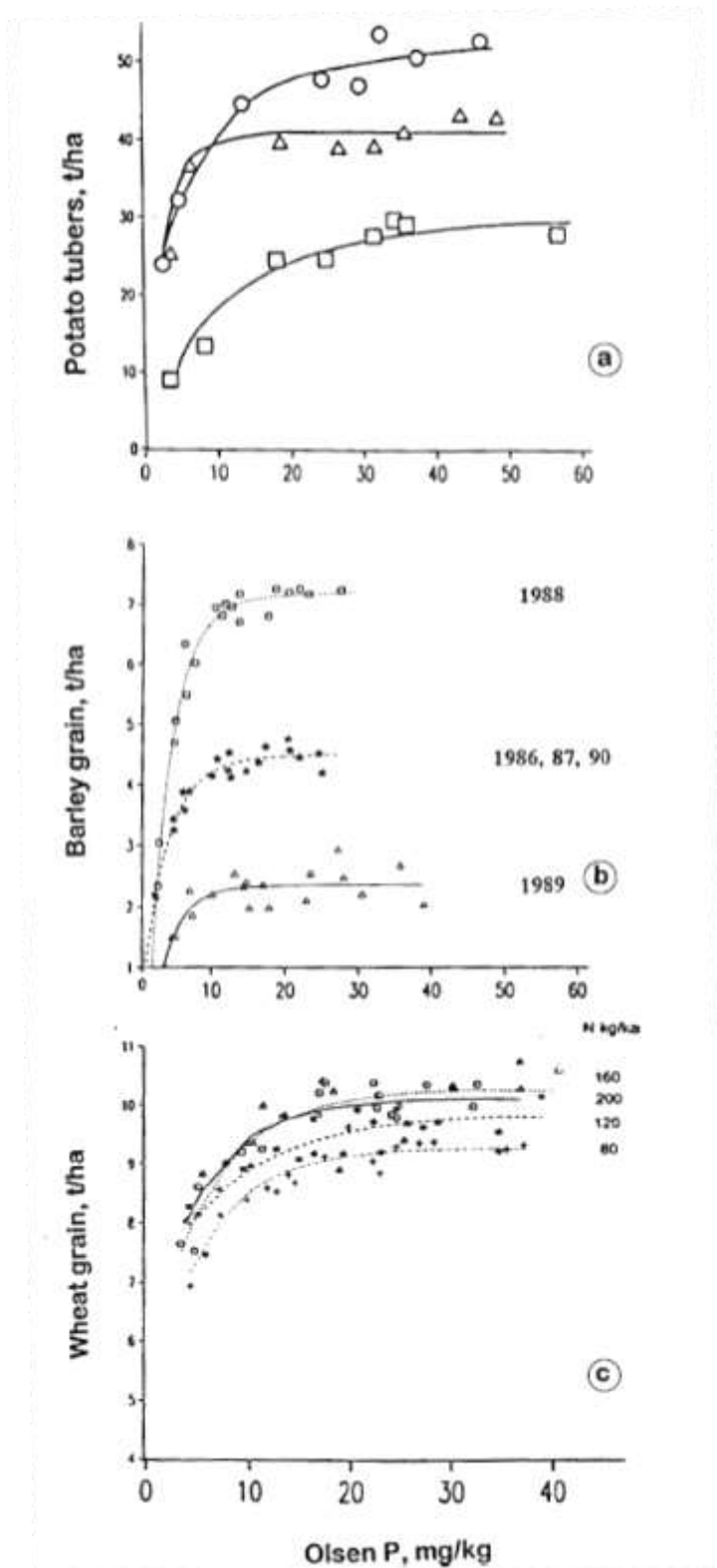
### 2.4.3.4 Praktische haalbaarheid

Deze bodemfosfortest wordt momenteel niet standaard in Vlaanderen gebruikt, maar wel in wetenschappelijke instellingen en voor bemestingsadviezen in verschillende andere landen. Deze test is bijgevolg haalbaar voor praktijktoepassing. De extractieduur is slechts 1 uur.

### 2.4.3.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

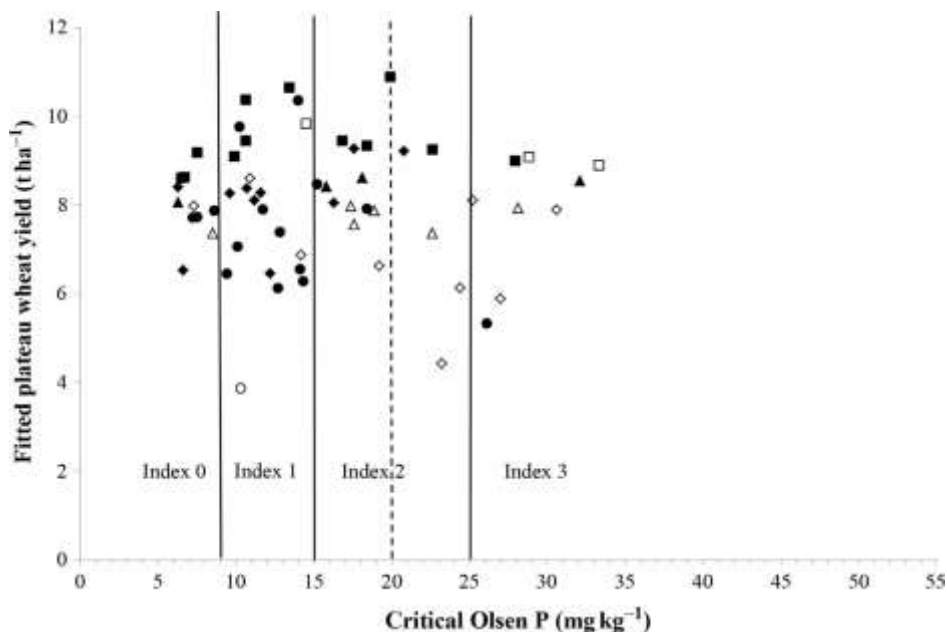
Veldexperimenten in **Engeland** toonden gelijkaardige (Figuur 3B en C) kritische Olsen-P-gehalten voor opbrengstdalingen ondanks variatie in absolute opbrengst tussen verschillende jaren voor gerst en wintertarwe (Johnston, 2000). Een groot deel van de variatie in relatieve opbrengst kan verklaard worden door Olsen-P (68-87% voor de voorbeelden in Figuur 3). Echter, soms zijn er wel variaties in

kritische Olsen-P tussen verschillende jaren (Figuur 3A). Voor een klei-leembodem varieerde de kritische Olsen-P voor wintertarwe en gerst tussen 7 en 18 mg P/kg, met één uitschieter van 26 mg P/kg (Poulton *et al.*, 2013). De kritische Olsen-P op een zandige kleileem varieerde sterk tussen 11 en 46 mg P/kg voor aardappelen en tussen 14 en 30 mg P/kg voor suikerbieten (Johnston *et al.*, 2013).

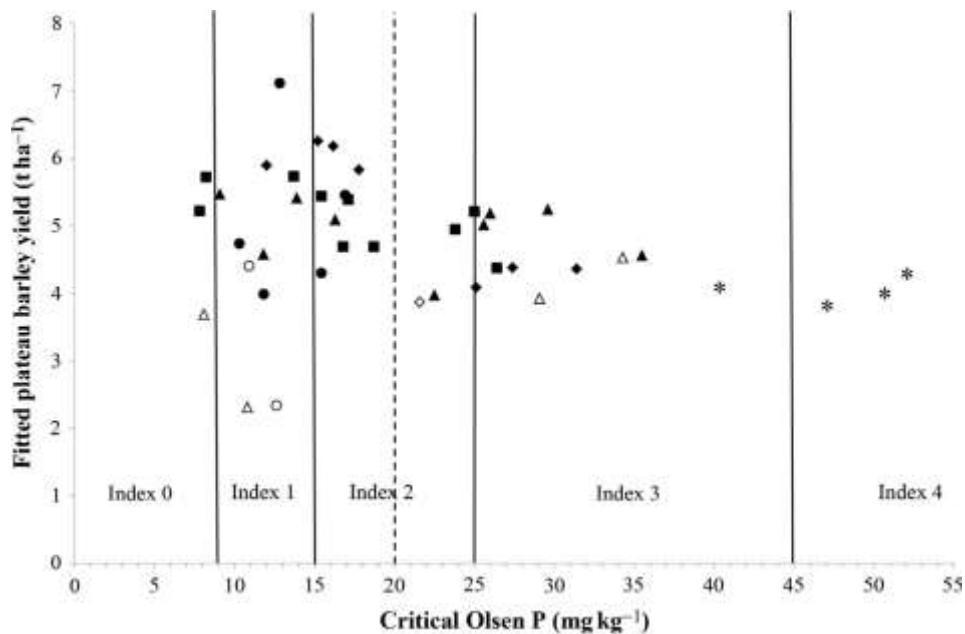


Figuur 3. Relatie tussen opbrengsten en Olsen-P voor verschillende jaren voor a) aardappelen op een zandige kleileembodem; b) Gerst op een klei-leembodem; en c) wintertarwe op een zandige kleileembodem (Johnston, 2000)

**Variaties in kritische Olsen-P zijn nog groter als er over verschillende bodems heen** gekeken wordt. Over twee of drie verschillende bodems verdubbelde de variatie in vergelijking met deze hierboven vermeld voor één bodem: 6-34 mg P/kg voor wintertarwe (Figuur 4) en 8-36 mg P/kg voor gerst (Figuur 5) (Johnston *et al.*, 2014). De grote variaties zouden te verklaren zijn door zaadbed- en bodemcondities en de manier waarop ze beïnvloed worden door de weersomstandigheden. Een andere zeer belangrijke factor is de bodemstructuur. Zo worden de laagste kritische Olsen-P gehalten waargenomen bij bodems met een goede bodemstructuur (Johnston *et al.*, 2014). Veldexperimenten in Rothamsted (Engeland) toonden aan dat de kritische Olsen-P significant verschilde bij verschillend organischestofgehalte (Johnston, 2000; Johnston *et al.*, 2014): 2-voudig voor suikerbiet (18-32 mg P/kg), 3-voudig voor gerst (16-45 mg P/kg) en 4-voudig voor aardappel (16-61 mg P/kg) voor 2,4 versus 1,5% organischestofgehalte (Figuur 5). Deze verschillen verdwenen indien de bodems na vermalen en zeven in een potproef gebruikt werden. Wellicht zijn de verschillen in bodemstructuur, veroorzaakt door verschillen in organischestofgehalte, oorzaak van de verschillen in kritische Olsen-P bij veldomstandigheden. Het effect van bodemstructuur kan door bijna geen enkele bodemfosfortest in rekening gebracht worden (uitzondering: P-resin in situ, zie 2.7.2).



Figuur 4. Gefitte maximale opbrengst van wintertarwe en de kritische Olsen P voor 98% van deze opbrengst. Saxmundham: eerste tarwe ( $\square$ ), tweede tarwe ( $\Delta$ ), derde/vierde tarwe ( $\diamond$ ). Exhaustion Land: continue tarwe ( $\circ$ ). Volle symbolen: voldoende N voor maximale opbrengst, open symbolen: onvoldoende N (Johnston *et al.*, 2014)



Figuur 5. Gefitte maximale opbrengst van gerst en de kritische Olsen P voor 98% van deze opbrengst. Saxmundham: eerste gerst ( $\square$ ), tweede/derde/continue tarwe ( $\Delta$ ). Agdell, eerste gerst: laag organisch stofgehalte (\*), hoog organisch stofgehalte ( $\diamond$ ). Exhaustion Land: continue gerst ( $\circ$ ). Volle symbolen en \*: voldoende N voor maximale opbrengst, open symbolen: onvoldoende N (Johnston *et al.*, 2014)

Boven een P-Olsen gehalte van 10 mg/kg werden in 9 lange termijn veldexperimenten in Hongarije (zure en kalkrijke bodems) geen opbrengststijgingen voor **maïs** waargenomen (Csathó *et al.*, 2002). Gegevens van 59 bodems uit de VS wezen op een kritische Olsen-P van 7 of 10 mg P/kg (naargelang het gebruikte model) voor maïs (Mallarino and Atia, 2005). Voor vier verschillende Chinese bodems varieerde de kritische Olsen-P voor opbrengstdaling sterk voor maïs (14,6-28,2 mg P/kg), terwijl voor tarwe de variatie veel beperkter was (11,1-16,1 mg P/kg) (Bai *et al.*, 2013). Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie tussen maïsoopbrengst en P-Olsen waargenomen (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote geografische spreiding van de percelen zijn wellicht andere factoren (weer, bodemtextuur, ziekten,...) bepalend voor de opbrengst.

Ook voor Nieuw-Zeelandse bodems varieerde de kritische P-Olsen voor opbrengstdaling bij **gras** sterk tussen bodemgroepen, namelijk tussen 10 en 45 mg P/kg (Edmeades *et al.*, 2006). Binnen een bodemgroep was de variatie beperkter. De kritische P-Olsen was gerelateerd aan de fosforbuffercapaciteit en in mindere mate ook aan de bulkdichtheid. Op verschillende Nieuw-Zeelandse bodems kon P-Olsen de variatie in opbrengststijging van gras bij bemesten voor 42% verklaren, minder goed dan P-resin (76%) maar beter dan P-Colwell (40%) (Saggar *et al.*, 1999). In 56 Ierse bodems was de grasopbrengst in een potexperiment gecorreleerd met P-Olsen ( $R^2 = 0,65$ ), beter dan met P- $\text{CaCl}_2$  ( $R^2 = 0,57$ ) maar minder goed dan met de Morgan's test ( $R^2 = 0,79$ ) (Humphreys *et al.*, 2001).

Van zes bodemfosfortesten was het betrouwbaarheidsinterval voor kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling van **tarwe** op 164 Australische bodems relatief het kleinst voor P-Olsen (Speirs *et al.*, 2013). Dit 95% betrouwbaarheidsinterval bij 90% relatieve opbrengst was 9,8-14 mg P/kg. Echter, de  $R^2$  van de relatie tussen de relatieve opbrengst en de bodemfosfortest was de op één na laagste van de zes testen (0,43). De relatieve tarweopbrengst op 13 Argentijnse bodems was gecorreleerd met P-Olsen ( $R^2 = 0,82$ ), de kritische P-Olsen was hoog in vergelijking met andere studies:  $31 \pm 6,7$  mg P/kg (kleinere variatie dan voor P-Bray) (Quintero *et al.*, 2003).

**De P-Olsen is kleiner dan de hoeveelheid P die gewassen op termijn uit een bodem kunnen onttrekken.** In 12 fosforrijke Europese bodems was de P-hoeveelheid onttrokken door gewassen in

een anderhalf jaar durende potproef 2 tot 6 keer groter dan de P-Olsen-hoeveelheid (Delgado and Torrent, 1997). Het Olsen-extract kan bijvoorbeeld moeilijk P uit rotsfosfaten vrijmaken, welke mogelijk wel beschikbaar kan worden voor het gewas (Saggar *et al.*, 1999).

## 2.4.4 Fosfor geëxtraheerd met behulp van ammoniumfluoride en HCl: P-Bray

### 2.4.4.1 Beschrijving

De Bray-methode extraheert P met behulp van ammoniumfluoride en HCl bij pH 2,6 (Bray and Kurtz, 1945). Voor zure bodems maakt de fluoride P vrij van aluminiumfosfaten door de aluminiumactiviteit te verlagen. Fluoride verhindert daarnaast ook sorptie van P. Door de zeer lage pH van het extract worden verschillende aluminium-, calcium- en ijzermineralen en –neerslagen opgelost waardoor de geassocieerde P vrijkomt (Pierzynski, 2000).

### 2.4.4.2 Toepassing

De Bray-test wordt vooral toegepast in de Verenigde Staten. De methode is niet geschikt voor kalkrijke bodems, en klei- en leembodems met een hoge baseverzadigingsgraad (Pierzynski, 2000).

### 2.4.4.3 Methode

Bodem wordt in een 1:10 verhouding met 0,025 M HCl en 0,03 M NH<sub>4</sub>F op pH 2,6 geschud gedurende 5 minuten.

In WEPAL-ringtesten werden grote variaties in gemeten Bray-gehalten tussen verschillende laboratoria vastgesteld (Tabel 4). De gemiddelde variabiliteit over 9 verschillende laboratoria van 24 sterk verschillende bodems uit de VS was het kleinst voor P-Mehlich (0,10), iets groter voor P<sub>FeO</sub> (0,12) en P-Bray (0,13) en beduidende groter voor P-Olsen (0,22) (Kleinman *et al.*, 2001).

Tabel 4. Ringtestresultaten voor P-Bray van WEPAL-ringtesten

Ringtest	Bodemstaal	Aantal labo's	Gemiddelde <sup>a</sup> (mg/kg)	Standaarddeviatie <sup>a</sup> (mg/kg)	Variatie (CV%)	N( Z >2) /N <sub>totaal</sub> <sup>b</sup>
<b>WEPAL 2010.1</b>	Klei	17	10.9	7.8	72%	3/17
	Zand	17	190.8	93.3	49%	0/17
	Klei	17	13.8	4.8	35%	1/17
	Zand	17	201.5	50.2	25%	1/17
<b>WEPAL 2010.4</b>	Pseudoklei	22	6.7	3.4	51%	3/22
	Klei	21	17.0	17.9	105%	4/21
	zand	22	553.0	263.3	48%	0/22
<b>WEPAL2011.3</b>	Klei	18	18.0	18,4	102%	2/18
	Pseudoklei	18	39,7	9,4	24%	2/18
	Rivierklei	18	89,4	36,7	41%	1/18
	Zandige klei	18	28,7	25,1	87%	5/18

<sup>a</sup> Berekend met NDA model; <sup>b</sup> aantal labo's op het totaal aantal labo's die een Z-score hoger dan 2 of lager dan -2 halen (= niet slagen voor de ringtest).

### 2.4.4.4 Praktische haalbaarheid

De methode lijkt praktisch haalbaar aangezien het een standaardmethode is in de VS. De methode wordt in Europa echter nauwelijks toegepast. De korte extractieduur (5 minuten) is aantrekkelijk.



#### 2.4.4.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie tussen maïsoopbrengst en P-Bray waargenomen, hoewel hier ook bodems met lage fosforbeschikbaarheid meegenomen werden (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote spreiding van de percelen zijn wellicht andere factoren (weer, bodemtextuur, ziekten,...) bepalend voor de opbrengst. Gegevens van 59 bodems uit de VS wezen op een kritische P-Bray van 13 of 20 mg P/kg (naargelang het gebruikte model) voor maïs (Mallarino and Atia, 2005). In 9 tropische bodems was de correlatie tussen Bray-P en de relatieve opbrengst van maïs minder ( $R^2=0,45$ ) dan voor veel andere bodemfosfortesten (Six *et al.*, 2013). De relatieve onzekerheid op de kritische Bray-P voor opbrengstdaling was 40%, groter dan voor DGT, P-CaCl<sub>2</sub> en P-Olsen, maar kleiner dan voor andere standaardtesten als P-Colwell, P-Mehlich en P-resin.

Bray-P vertoonde in tegenstelling tot resin-P en DGT-P geen correlatie met de relatieve opbrengst van tomaat op 24 Australische bodems (Menzies *et al.*, 2005).

De relatieve tarweopbrengst op 13 Argentijnse bodems was gecorreleerd met Olsen-P ( $R^2 = 0,79$ ). De variatie van de kritische Bray-P was  $43,7 \pm 12,8$  mg P/kg was groter dan voor Olsen-P (Quintero *et al.*, 2003).

### 2.4.5 Fosfor geëxtraheerd met behulp van NaHCO<sub>3</sub>: P-Colwell

#### 2.4.5.1 Beschrijving

De Colwell-extractie gebruikt net zoals de Olsen-extractie 0,5 M NaHCO<sub>3</sub> (Colwell, 1963), maar in een lagere bodem:extractant-verhouding en met een langere extractietijd. Vooral de lagere verhouding is oorzaak van een grotere geëxtraheerde fosforhoeveelheid door de Colwell- dan door de Olsen-extractie (Saggar *et al.*, 1999). Voor de werking van NaHCO<sub>3</sub> wordt naar P-Olsen (2.4.3) verwezen.

#### 2.4.5.2 Toepassing

De Colwell-extractie wordt standaard in Australië gebruikt.

#### 2.4.5.3 Methode

Bodem wordt in een 1:100 verhouding met 0,5 M NaHCO<sub>3</sub> gedurende 16 uur geschud.

Vertrouwelijke data van een labo-accreditatieprogramma toonden voor 5 verschillende bodems, gemeten door 5 verschillende laboratoria, een gemiddelde variatiecoëfficiënt van 20,4% (Sean Mason van CSIRO, persoonlijke communicatie).

#### 2.4.5.4 Praktische haalbaarheid

De methode lijkt praktisch haalbaar aangezien het een standaardmethode is in Australië. De methode wordt in Europa echter nauwelijks toegepast. De extractieduur (16 uur) is relatief lang ten opzichte van andere extractiemethodes.

#### 2.4.5.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

P-Colwell vertoonde geen correlatie met de relatieve opbrengst van tarwe op 35 Australische bodems en van tomaat op 24 Australische bodems, en slaagde er veel slechter in dan P-resin en vooral P-DGT om het al dan niet verhogen van de opbrengst na bemesten te verklaren (Menzies *et al.*, 2005; Mason *et al.*, 2010). Ook op 164 gearchiveerde bodemstalen van Australië was de relatieve tarweopbrengst minder goed gecorreleerd met P-Colwell ( $R^2=0,46$ ) dan met P-DGT ( $R^2=0,55$ , andere testen gelijkaardige  $R^2$  als P-Colwell) (Speirs *et al.*, 2013). Vooral voor calcarosols kon P-Colwell weinig variatie in relatieve opbrengst verklaren. Van de 6 bodemtesten had P-Colwell echter het kleinste (=beste) relatieve betrouwbaarheidsinterval voor de kritieke fosforbeschikbaarheid voor tarweopbrengstdaling.

Op verschillende Nieuw-Zeelandse bodems kon P-Colwell de variatie in grasopbrengststijging bij bemesten voor 40% verklaren, minder dan P-resin (76%) en P-Olsen (42%) (Saggar *et al.*, 1999). Voor negen verschillende tropische bodems was P-Colwell één van de slechter scorende van 8 bodemfosfortesten voor de verklaringen van relatieve maïsoopbrengsten (Six *et al.*, 2013).

De kritische P-Colwell voor opbrengstdaling, afgeleid uit verschillende Australische studies, varieerde sterk: tussen 16-43 mg P/kg voor grasland, 10-43 mg P/kg voor tarwe, 14-118 mg P/kg voor aardappel en 32-41 mg P/kg voor luzerne. De kritische P-Colwell was voor alle gewassen sterk bepaald door de fosforbuffercapaciteit van de bodem (Moody, 2007). De verklaring is dat P-Colwell een capaciteitsmeting is en dat gewasopbrengst vooral door de fosforintensiteit bepaald wordt.

Met behulp van <sup>32</sup>P-merkers werd aangetoond dat de specifieke activiteit gemeten in P-Colwell slechts voor 4 van de 14 geteste Australische bodems gelijk was aan deze gemeten in tarwe, terwijl dit voor 10 bodems gelijk was voor P-resin en voor 12 bodems voor P-DGT (Mason *et al.*, 2013). Gemiddeld was 25% van de P-Colwell niet beschikbaar voor tarwe.

## 2.4.6 Fosfor geëxtraheerd met behulp van het Mehlich 3-extract: P-Mehlich

### 2.4.6.1 Beschrijving

Met het Mehlich 3-extract, een oplossing van 0,2 M CH<sub>3</sub>COOH, 0,25 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 0,015 M NH<sub>4</sub>F, 0,013 M HNO<sub>3</sub> en 0,001 M EDTA, wordt fosfor op verschillende manieren uit een bodem vrijgemaakt (Mehlich, 1984). Voor zure bodems maakt de fluoride P vrij van aluminiumfosfaten door de aluminiumactiviteit te verlagen. Fluoride verhindert daarnaast ook sorptie van P. De verschillende zuren verlagen de pH waardoor verschillende aluminium-, calcium- en ijzermineralen en -neerslagen oplossen waardoor de geassocieerde P vrijkomt.

### 2.4.6.2 Toepassing

P-Mehlich wordt vooral in de VS als commerciële test gebruikt, maar wordt ook toegepast in wetenschappelijke studies.

### 2.4.6.3 Methode

Twee gram bodem wordt gedurende vijf minuten in een 1:10-verhouding geschud in een oplossing van 0,2 M CH<sub>3</sub>COOH, 0,25 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 0,015 M NH<sub>4</sub>F, 0,013 M HNO<sub>3</sub> en 0,001 M EDTA.

Uit ringtestresultaten van WEPAL blijkt dat er een redelijke variatie in meetresultaten van laboratoria kan voorkomen (Tabel 5), deze is beperkter dan voor P-Olsen (Tabel 3) en P-Bray (Tabel 4). De gemiddelde variabiliteit over 9 verschillende laboratoria van 24 sterk verschillende bodems uit de VS was het kleinst voor P-Mehlich (0,10), iets groter voor P<sub>FeO</sub> (0,12) en P-Bray (0,13) en beduidende groter voor P-Olsen (0,22) (Kleinman *et al.*, 2001).

### 2.4.6.4 Praktische haalbaarheid

De methode wordt commercieel toegepast in de VS waardoor de methode haalbaar wordt geacht. Ook andere elementen kunnen in het extract geanalyseerd en gebruikt worden voor bemestingsadviezen.

### 2.4.6.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie tussen maïsoopbrengst en P-Mehlich waargenomen, hoewel ook bodems met lage fosforbeschikbaarheid meegenomen werden (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote spreiding van de percelen zijn wellicht andere factoren (weer, textuur, ziekten,...) bepalend voor de opbrengst.

In 9 tropische bodems was de correlatie tussen P-Mehlich en de relatieve opbrengst van maïs (R<sup>2</sup>=0,50) de op 2 na minst goede van 8 bodemfosfortesten (Six *et al.*, 2013). De relatieve onzekerheid op de

kritische P-Mehlich voor opbrengstdaling was 45%, groter dan voor P-DGT, P-ox, P-Bray, P-CaCl<sub>2</sub> en P-Olsen, maar kleiner dan voor P-Colwell en P-resin.

Op vier veldproeven in Canada was de cumulatieve fosforopname door gras significant gecorreleerd met P-Mehlich ( $r=0,58$ ), beter dan met P-Olsen ( $r=0,54$ ), maar minder goed dan met P-resin ( $r=0,84$ ) en P<sub>w</sub> ( $r=0,60$ ) (Ziadi *et al.*, 2001).

Van zes bodemfosfortesten was P-Mehlich het minst goed gecorreleerd met relatieve tarweopbrengst op 164 Australische bodems ( $R=0,37$ , overige 0,43-0,55) (Speirs *et al.*, 2013).

Tabel 5. Ringtestresultaten voor P-Mehlich van WEPAL-ringtesten

Ringtest	Bodemstaal	Aantal labo's	Gemiddelde <sup>a</sup> (mg/kg)	Standaard-deviatie <sup>a</sup> (mg/kg)	Variatie (CV%)	N( Z >2) /N <sub>totaal</sub> <sup>b</sup>
<b>WEPAL 2010.1</b>	Klei	18	107.1	17.2	16.1%	0/18
	Zand	18	338.2	39.4	11.6%	2/18
	Klei	17	19.4	4.9	25.3%	0/17
	Zand	17	254.6	40.6	15.9%	1/17
<b>WEPAL 2010.4</b>	Pseudoklei	17	12.5	3.2	25.6%	2/17
	Klei	17	113.4	8.9	7.8%	4/17
	zand	17	760.8	98.3	12.9%	5/17
<b>WEPAL2011.3</b>	Klei	18	82.1	6.7	8.2%	3/18
	Pseudoklei	18	70.3	7.33	10.4%	2/18
	Rivierklei	18	222.6	20.0	9.0%	2/18
	Zandige klei	18	129.3	7.3	5.6%	3/18

<sup>a</sup> Berekend met NDA model; <sup>b</sup> aantal labo's op het totaal aantal labo's die een Z-score hoger dan 2 of lager dan -2 halen (= niet slagen voor de ringtest).

## 2.4.7 Fosfor geëxtraheerd met behulp van ammoniumacetaat en EDTA: P-AAEDTA

### 2.4.7.1 Beschrijving

Fosfor wordt deels uit een bodemstaal vrijgemaakt met behulp van een oplossing met 0,5 M ammoniumacetaat en 0,02 M EDTA op pH 4,65. Deze extractie zou ook traag of niet oplopende calciumfosfaten oplossen en de fosforbeschikbaarheid dus kunnen overschatten (Demaria *et al.*, 2005)

### 2.4.7.2 Toepassing

De methode wordt toegepast in Wallonië door de laboratoria van Requasud. In Zwitserland wordt ze in gewijzigde vorm toegepast.

### 2.4.7.3 Methode

In Wallonië wordt bodem in 0,5 M ammoniumacetaat en 0,02 M EDTA (pH 4,65) geschud in een 1:5 verhouding gedurende 30 minuten (Lakanen-Erviö methode) (Renneson *et al.*, 2013). In Zwitserland is de verhouding 1:10, wordt er gebruik gemaakt van 0,5 M ammoniumacetaat en 0,5 M azijnzuur (naast 0,02 M EDTA) en wordt 1 uur geschud (Demaria *et al.*, 2005).

#### 2.4.7.4 Praktische haalbaarheid

De methode wordt commercieel toegepast in Wallonië en Zwitserland waardoor de methode haalbaar wordt geacht. Ook andere elementen kunnen in het extract geanalyseerd en gebruikt worden voor bemestingsadviezen.

### 2.4.8 Fosfor geëxtraheerd met behulp van Ca-lactaat, Ca-acetaat en azijnzuur: P-CAL

#### 2.4.8.1 Beschrijving

Fosfor wordt uit bodem geëxtraheerd met behulp van een oplossing bestaande uit 0,05 M calciumlactaat, 0,05 M calciumacetaat en 0,3 M azijnzuur op pH 4,1 (Zorn and Krause, 1999).

#### 2.4.8.2 Toepassing

De methode wordt toegepast in Duitsland en Oostenrijk. Voor de invoering van de P-AL-methode in Vlaanderen (eind jaren '50, begin jaren '60), werd deze ook in Vlaanderen gebruikt (zie 2.4.1).

De extractie werkt minder goed voor kalkrijke bodems (Zorn and Krause, 1999).

#### 2.4.8.3 Methode

Bodem wordt in een 1:20-verhouding geëxtraheerd met een oplossing bestaande uit 0,05 M calciumlactaat, 0,05 M calciumacetaat en 0,3 M azijnzuur (pH 4,1) gedurende 2 uur (Zorn and Krause, 1999).

Er bestaat een norm voor deze methode, namelijk OENORM L 1087.

#### 2.4.8.4 Praktische haalbaarheid

De methode wordt commercieel toegepast in Duitsland en Oostenrijk waardoor de methode haalbaar wordt geacht. Ook andere elementen kunnen in het extract geanalyseerd worden en gebruikt worden voor bemestingsadviezen. Dit laatste is niet mogelijk voor calcium (reeds aanwezig in het extractiemiddel).

### 2.4.9 Andere

Er bestaan nog tal van andere fosforcapaciteitsmetingen met behulp van chemische extracties. Een niet-limitatief overzicht van enkele methodes die verder niet in detail besproken worden, is terug te vinden in Tabel 6.

Tabel 6. Niet-limitatief overzicht van overige fosforcapaciteitsmetingen met behulp van extractie

Naam	Methode	Gebruikt in	Norm
<b>Dyer</b>	1% citroenzuur; 1:10; 2 + 24 + 1 uur	Frankrijk	NF X31-160
<b>Joret/Hébert</b>	0,1 M ammoniumoxalaat; 1:25, 2 uur	Frankrijk	NF X31-161
<b>DL</b>	0,02 M calciumlactaat, 0,02 M HCl, pH 3,7; 1:50; 1 uur	Duitsland, Oostenrijk	
<b>Morgan</b>	Aangezuurd natriumacetaat, pH 4,8; 1:5; 30 min	Ierland	

## 2.5 VERSCHILLENDE CHEMISCHE EXTRACTIES: INTENSITEIT

Relatief zachte extracten maken maar een klein deel van fosfor op de vaste bodemfase, onmiddellijk beschikbaar voor het gewas, vrij en zijn dus een maat voor de fosforintensiteit. Hieronder worden verschillende intensiteitsmetingen besproken. Per extractie wordt niet alleen de methode en toepassing overlopen, maar worden ook voor- en nadelen aangehaald. Er zijn echter ook **algemene**

**voor- en nadelen** verbonden aan het gebruik van deze intensiteitsmetingen. Deze worden hier besproken en worden niet telkens herhaald bij de specifieke extracties.

#### *Voordelen*

- Chemische extracties kunnen relatief **snel** uitgevoerd worden, zijn praktisch haalbaar en relatief **goedkoop**
- Extracties die een maat zijn voor de fosforintensiteit zijn **relatief gevoelig aan veranderingen** doordat ze enkel de onmiddellijk beschikbare fosforhoeveelheid extraheren. Vrij snel na het instellen van een positieve of negatieve fosforbodembalans zullen veranderingen in de geëxtraheerde fosforhoeveelheid duidelijk worden, gelijklopend met wijzigingen in fosforbeschikbaarheid voor het gewas (Koopmans *et al.*, 2004b) en voor fosforuitloging (Vanden Nest, 2015).
- Aangezien het gewas fosfor opneemt uit de bodemoplossing, zal de fosforintensiteit dichter bij de onmiddellijke plantbeschikbare fosforhoeveelheid liggen dan de fosforcapaciteit.

#### *Nadelen*

- Extracties die een maat geven voor de fosforintensiteit zijn door hun gevoeligheid relatief afhankelijk van meet- en staalnameomstandigheden en kunnen **relatief sterk variëren door tijdelijke veranderingen** als kleine variaties in bodem-pH, weersomstandigheden,... (Koopmans *et al.*, 2003; Vanden Nest, 2015)
- Chemische extractiemiddelen werken helemaal anders dan plantenwortels. Ze kunnen bijvoorbeeld niet het proces van depletie van P in de bodemoplossing en heraanvulling vanuit de vaste fase in rekening brengen (Holford, 1997). Ze brengen het tijdsaspect niet in rekening en kunnen reacties induceren die zich niet afspelen in de bodem (bijvoorbeeld door overmatig calcium toedienen, zie verder).
- Fosforintensiteit geeft enkel een idee van de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid. De fosforbeschikbaarheid op langere termijn kan moeilijk ingeschat worden zonder extra informatie.

### **2.5.1 Fosfor geëxtraheerd met behulp van 0,01 M CaCl<sub>2</sub>: P-CaCl<sub>2</sub> op droge bodemstalen**

#### **2.5.1.1 Beschrijving**

Bodem wordt geëxtraheerd met 0,01 M CaCl<sub>2</sub> (Houba *et al.*, 2000). Met deze test wordt enkel de onmiddellijk beschikbare fosforfractie (intensiteit) vrijgemaakt. Ten opzichte van andere bodemfosfortesten betreft het een kleine fosforfractie (Csathó *et al.*, 2002; Neyroud and Lischer, 2003).

#### **2.5.1.2 Toepassing**

De CaCl<sub>2</sub>-methode wordt geregeld in wetenschappelijk onderzoek gebruikt voor de analyse van de fosforintensiteit. De methode wordt minder in commerciële bemestingsadviezen gebruikt. Een uitzondering is Nederland (van Erp *et al.*, 2001), waar P-CaCl<sub>2</sub> in combinatie met een capaciteitstest (P-AL) wordt gebruikt voor de bemestingsadviezen van gras en maïs. Mogelijk zullen ook de bemestingsadviezen voor andere gewassen aangepast worden waarbij P-CaCl<sub>2</sub> zal gebruikt worden (Debby van Rotterdam van NMI, persoonlijke communicatie).

#### **2.5.1.3 Methode**

Luchtdroge grond wordt met een 0.01 M CaCl<sub>2</sub> oplossing in een verhouding 1:10 geëxtraheerd gedurende 2 uur. De bovenstaande oplossing wordt gecentrifugeerd voor de bepaling van de fosforconcentratie.

In Nederland is er de NEN-norm 5704: 1996 'Monstervoorbehandeling van grond – extractie met een calciumchloride-oplossing (0,01 mol/l)'.

P-CaCl<sub>2</sub> wordt aangeboden in de WEPAL-ringtesten, maar wordt door onvoldoende laboratoria uitgevoerd om variaties te analyseren. Er wordt wel verwacht dat de variatie in meetresultaten tussen laboratoria relatief groot zal zijn gezien P-CaCl<sub>2</sub> een relatief kleine fractie is.

#### 2.5.1.4 Praktische haalbaarheid

De methode wordt in Vlaanderen niet standaard toegepast, meer in Nederland wel, waardoor de praktijk haalbaar geacht wordt. De extractietijd (2 uur) is relatief beperkt. Er kunnen ook andere elementen in het extract gemeten worden, en deze resultaten kunnen gebruikt worden voor analyses en bemestingsadviezen.

#### 2.5.1.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

Voor 164 gearcheveerde bodemstalen uit Australië was de relatieve tarweopbrengst van 6 bodemfosfortesten op P-DGT ( $R^2=0,55$ ) na het best gecorreleerd met P-CaCl<sub>2</sub> ( $R^2=0,49$ , andere testen 0,37-0,46) (Speirs *et al.*, 2013). Echter, P-CaCl<sub>2</sub> had uitgesproken de breedste betrouwbaarheidsintervallen voor kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling. Dit 95% betrouwbaarheidsinterval bij 90% relatieve opbrengst was 0,28-0,52 mg P/kg. De kritische P-CaCl<sub>2</sub> voor opbrengstdaling van tarwe op 13 Argentijnse bodems was sterk afhankelijk van de fosforsorptiecapaciteit van de bodem (Quintero *et al.*, 2003).

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie tussen maïsopbrengst en P-CaCl<sub>2</sub> waargenomen, hoewel ook bodems met lage fosforbeschikbaarheid meegenomen werden (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote spreiding van de percelen zijn wellicht andere factoren (weer, bodemtextuur, ziekten,...) bepalend voor de opbrengst. In negen tropische bodems was P-CaCl<sub>2</sub> op P-DGT na de beste bodemfosfortest uit 8 testen voor het verklaren van de relatieve maïsopbrengst ( $R^2=0,69$ ) en voor de variatie in kritische P-CaCl<sub>2</sub> voor opbrengstdaling (Six *et al.*, 2013).

In 56 Ierse bodems was de grasopbrengst in een potexperiment gecorreleerd met P-CaCl<sub>2</sub> ( $R^2 = 0,57$ ), maar beter met de Morgan's test ( $R^2 = 0,79$ ) en P-Olsen ( $R^2 = 0,65$ ) (Humphreys *et al.*, 2001). In een depletie-experiment met gras werd vastgesteld dat P-CaCl<sub>2</sub> sterk gecorreleerd was met de fosforopname door het gewas, wat veel minder duidelijk was voor capaciteitsmetingen die de daling in fosforbeschikbaarheid pas laat detecteerden (Koopmans *et al.*, 2004b).

Voor fosfaatgevoelige groenten werd vastgesteld dat P-CaCl<sub>2</sub> er in slaagt om Vlaamse bodems te onderscheiden waarop wel dan niet een gewasreactie op fosforbemesting kan verwacht worden, wat niet het geval was voor P-AL (Verhaeghe, 2014).

#### 2.5.1.6 Nadelen

- Er wordt soms verkeerdelijk verondersteld dat de fosforconcentratie in het 0,01 M CaCl<sub>2</sub> extract zeer gelijkaardig is aan de fosforconcentratie in het poriewater van de bodem. In meerdere studies is reeds vastgesteld dat de fosforconcentratie lager is in het CaCl<sub>2</sub>-extract dan in poriewater. Zo was er een factor 5 verschil in fosforconcentraties gemeten in 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-extracten en in bodemkolompercolaten van Vlaamse bodems (Vanden Nest, 2015), en een factor 2,8 tussen extracten van 70 Mediterrane bodems met 0,01 M CaCl<sub>2</sub> enerzijds en met oplossingen waarvan de samenstelling de bodemoplossing benadert anderzijds (Sánchez-Alcalá *et al.*, 2014). Het verschil wordt niet verklaard door verschillen in de verhouding bodem:extractiemiddel maar door de hogere calciumconcentratie en bijgevolg hogere ionische sterkte in het 0,01 M CaCl<sub>2</sub> extract dan in poriewater. Deze laatste heeft doorgaans een calciumconcentratie die eerder in de buurt van 0,001 M in plaats van 0,01 M

ligt. Om een meer werkelijkheidsgetrouwe fosforconcentratie te extraheren moet een extractiemiddel gebruikt worden waarvan de ionische sterkte deze van poriewater benadert. Daarom wordt onder 2.5.2 een alternatief voor de extractie met 0,01 M CaCl<sub>2</sub> geformuleerd.

- Door het drogen en daarna terug herbevochtigen van bodemstalen kan P vrijkomen die eigenlijk niet onmiddellijk beschikbaar is voor het gewas, maar wel meegemeten wordt (Soinne, 2009). Het is vooral organische fosfor die vrij kan komen, bijvoorbeeld door cellysis van bodemorganismen en opbreken van organisch materiaal en organo-minerale interacties. Dit proces komt ook voor bij andere extracties, maar aangezien P-CaCl<sub>2</sub> de kleinste fosforfractie betreft (Neyroud and Lischer, 2003), heeft drogen van bodemstalen op P-CaCl<sub>2</sub> een relatief groot effect in vergelijking met andere bodemfosfortesten. Om dit te illustreren, werden tien verschillende bodemstalen uit Vlaanderen met contrasterende fosforgehaltes zowel in vochtige toestand als na drogen geëxtraheerd met 0,01 M CaCl<sub>2</sub>. Door drogen nam P-CaCl<sub>2</sub> gemiddeld met 38% toe (Tabel 7), maar deze toename was zeer variabel (0-66%) waardoor de mate van toename moeilijk te voorspellen is. Voor drie Nederlandse bodems was er geen significante hogere P-CaCl<sub>2</sub> bij gedroogde versus vochtige bodemstalen, maar nam P-CaCl<sub>2</sub> wel toe bij hogere droogtemperatuur (van Erp *et al.*, 2001). Om de artificiële verhoging van P-CaCl<sub>2</sub> te voorkomen, kan de methode aangepast worden door de analyse op vochtige bodemstalen (zonder drogen) uit te voeren (alternatief onder 2.5.3 geformuleerd).

Tabel 7. P-CaCl<sub>2</sub> (0,01 M) van 10 verschillende Vlaamse bodems gemeten in vochtige toestand of na drogen

bodem	P-CaCl <sub>2</sub> droog (mg P/kg)		
	vochtig	droog	toename door drogen
1	1,6	2,5	62%
2	3,8	4,3	15%
3	2,0	3,0	46%
4	1,1	1,7	54%
5	3,7	3,7	0%
6	3,0	5,0	66%
7	10,9	12,0	10%
8	10,7	15,3	43%
9	14,2	18,7	31%
10	1,7	2,7	57%
Gemiddeld			<b>38%</b>

### 2.5.2 Alternatief voor 0,01 M P-CaCl<sub>2</sub>: 0,001 M P-CaCl<sub>2</sub>

Om lagere fosforconcentraties door hogere Ca-concentraties en ionische sterkte in het extractiemiddel te voorkomen (zie onder 2.5.1), kan de extractie uitgevoerd worden met 0,001 M CaCl<sub>2</sub> in plaats van met 0,01 M CaCl<sub>2</sub>. Ook in Nederland wordt geijverd om de overschakeling te maken van 0,01 M naar 0,001 M CaCl<sub>2</sub> (professor Rob Comans van WUR, persoonlijke communicatie). Een NEN-norm voor de nieuwe methode is in aanmaak, waarbij momenteel nagegaan wordt welke bodem:extractiemiddel-verhouding het voordeligst is. Er bestaat reeds een ISO-norm, waarbij 24 uur (0,01 M: 2 uur) wordt

geschud. Een nadeel van deze methode is dat ze vrij nieuw is, en er bijgevolg weinig wetenschappelijke data voorhanden zijn.

### 2.5.3 Alternatief voor 0,01 M P-CaCl<sub>2</sub>: analyse op vochtige bodemstalen

Om de artificiële fosforvrijgave door drogen te voorkomen (zie onder 2.5.1), kan de CaCl<sub>2</sub>-extractie uitgevoerd worden op vochtige bodemstalen. Dit werd zo uitgevoerd voor het doctoraat van Thijs Vanden Nest (2015). Indien echter standaard de fosforbepalingen voor bemestingsadviezen in Vlaanderen op vochtige bodemstalen moeten uitgevoerd worden, vergt dit logistiek meer voorbereiding en voorzieningen, wat de kosten opdrijft en de praktische haalbaarheid beperkt. Bovendien wordt op deze manier analyse op historische bodemstalen uitgesloten.

Metingen van P-CaCl<sub>2</sub> op vochtige bodemstalen afkomstig van eenzelfde Vlaamse zandleembodem varieerden doorheen het jaar met ongeveer een factor twee (Vanden Nest, 2015). Relatieve verschillen tussen behandelingen op dit proefveld bleven evenwel gelijk in de tijd. De variatie in de tijd was kleiner voor de intensiteitsparameter HWP.

### 2.5.4 Fosfor geëxtraheerd met behulp van water: P<sub>w</sub>

#### 2.5.4.1 Beschrijving

Bodem wordt geëxtraheerd met water. Doordat de ionische sterkte in het extract lager is dan in het poriewater en de vast/vloeibaar-verhouding verlaagt, komt fosfor vrij van de vaste bodemfractie. Deze fractie is groter dan de fosforhoeveelheid geëxtraheerd met behulp van 0,01 M CaCl<sub>2</sub> (Neyroud and Lischer, 2003; Sánchez-Alcalá *et al.*, 2014). Soms wordt ook gesteld dat P<sub>w</sub> tussen de intensiteit en de capaciteit ligt (Dekker and Postma, 2008).

#### 2.5.4.2 Toepassing

Waterextractie voor fosforbepalingen wordt in wetenschappelijke studies eerder voor milieukundige (risico op fosforverliezen) dan voor landbouwkundige toepassingen gebruikt. Enkel in Nederland wordt P<sub>w</sub> gebruikt als bodemfosfortest voor het bepalen van fosforbemestingsadviezen en fosforbemestingsnormen voor akkerbouwgewassen (Van der Pauw, 1971). Sommige Nederlandse laboratoria zoals BLGG meten P<sub>w</sub> niet meer maar schatten deze op basis van P-AL en P-CaCl<sub>2</sub>.

#### 2.5.4.3 Methode

Er bestaan verschillende methodes voor waterextracties. Voor de P<sub>w</sub>-methode in Nederland wordt 1 volumedeel luchtdroge grond na bevochtigen (22 uur) met 60 volumedelen water geëxtraheerd bij 20°C (1 uur schudden). Het resultaat wordt uitgedrukt in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter droge grond (Van der Pauw, 1971). In wetenschappelijke literatuur worden sterk verschillende extractie-verhoudingen (1:2 tot 1:200) en extractieduren (20 minuten tot 3 dagen) teruggevonden. Deze P<sub>w</sub> wordt vaak in mg P/kg uitgedrukt.

Resultaten van metingen van P<sub>w</sub> op verschillende bodemstalen door drie laboratoria in verschillende landen waren niet gelijkaardig, dit is wellicht gedeeltelijk te verklaren door verschillen in methode (Neyroud and Lischer, 2003). Ook in de WEPAL-ringtesten wordt P<sub>w</sub> bepaald, maar dit wordt door te weinig laboratoria uitgevoerd om zinvolle uitspraken over variabiliteit te kunnen doen. De reproduceerbaarheid is niet groot, wellicht door het voorkomen van colloïden in het extract (Russchen *et al.*, 2011). Om deze reden is BLGG (grootste laboratorium in Nederland voor fosforbeschikbaarheidsanalyses) overgeschakeld naar een berekende P<sub>w</sub> in plaats van een gemeten P<sub>w</sub>-waarde.



#### 2.5.4.4 Praktische haalbaarheid

De methode werd jarenlang in Nederland als standaardmethode voor akkerbouwgewassen toegepast, en wordt daarom praktisch haalbaar geacht. Door problemen met reproduceerbaarheid wordt echter door sommige laboratoria van deze methode afgestapt.

#### 2.5.4.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

Op vier veldproeven in Canada was de cumulatieve fosforopname door gras significant gecorreleerd met  $P_w$  ( $r=0,60$ ), beter dan met P-Mehlich ( $r=0,58$ ) en P-Olsen ( $r=0,54$ ), maar minder goed dan met P-resin ( $r=0,84$ ) (Ziadi *et al.*, 2001).

Potproeven uitgevoerd met 74 bodems afkomstig vanuit Europa, Amerika en Australië, toonden aan dat de tarweopbrengst goed gecorreleerd was met  $P_w$  (1-74 mg  $P_2O_5/l$ ), en niet met P-AL (2-41 mg P/100 g) (Van der Pauw, 1971). Voor  $P_w$  waren verschillen tussen bodemgroepen niet zichtbaar. Echter, de opbrengst van aardappel werd maar beperkt verklaard door  $P_w$ , wellicht door de grote invloed van bodem-pH op de aardappelopbrengst.

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd slechts een aanwijzing tot correlatie (niet significant) tussen maïsoopbrengst en  $P_w$  waargenomen (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote geografische spreiding van de percelen zijn wellicht andere factoren (weer, bodemtextuur, ziekten,...) bepalend voor de opbrengst. Op één proefbedrijf werd wel een samenhang (geen experimentele proefopzet) van maïsoopbrengst en  $P_w$  (23-105 mg  $P_2O_5/l$ ) gemeten bij hoog vochtgehalte, maar niet bij laag vochtgehalte (Corré *et al.*, 2004).

Er was geen verschil in opbrengst van voederbiet, maïs, triticale en gras/klaver op een Nederlandse zandbodem waar  $P_w$  varieerde tussen 70 en 78 mg  $P_2O_5/l$  (hoge waarden boven kritische  $P_w$ ) (Reijneveld *et al.*, 2003). De opbrengst op een ander Nederlands perceel (kalkrijke zavel) nam niet verder toe boven  $P_w$  20 mg  $P_2O_5/l$  voor stamslaboon, suikerbiet en droge erwt, boven  $P_w$  30-40 mg  $P_2O_5/l$  voor spruitkool en bloemkool en boven  $P_w$  50-55 mg  $P_2O_5/l$  voor zomergerst en peen (Alblas and van der Schoot, 2000).

### 2.5.5 Fosfor geëxtraheerd met behulp van heet water: HWP

#### 2.5.5.1 Beschrijving

Door een bodem met heet water te extraheren, komt zoals bij de gewone waterextractie door de lagere vast:vloeibaar-verhouding en de lagere ionische sterkte dan in de bodemoplossing, fosfor vrij van de vaste fase. Daarbij komt dat door de verhoogde temperatuur sommige organische componenten afbreken. Deze extractie is gebaseerd op de bepaling van de heet water extraheerbare koolstof (HWC) (Ghani *et al.*, 2003).

#### 2.5.5.2 Toepassing

In tegenstelling tot de bepaling van HWC is HWP nog nauwelijks gemeten. Uitzondering zijn enkele onderzoeken in Hongarije (HWP gemeten met behulp van percolatie) (Füleky and Czinkota, 1993; Berecz *et al.*, 2005) en het doctoraatsonderzoek van Thijs Vanden Nest (2015) in Vlaanderen.

#### 2.5.5.3 Methode

In Hongarije wordt gebruik gemaakt van een percolatie met heet water (Füleky and Czinkota, 1993; Berecz *et al.*, 2005), wat het resultaat afhankelijk maakt van de hydraulische conductiviteit van het bodemstaal. Dit wordt vermeden in de methode gebruikt in het doctoraat van Thijs Vanden Nest (2015), dat gebaseerd is op de methode voor de heet water extraheerbare koolstof (HWC) (Ghani *et al.*, 2003). Gedroogde en gemalen (< 250  $\mu m$ ) bodem wordt in een 1:5 verhouding geëxtraheerd met gedemineraliseerd water gedurende 16 uur in een heetwaterbad (70°C).

#### 2.5.5.4 Praktische haalbaarheid

De haalbaarheid om HWP op grote hoeveelheden bodemstalen te meten is beperkt doordat de bodemstalen gedurende 16 uur in een heetwaterbad moeten staan.

#### 2.5.5.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

In één veld in Hongarije met verschillende fosforbeschikbaarheid was tarweopbrengst gecorreleerd met HWP. Bij een HWP van ongeveer 2 mg P/kg werd geen opbrengsttoename meer waargenomen (Berecz *et al.*, 2005).

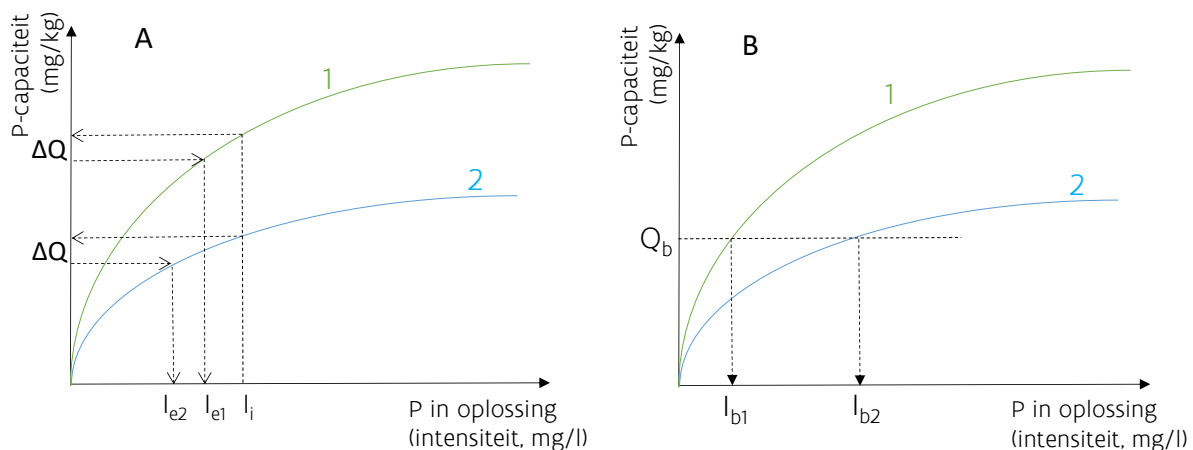
Metingen van HWP in eenzelfde Vlaamse zandleembodem varieerden beperkt doorheen het jaar, minder dan de factor twee variatie waargenomen voor P-CaCl<sub>2</sub> (Vanden Nest, 2015).

## 2.6 COMBINATIES VAN CHEMISCHE EXTRACTIES: INTENSITEIT EN CAPACITEIT

### 2.6.1 Fosforbuffercapaciteit

De fosforintensiteit ( $I$ ) en –capaciteit ( $Q$ ) geven in feite een momentopname van de fosforbeschikbaarheid in een bodem. Wanneer de fosforbeschikbaarheid gaat veranderen, bijvoorbeeld bij gewasonttrekking of bemesten van fosfor, bieden ze **elk apart te weinig informatie om het gedrag van fosfor te beschrijven en te voorspellen hoe de intensiteit of capaciteit zullen wijzigen**.

Veranderingen in fosforintensiteit en –capaciteit kunnen grafisch weergegeven worden in **sorptie-isothermen** (Figuur 6). De richtingscoëfficiënt van de sorptie-isotherm is de **fosforbuffercapaciteit**, dit is het vermogen van de bodem om veranderingen in intensiteit door onttrekking of bemesting te weerstaan (Holford, 1997).

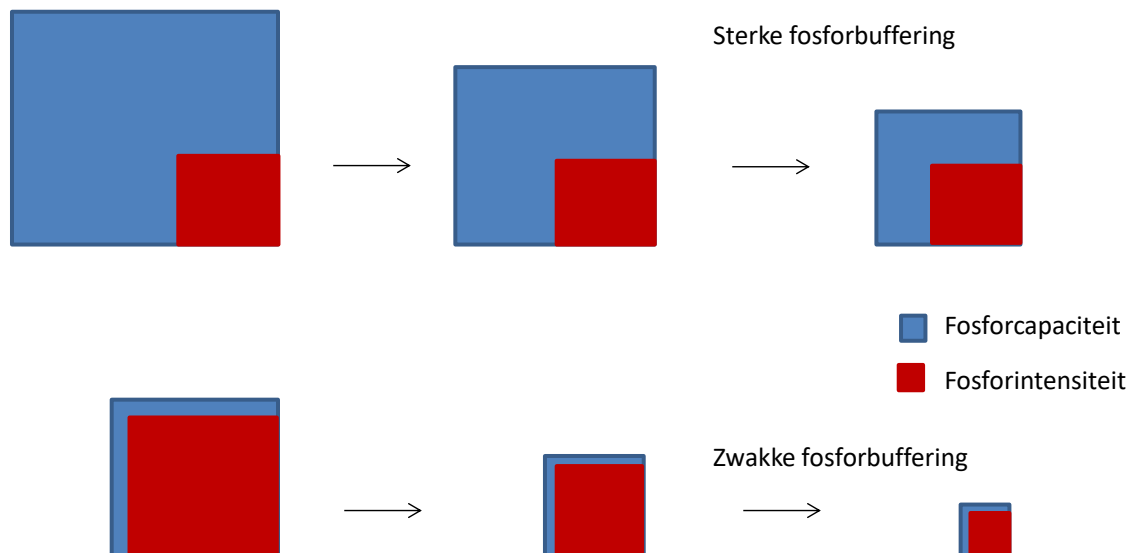


Figuur 6. Sorptie-isothermen voor een bodem met hoge buffercapaciteit (1, groen) en lage buffercapaciteit (2, blauw). A) Daling van de initiële intensiteit  $I_i$  naar een lagere  $I_e$  voor bodem 2 dan voor bodem 1 bij eenzelfde afname van de capaciteit ( $\Delta Q$ ) door gewasonttrekking; B) Lagere intensiteit van bodem 1 dan bodem 2 bij een gelijke capaciteit  $Q_b$ .

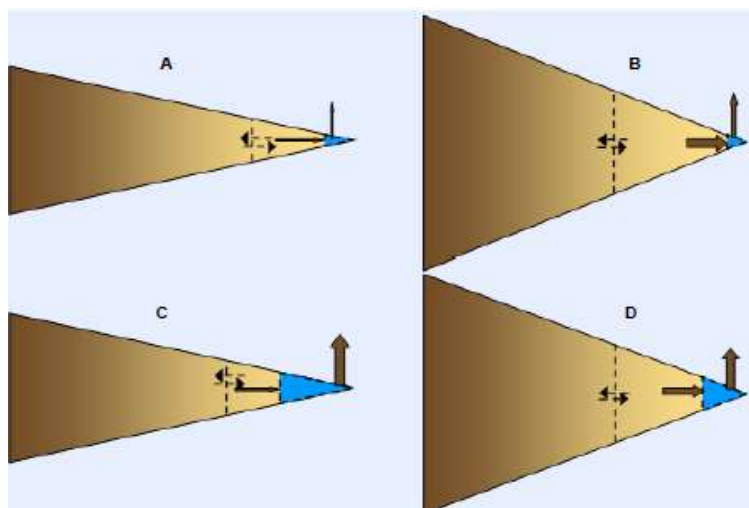
### 2.6.2 Evolutie van fosforbeschikbaarheid bij gewasonttrekking

Een plant neemt fosfor op uit de bodemoplossing. Indien de fosforconcentratie in de bodemoplossing te laag is, door onvoldoende of te trage aanvulling van de fosfor vanuit de vaste bodemfase, zal het fosforgehalte in de plant en de opbrengst suboptimaal zijn. Het lijkt dus logisch dat informatie over de fosforintensiteit bepalend is voor het correct inschatten van de fosforbeschikbaarheid voor het gewas. Dit is echter enkel het geval als de fosforconcentratie in de bodemoplossing weinig daalt tijdens de

gewasgroei, mogelijk door een goede buffering van de fosforconcentratie (Figuur 7 bovenaan en bodem 1 in Figuur 6A). Bij beperkte buffering zal de fosforintensiteit relatief snel dalen door gewasonttrekking, mogelijk tot onder de kritische fosforconcentratie voor optimale gewasgroei (Figuur 7 onderaan en bodem 2 in Figuur 6A). **Informatie over de fosforintensiteit alleen is bijgevolg onvoldoende om de evolutie in fosforbeschikbaarheid te kunnen voorspellen.** Om veranderingen te kunnen inschatten is informatie over de fosforbuffercapaciteit nodig. De fosforintensiteit alleen kan enkel bodems A en B onderscheiden van bodems C en D in Figuur 8.



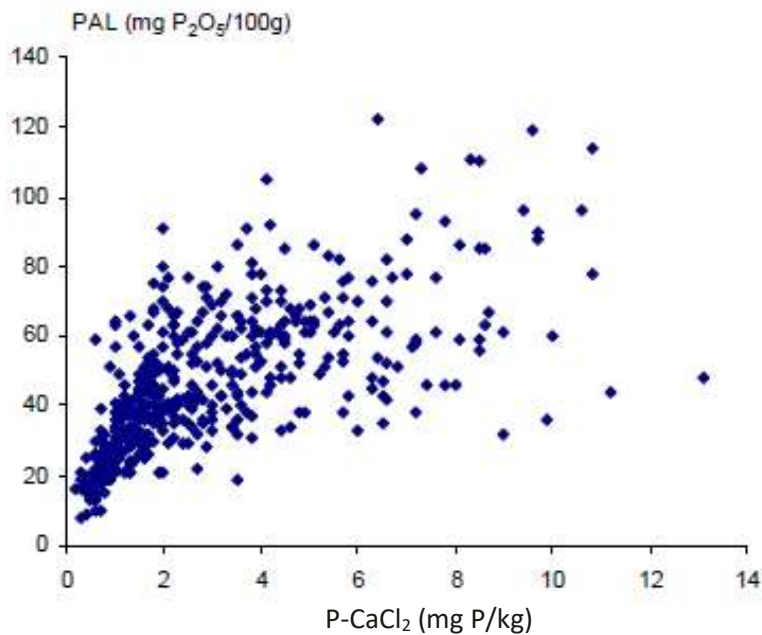
Figuur 7. Schematisch model voor veranderingen in fosforintensiteit (snel beschikbare fosfor, rood) en de fosforcapaciteit (voorraad, blauw) bij grotere fosforexport dan fosforinput in de bodem, voor een bodem met hoog (boven) of laag (onder) bufferend vermogen (naar Murphy et al. )



Figuur 8. Mogelijke situaties van fosforbeschikbaarheid in de bodem (Bussink *et al.*, 2011a): A) lage directe beschikbaarheid en lage nalevercapaciteit; B) Lage directe beschikbaarheid en hoge nalevercapaciteit; C) Hoge directe beschikbaarheid en lage nalevercapaciteit; D) Hoge directe beschikbaarheid en hoge nalevercapaciteit.

Anderzijds is **informatie over de fosforcapaciteit alleen ook vaak onvoldoende om de fosforbeschikbaarheid voor het gewas correct in te schatten.** Fosforcapaciteit alleen kan enkel bodems A en C onderscheiden van bodems B en D in Figuur 8. Het hangt van de fosforbuffercapaciteit af of de gemeten fosforcapaciteit gerelateerd is aan een voldoende hoge fosforintensiteit (Johnston *et al.*, 2014). Bodems met een relatief hoge buffercapaciteit (bodem 1 in Figuur 6B) hebben bij eenzelfde capaciteit een lagere intensiteit dan bodems met een relatief lage buffercapaciteit (bodem 2 in Figuur 6B). Zeker bij relatief harde extracten (P-AL, P-ox,...) is er een minder duidelijke link tussen de

geëxtraheerde fosforhoeveelheid en de fosforconcentratie in oplossing. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 9 waar de variatie aan gemeten P-CaCl<sub>2</sub> bij een gelijke P-AL groot is.



Figuur 9. P-AL (in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 g, delen door 2,29 voor Vlaamse eenheden mg P/100 g) en P-CaCl<sub>2</sub> (mg P/kg) van 461 Nederlandse bodemstalen (Bussink *et al.*, 2011a)

Eén meting kan de 4 bodems in Figuur 8 maar in 2 in plaats van in 4 groepen indelen. Samengevat kan je dus **met één chemische extractie niet tegelijk de onmiddellijke beschikbaarheid en de nalevering van P door de bodem inschatten** (van Rotterdam-Los, 2010). Daarvoor is additioneel informatie over de fosforbuffercapaciteit, de richtingscoëfficiënt van de sorptie-isotherm (Figuur 6), nodig. De **verhouding van de capaciteit over de intensiteit geeft een inschatting van deze buffercapaciteit**. Vooral bij hoge fosforbuffercapaciteit (lage fosforverzadigingsgraad) is deze verhouding een goede inschatting van de buffercapaciteit ( $\approx$  richtingscoëfficiënt) (bodem 1 in Figuur 6). Bij lage fosforbuffercapaciteit (hoge fosforverzadigingsgraad, bodem 2 in Figuur 6) is deze verhouding een minder goede inschatting van de buffercapaciteit en zijn bijkomende bodemeigenschappen als de fosforbindingscapaciteit nodig voor een betere inschatting (van Rotterdam-Los, 2010).

Onder een bepaalde Q/I-verhouding daalt de intensiteit sterk bij gewasonttrekking. Deze kritische Q/I-verhouding verschilt naar gelang de omstandigheden (temperatuur, vochtgehalte, worteldensiteit, gewas,...) (van Rotterdam-Los, 2010).

### 2.6.3 Verandering van fosforbeschikbaarheid bij bemesten

Informatie over de fosforbuffercapaciteit kan ook gebruikt worden om de verhoging van de fosforbeschikbaarheid bij bemesten in te schatten (Quintero *et al.*, 2003). Daardoor is de hoeveelheid bemesting of gewasonttrekking nodig voor het bereiken van de streefzone voor fosforbeschikbaarheid nauwkeuriger te berekenen dan indien enkel fosforintensiteits- of fosforcapaciteitsinformatie beschikbaar is. Dit zal in meer detail behandeld worden in de literatuurstudie van luik 3.

### 2.6.4 Conclusie

Samengevat kan gesteld worden dat informatie over zowel de fosforintensiteit als de capaciteit, welke inzicht geven in de fosforbuffercapaciteit, een genuanceerder en correcter beeld kan geven van de fosforbeschikbaarheid in vergelijking met een enkelvoudige analyse. Er zou bijgevolg een meer **mechanistische** benadering van het concept fosforbeschikbaarheid mogelijk zijn met twee chemische extracties, terwijl bij een enkelvoudige chemische extractie meer met empirische verbanden moet

gewerkt worden. Vooral in Nederland is men aan de slag gegaan met dit gegeven (van Rotterdam-Los *et al.*; van Rotterdam-Los, 2010; Bussink *et al.*, 2011a, b; Six *et al.*, 2012; van Rotterdam-Los and Bussink, 2012; Reijneveld, 2013; Ehlert *et al.*, 2014a; Ehlert *et al.*, 2014b). Een dubbele analyse biedt dus mogelijk duidelijke voordelen voor een meer correct inschatten van de fosforbeschikbaarheid (wat verder zal nagegaan worden in luik 1), maar heeft als duidelijk nadeel dat twee extracties duurder zijn dan één.

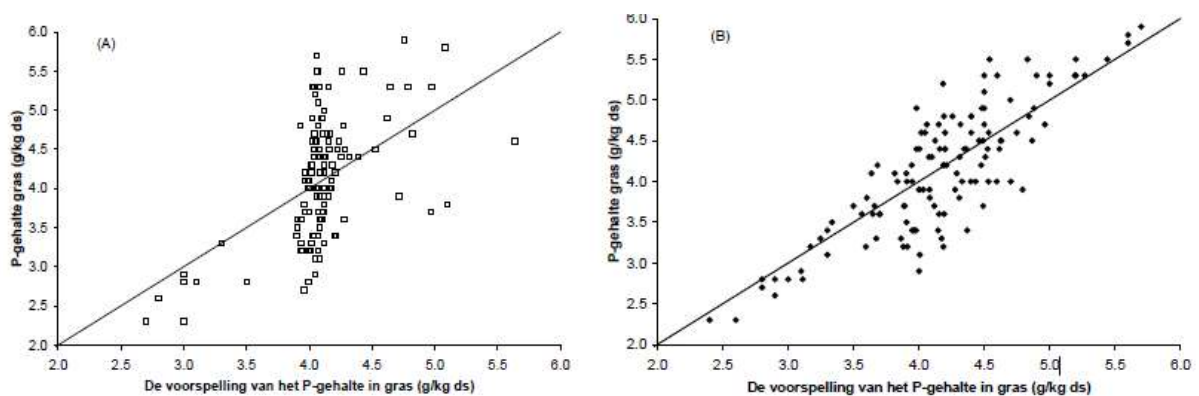
In principe zijn alle mogelijke combinaties van intensiteits- en capaciteitsmetingen mogelijk. Hieronder worden enkele reeds gebruikte combinaties besproken. Voor de details van de enkelvoudige extracties wordt naar de informatie hierboven verwezen.

### 2.6.5 0,01 M P-CaCl<sub>2</sub> + P-Olsen

Het is mogelijk om het gedrag van fosfor bij onttrekking uit de bodem door FeO-papier (gelijkaardig als gewasonttrekking) te beschrijven met behulp van de combinatie van P-CaCl<sub>2</sub> en P-Olsen (van Rotterdam-Los, 2010), maar er zijn nog geen bepalingen van relatieve gewasopbrengst in functie van de combinatie van P-CaCl<sub>2</sub> en P-Olsen gebeurd.

### 2.6.6 0,01 M P-CaCl<sub>2</sub> + P-AL

Nederlandse veldproeven onderzochten de invloed van P-CaCl<sub>2</sub>, P-AL en bemesting op maïs en gras op verschillende percelen verspreid over het land (Bussink *et al.*, 2011a, b). Er waren zeer grote verschillen in opbrengst van maïs, vooral door variaties in management en standplaats. Er werd een model opgesteld om opbrengstverhoging door bemesting te kunnen verklaren aan de hand van P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL, maar in latere soortgelijke veldproeven kon de opbrengstverhoging van maïs door bemesten niet door P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL verklaard worden (Ehlert *et al.*, 2014b). Een relatie tussen P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL met **relatieve** opbrengst van gras en maïs kon met deze experimenten niet worden onderzocht. Bemestingsadviezen voor maïs en gras die gebaseerd zijn op dit onderzoek zijn dus afgeleid uit mogelijke opbrengst- (maïs) of fosforgehalte-verhogingen (gras) door bemesten, en niet op basis van kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling. Wel is duidelijk dat het fosforgehalte in het gras beter te voorspellen is op basis van P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL samen dan op basis van P-AL alleen (Figuur 10) (Bussink *et al.*, 2011b).



Figuur 10. Vergelijking van het gemeten P-gehalte in meerjarig gras en het voorspelde P-gehalte gebaseerd op (A) P-AL en (B) een combinatie van P-AL en P-CaCl<sub>2</sub>, data afkomstig van monitoringsgegevens in Nederland (Bussink *et al.*, 2011b)

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie van maïsoopbrengst met P-AL of P-CaCl<sub>2</sub> waargenomen, maar wel met de verhouding P-AL/P-CaCl<sub>2</sub> (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote spreiding van de percelen kan niet met relatieve opbrengst gewerkt worden.

### 2.6.7 Andere combinaties

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie van maïsofbrengst met een enkelvoudige capaciteits- of intensiteitsparameter waargenomen, maar wel met verschillende capaciteits/intensiteits-verhoudingen als P-AL/P-CaCl<sub>2</sub>, P-AL/P<sub>w</sub>, P-ox/P-CaCl<sub>2</sub> en P-ox/P<sub>w</sub> (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote spreiding van de percelen kan niet met relatieve opbrengst gewerkt worden.

## 2.7 SINK-METHODES

Om het **depletie- en aanvullingsproces van bodemfosfor zoals geïnitieerd door plantenwortels in rekening te brengen**, kan gebruik gemaakt worden van een *sink*. Deze *sink* legt fosfor uit de bodemoplossing vast (bijvoorbeeld door sorptie) waardoor aanvulling vanuit de vaste bodemfase begint en in stand gehouden wordt door verdere vastlegging van fosfor door de *sink*, gelijkaardig aan de fosforopname door wortels. De hoeveelheid fosfor vastgelegd door de *sink* gedurende een bepaalde tijdspanne is dan een maat voor de fosforbeschikbaarheid.

Opdat het *sink*-materiaal zich als een *sink* zou blijven gedragen gedurende de volledige tijdsduur van de meting, moet de **capaciteit van de sink groot zijn ten opzichte van de beschikbare fosforhoeveelheid** (Skogley and Dobermann, 1996). Daarom moet er voor bodems met veel beschikbare fosfor, zoals in Vlaanderen, veel *sink*-materiaal of maar een kleine bodemhoeveelheid toegevoegd worden voor een accurate meting van de fosforbeschikbaarheid. Indien niet voldoende *sink*-materiaal voorzien wordt, wordt er een evenwicht ingesteld tussen de fosfor vastgelegd op de *sink* en de fosforconcentratie in oplossing, waardoor er geen verdere depletie- en aanvulling plaatsvindt. De fosforhoeveelheid op de *sink* zal dan vooral gerelateerd zijn aan de fosforconcentratie in oplossing en minder aan de capaciteit van de bodem om de fosforhoeveelheid in de bodemoplossing aan te vullen.

Hieronder worden verschillende gangbare *sink*-methodes besproken. Per techniek wordt niet alleen de methode en toepassing overlopen, maar worden ook voor- en nadelen aangehaald. Er zijn echter ook **algemene voor- en nadelen** verbonden aan het gebruik van *sinks*. Deze worden hier besproken en worden niet telkens herhaald bij de specifieke technieken.

#### Voordelen

- *Sinks* werken gelijkaardig als plantenwortels en hebben dus een **goede mechanistische basis** (Degryse *et al.*, 2009; van Rotterdam-Los, 2010). Isotopenstudies tonen aan dat de *pool* waar planten fosfor uit halen, zeer gelijkaardig is aan deze waar *sink*-methodes fosfor uit extraheren, en dit vooral voor de DGT-methode (Six *et al.*, 2012; Mason *et al.*, 2013)
- *Sink*-technieken **leggen geen pH-verandering** aan het bodemsysteem **op** (van Raij, 1998). Plantenwortels kunnen dit eventueel wel doen, maar dit is, afhankelijk van de situatie, een verzuring of alkalinisatie en bijgevolg moeilijk correct te simuleren. Bij *sink*-technieken worden ook geen bestanddelen gebruikt die bepaalde fracties kunnen vrijmaken die niet beschikbaar zijn voor het gewas.
- Ten gevolge van bovenstaande voordelen zullen de relaties van de plantbeschikbare P en gewasopbrengst met de fosforhoeveelheid gemeten met *sink*-technieken, in tegenstelling tot de chemische extracties, **niet of veel minder afhankelijk van de bodemeigenschappen** zijn (Sibbesen and Sharpley, 1997; van Raij, 1998).

#### Nadelen

- De fosforhoeveelheid vastgelegd door de *sinks* is **zeer sterk afhankelijk van het gebruikte materiaal (en de productiemethode), de hoeveelheid gebruikte sink en de extractietijd.**

Aangezien deze vaak verschillen tussen studies, zijn de gemeten fosforbeschikbaarheden soms moeilijk vergelijkbaar tussen verschillende studies.

- Een nadeel van de *sink*-methode is dat ze **omslachtiger** is dan een chemische extractie. Er zijn namelijk meerdere analysestappen nodig aangezien de fosforhoeveelheid vastgelegd door de *sink* nadien dient gedesorbeerd en gemeten te worden. Dit drijft uiteraard de kostprijs omhoog en reduceert de praktische haalbaarheid. Toch zijn er al commerciële toepassingen aan soms concurrentiële prijzen in aanbidding (zie verder).

Aangezien de *sink*-technieken meestal in een waterige bodemextractie worden uitgevoerd, houden ze net als de chemische extracties geen rekening met de bodemstructuur, de bewortelingsgraad en het vochtgehalte. Anionuitwisselaars kunnen echter ook rechtstreeks *in situ* in de bodem gebracht worden. Daardoor wordt het diffusieproces van fosfor in de bodem in rekening gebracht waardoor de relevantie voor wortelbeschikbaarheid nog groter wordt (Abrams and Jarrell, 1992). De zogenaamde *Plant Root Simulator Probes* maken gebruik van deze techniek en worden in Canada gebruikt om de beschikbaarheid van verschillende kationen en anionen (waaronder fosfor) meteen in het veld te meten.

## 2.7.1 Fosfor geëxtraheerd met ijzeroxide-geïmpregneerd papier: PFeO

### 2.7.1.1 Beschrijving

Filter papier, geïmpregneerd met ijzeroxide (FeO), wordt aan een bodemsuspensie toegevoegd. Het FeO-papier sorbeert fosfor waardoor de fosforconcentratie in de bodemsuspensie daalt en heraanvulling vanuit de vaste bodemfractie optreedt. De hoeveelheid fosfor gesorbeerd op het FeO-papier is een maat voor de fosforbeschikbaarheid in het bodemstaal, en kan gemeten worden na extractie van het FeO-papier in een zuur.

### 2.7.1.2 Toepassing

De fosforbeschikbare fractie wordt regelmatig in wetenschappelijke studies met FeO-papier gemeten, maar deze methode kent geen commerciële toepassing omwille van de complexiteit en omslachtigheid.

### 2.7.1.3 Methode

Filterpapier wordt geïmpregneerd met FeO door behandeling in een ijzeroplossing, waarna het papier gewassen en gedroogd wordt. Een FeO-papier van 10 op 2 cm wordt toegevoegd aan 1 gram bodem en 40 ml 0,01 M CaCl<sub>2</sub> en geschud gedurende 16 uur. De FeO-strip wordt daarna verwijderd, gespoeld en gedurende 1 uur geschud in 40 ml 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

De hoeveelheid geëxtraheerde P hangt sterk af van het aantal gebruikte FeO-papiertjes en de vast:vloeibaar-verhouding (van Rotterdam *et al.*, 2009). Maar ook het type filterpapier, de manier van impregneren van het filterpapier met FeO, wassen en drogen van het papier hebben een significant effect op de hoeveelheid geëxtraheerde P (Chardon *et al.*, 1996). Het vergelijken van resultaten tussen verschillende studies zijn door de verschillen in productie en gebruik van het FeO-papier bijgevolg moeilijk.

De gemiddelde variabiliteit over 9 verschillende laboratoria van 24 sterk verschillende bodems uit de VS was het kleinst voor P-Mehlich (0,10), iets groter voor P<sub>FeO</sub> (0,12) en P-Bray (0,13) en beduidend groter voor P-Olsen (0,22) (Kleinman *et al.*, 2001).

Het FeO-papier zou voor fosfor een betere en selectievere *sink* dan resin (zie 2.7.2) zijn, maar is mechanisch minder stabiel (Frossard *et al.*, 2000; Koopmans *et al.*, 2001). Een ander nadeel is dat bodempartikels kunnen vastkleven aan het FeO-papier waardoor overschatting van de fosforbeschikbare fractie mogelijk is (Uusitalo and Yli-Halla, 1999).

#### 2.7.1.4 Praktische haalbaarheid

De praktische haalbaarheid voor toepassing in commerciële testen is laag gezien de variabiliteit gecreëerd bij de productie van het FeO-papier en de omslactigheid van de procedure (FeO-papier maken, schudden met bodemsuspensie en extractie van het FeO-papier).

#### 2.7.1.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

Potexperimenteren met 10 Nederlandse bodems toonden aan dat de relatieve fosforopname door gras sterk gecorreleerd was met de fosforvastlegging door FeO-papier (van Rotterdam-Los, 2010). Desorptie-isothermen bekomen op basis van FeO-papertjes of op basis van grasonttrekking toonden grote gelijkenissen, wat wijst op het mechanistisch verband tussen de  $P_{FeO}$ -methode en fosforbeschikbaarheid (Bussink *et al.*, 2011a).

Op verschillende Nederlandse locaties met uiteenlopende fosforbeschikbaarheden werd geen correlatie tussen maïsopbrengst en  $P_{FeO}$  waargenomen, hoewel ook bodems met lage fosforbeschikbaarheid meegenomen werden (Ehlert *et al.*, 2014b). Gezien de grote spreiding van de percelen zijn wellicht andere factoren (weer, bodemtextuur, ziekten,...) bepalend voor de opbrengst.

Opbrengst van maïs, nierbonen en rijst in zure bodems is goed gecorreleerd met  $P_{FeO}$ , in kalkrijke bodems was  $P_{FeO}$  een even goed voorspeller van opbrengst als P-Olsen (Menon *et al.*, 1997).

### 2.7.2 Fosfor geëxtraheerd met anionuitwisselaar: P-resin

#### 2.7.2.1 Beschrijving

Bodem wordt in suspensie geschud met een anionuitwisselaar (resin) die door fosforvastlegging de fosforconcentratie in de suspensie verlaagt. Hierdoor treedt fosfoaanvulling vanuit de labiele fosforfractie op. De hoeveelheid fosfor vastgelegd door de anionuitwisselaar is een maat voor de fosforbeschikbaarheid en kan gemeten worden na extractie van de anionuitwisselaar in een zure oplossing.

#### 2.7.2.2 Toepassing

De fosforbeschikbare fractie wordt regelmatig in wetenschappelijke studies met anionuitwisselaars gemeten. Hoewel de methode omslachtiger is dan een chemische extractie (aangezien er twee stappen nodig zijn), zijn er commerciële toepassingen in Brazilië en Canada. In Canada wordt zelfs de fosforbeschikbaarheid *in situ* gemeten door de resins op het veld in de bodem aan te brengen en na een bepaalde extractietijd terug uit te halen (*Plant Root Simulator probes*).

#### 2.7.2.3 Methode

Methodes verschillen tussen studies. Algemeen wordt bodem in een suspensie (1:10 tot 1:30 verhouding) geschud met een anionuitwisselaar (verschillende oppervlaktes en aantallen mogelijk) die ofwel in  $Cl^-$  of  $HCO_3^-$  vorm gebracht is. Na 16-17 uur schudden wordt de anionuitwisselaar gespoeld met gedestilleerd water en wordt de vastgelegde fosfor geëxtraheerd met een oplossing van 0,1-0,5 M HCl, eventueel gecombineerd met NaCl.

Verschillen in methodes veroorzaken verschillen in resultaten, waardoor enkel resultaten van studies met exact dezelfde methode vergeleken kunnen worden (Mason *et al.*, 2008). De herhaalbaarheid van de resinmeting werd in een labo op 150 verschillende bodems nagegaan (Sousa and Coutinho, 2009). De variatiecoëfficiënt voor een extractieduur van 16 uur was gemiddeld 4,9%, en deze nam toe bij kortere extractieduren (13,9% bij 15 minuten).

In tegenstelling tot het FeO-papier zijn resins niet selectief voor fosfor. Dit resulteert in verminderde vastlegging van P door de resins bij gelijke fosforconcentratie maar toenemende anionconcentratie (bijvoorbeeld  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$  en  $SO_4^{2-}$ ) (Mason *et al.*, 2008). Boven pH 4 wordt resin-P niet beïnvloed door de bodem-pH.



#### 2.7.2.4 Praktische haalbaarheid

De praktische haalbaarheid is kleiner dan voor chemische extracties omdat er meerdere stappen nodig zijn en de extractieduur vrij lang is. Deze laatste kan eventueel ingekort worden (Sousa and Coutinho, 2009). Commerciële toepassing is mogelijk (zie Canada en Brazilië).

De resins kunnen hergebruikt worden. Anionuitwisselaars zijn niet selectief voor fosfor waardoor ze ook andere anionen kunnen vastleggen. Dit heeft als voordeel dat de plantbeschikbare fractie van andere anionen kunnen gemeten worden in hetzelfde extract.

#### 2.7.2.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

De relatieve opbrengst van **gras** in een potexperiment met 150 verschillende Portugese bodems, wel en niet bemest, was sterk gecorreleerd met P-resin ( $r=0,82-0,85$  afhankelijk van de extractieduur) (Sousa and Coutinho, 2009). Op verschillende Nieuw-Zeelandse bodems kon P-resin de variatie in opbrengststijging van gras bij bemesten voor 76% verklaren, meer dan P-Colwell (40%) en P-Olsen (42%) (Saggar *et al.*, 1999). Op vier veldproeven in Canada was de cumulatieve fosforopname door gras significant gecorreleerd met P-resin ( $r=0,84$ ), beter dan met P-Mehlich ( $r=0,58$ ),  $P_w$  ( $r=0,60$ ) en P-Olsen ( $r=0,54$ ) (Ziadi *et al.*, 2001). In veldexperimenten op 3 locaties in Zwitserland werd de variatie in relatieve opbrengst van gras voor 28% verklaard door P-ox, veel minder dan voor P-resin (69%) (Liebisch, 2011). De relatieve breedte van het 95% betrouwbaarheidsinterval van kritische P-ox (95% relatieve opbrengst) was wel smaller voor P-ox (54%) dan voor P-resin (88%), wellicht door de lage waarde van P-resin (4 mg P/kg).

In een potexperiment met 13 Argentijnse bodems was de relatieve **tarwe**opbrengst ook sterk gecorreleerd met P-resin ( $R^2 = 0,76$ ) (Quintero *et al.*, 2003). De correlatie tussen bodemfosfortest en relatieve opbrengst van tarwe, en het vermogen om het al dan niet verhogen van de opbrengst na bemesten te verklaren voor 35 Australische bodems was het hoogst voor P-DGT en veel minder goed voor P-resin en P-Colwell (Mason *et al.*, 2010).

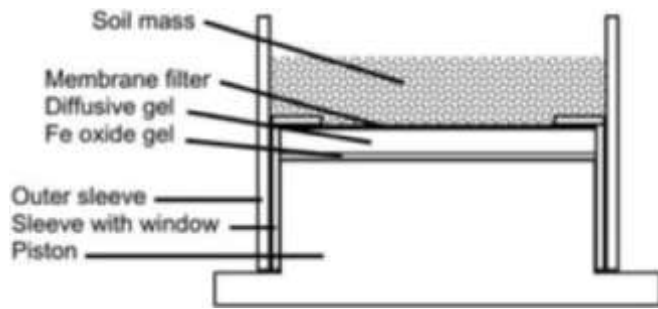
In tegenstelling tot P-Colwell en P-Bray was P-resin wel goed gecorreleerd met de relatieve opbrengst van tomaat in 24 Australische bodems ( $r^2=0,83$ ). Voor P-DGT was de correlatie nog beter ( $r^2=0,93$ ) (Menzies *et al.*, 2005). Voor negen verschillende tropische bodems scoorde P-resin ten opzichte van 7 andere bodemtesten eerder gemiddeld voor de verklaring van relatieve maïsopbrengsten ( $R^2=0,51$ , rest: 0,39-0,69) (Six *et al.*, 2013).

Een review van verschillende studies die bodemfosfortesten aan plantbeschikbaarheid relateerden, toonde dat resin-P over het algemeen hogere  $R^2$ -waarden vertoonde dan conventionele bodemtesten als P-AL, P-Mehlich, P- $CaCl_2$ , P-Olsen, P-Bray,... (van Raij, 1998).

### 2.7.3 Fosfor via diffusie aangevoerd naar ijzeroxidegel: P-DGT

#### 2.7.3.1 Beschrijving

Een andere, recente techniek die gebruik maakt van een *sink* is de *Diffusive Gradients in thin films Technique* (DGT). De DGT-methode meet de diffuse aanvoer van P onder oneindige *sink*-omstandigheden. Er zijn duidelijke gelijkenissen tussen de P-fluxen vanuit de bodem naar wortels en naar de DGT-eenheden (Degryse *et al.*, 2009). In deze DGT-eenheid staat de *sink*, ijzeroxide, via een diffuse gel en een membraanfilter in contact met de bodem (Figuur 11). Na een bepaalde contacttijd wordt fosfor, vastgelegd op de ijzeroxidegel, geëxtraheerd en gemeten.



Figuur 11. Schematische weergave van een doorsnede van een DGT-eenheid voor bodemmetingen (Menziez *et al.*, 2005)

### 2.7.3.2 Toepassing

De DGT-methode is een vrij recente techniek die snel opgang maakt in wetenschappelijke studies. De test wordt nu ook commercieel aangeboden, in Australië worden nu reeds jaarlijks meer dan 10000 bodemstalen geanalyseerd met deze techniek (professor Mike McLaughlin van CSIRO, persoonlijke communicatie).

### 2.7.3.3 Methode

Bodemstalen worden op 100% waterbergingsvermogen gebracht met behulp van ultrapuur water. De volgende dag wordt de bodem gedurende een bepaalde tijd (4-48 uur) op de DGT-eenheid aangebracht (Figuur 11). Na deze contacttijd wordt de DGT-eenheid gespoeld en wordt de vastgelegde fosforhoeveelheid geëxtraheerd uit de ijzeroxide-gel en gemeten.

Vertrouwelijke data van een accreditatieprogramma toonden voor 5 verschillende bodems, gemeten door 5 verschillende laboratoria, een gemiddelde variatiecoëfficiënt van 19,6%, zeer gelijkaardig aan deze voor de standaardextractietest P-Colwell (20,4%) (Sean Mason van CSIRO, persoonlijke communicatie).

In tegenstelling tot voor P-resin wordt P-DGT niet of nauwelijks beïnvloed door variërende concentraties van andere anionen (Mason *et al.*, 2008). Tussen pH 3 en 9 wordt P-DGT niet beïnvloed door bodem-pH.

Het is van belang dat er geen saturatie van de ijzeroxide-gel optreedt. Dit kan waargenomen worden bij hoge bodemfosforgehaltes, zoals het geval is in veel Vlaamse bodems. Testen uitgevoerd door Thijs Vanden Nest bij ILVO wezen op saturatieproblemen bij een contacttijd van 16,7 uur. De standaardmethode van 24 uur zal daarom aangepast moeten worden voor Vlaamse toepassing, bijvoorbeeld naar 4 uur contacttijd.

### 2.7.3.4 Praktische haalbaarheid

De kostprijs van de test (commercieel) in Australië ligt rond €15-20 (Sean Mason van CSIRO, persoonlijk communicatie). Er is een relatief lange meettijd en er zijn meerdere stappen voor de analyse nodig, waardoor de praktische haalbaarheid relatief beperkt is. Positief is dat ook metalen en K met hetzelfde principe gemeten kunnen worden, maar een gelijktijdige, gezamenlijke meting moet nog op punt gesteld worden.

### 2.7.3.5 Studies over relaties met gewasopbrengst

De opname van P door de DGT-eenheid en door planten zijn doorgaans sterk gecorreleerd, waardoor het mogelijk is om bodems waar extra fosforbemesting al dan niet een toename in gewasopbrengst teweeg brengt, van elkaar te onderscheiden (Degryse *et al.*, 2009). In tegenstelling tot P-Colwell en P-Bray was P-DGT wel goed gecorreleerd met de relatieve opbrengst van tomaat in 24 Australische bodems ( $r^2=0,93$ ). Voor P-resin was de correlatie iets minder goed ( $r^2=0,83$ ) (Menziez *et al.*, 2005). De correlatie tussen bodemfosfortest en relatieve opbrengst van tarwe, en het vermogen om het al dan niet verhogen van de opbrengst na bemesten te verklaren voor was 35 Australische bodems het hoogst

voor P-DGT en veel minder goed voor P-resin en P-Colwell (Mason *et al.*, 2010). Voor 164 gearhiveerde bodemstalen van Australië was de relatieve tarweopbrengst van 6 bodemfosfortesten het best gecorreleerd met P-DGT ( $R^2=0,55$ , andere testen 0,37-0,49) (Speirs *et al.*, 2013). Echter, P-DGT had de op één na breedste betrouwbaarheidsintervallen voor kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling. Dit 95% betrouwbaarheidsinterval bij 90% relatieve opbrengst was 30-49  $\mu\text{g/l}$ . In negen tropische bodems was P-DGT de beste bodemfosfortest uit 8 testen voor het verklaren van de relatieve maisopbrengst ( $R^2=0,84$ , rest 39-69%) en voor de variatie in kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling (30%) (Six *et al.*, 2013).

Met behulp van  $^{32}\text{P}$ -merkers werd aangetoond dat de specifieke activiteit gemeten in P-DGT voor 12 van de 14 geteste Australische bodems gelijk was aan deze gemeten in tarwe, terwijl dit voor 10 bodems gelijk was voor P-resin en slechts voor 4 bodems voor P-Colwell (Mason *et al.*, 2013). Gemiddeld was slechts 2% van de P-DGT niet beschikbaar voor tarwe.

## 2.8 ONDERLINGE CORRELATIES EN CONVERSIEFACTOREN

Indien het totale fosforgehalte in de bodem toeneemt, stijgt algemeen de fosforfractie gemeten met de verschillende bodemfosfortesten waardoor correlaties tussen verschillende bodemfosfortesten gemeten worden (Berez *et al.*, 2005; Mallarino and Atia, 2005; Herlihy *et al.*, 2006). Echter, omdat de relaties tussen de plantbeschikbare P gemeten met chemische extracties en de gewasrespons gebaseerd zijn op empirische gronden en de mechanismen achter de extracties variëren voor de verschillende methodes, is het niet evident om P-beschikbaarheidswaarden gemeten met verschillende methodes naar elkaar om te zetten. Wanneer twee methodes vergeleken worden waarvan de extractiemiddelen een gelijkaardige werking hebben en wanneer bodems met grote variatie aan fosfortoestanden beschouwd worden, kunnen wel goede correlaties tussen beide beschikbaarheidswaarden bekomen worden. Aan de andere kant worden er bij lage fosforbeschikbaarheid vaak geen correlaties gevonden tussen de verschillende metingen, zoals bijvoorbeeld tussen  $P_w$  en P-CaCl<sub>2</sub> (Ehlert *et al.*, 2007).

Fosforbeschikbaarheid gemeten met verschillende methodes in Nederlandse bodems met sterk uiteenlopende fosforgehaltes toonden een redelijke tot goede correlatie tussen intensiteits- of capaciteitsmethodes onderling, maar een beperkte of geen correlatie tussen een intensiteits- en capaciteitsparameter (Ehlert *et al.*, 2014b).

Conversieformules tussen de verschillende methodes hangen vaak af van andere bodemeigenschappen, bijvoorbeeld textuur, pH,... (Otabbong *et al.*, 2009). Zo zijn er verschillende conversiefactoren tussen P-AL en P-Olsen, en P-Al en P-CaCl<sub>2</sub> in zure dan wel kalkrijke bodems (Csathó *et al.*, 2002). Het is dan ook niet verwonderlijk dat de conversiefactoren verschillen van studie tot studie (Schoumans, 1997; Sibbesen and Sharpley, 1997) en er dus geen algemeen geldende omzettingformules bestaan (Moody *et al.*, 2013).

## 2.9 RELATIE TUSSEN BODEMFOSFORTESTEN EN FOSFORVERLIEZEN UIT BODEMS

Een goede bodemfosfortest is niet alleen aan gewasopbrengsten maar ook aan fosforverliezen gerelateerd. Fosforverliezen zijn op veel verschillende manieren te meten: fosforconcentraties of fosforhoeveelheden in uitloging, runoff, drainagewater,... (zie Tabel 8). In Tabel 8 staan verschillende studies weergegeven die bodemfosfortesten relateren aan fosforverliezen. Er is geen test die altijd beter scoort dan de andere, maar 0,01 M P-CaCl<sub>2</sub> lijkt meestal de fosforverliezen goed te kunnen verklaren. In veldsituaties is hydrologie vaak bepalend voor de reële fosforverliezen (van Middelkoop *et al.*, 2007; Kleinman *et al.*, 2011).

Tabel 8. Voorspellende waarde van verschillende bodemfosfortesten voor fosforverliezen uit bodems, zoals gevonden in de literatuur (niet-limitatieve lijst). Groen: verklarende parameter. Rood: geen verklarende parameter. Verschillende parameters gescheiden met '>': de eerste parameter heeft een betere voorspellende waarde dan de tweede.

Referentie	Land	Aantal bodems	Test	Textuur	Bodemgebruik	Voorspelde parameter (fosforverlies)	Voorspellende parameter (bodemfosfor)	Extra
(Ulén, 1999)	Zweden	4	Lysimeter	Zand/klei	Wisselend	o-P-concentratie in uitloging	P-AL	
(Lindvall <i>et al.</i> )	Zweden	?	Bodemkolom	?	?	o-P-concentratie in uitloging	P-AL	
(Svanbäck <i>et al.</i> , 2013)	Zweden	5	Bodemkolom	Verschillende	Verschillende	o-P-concentratie in uitloging	P-AL	
(Djodjic <i>et al.</i> , 2004)	Zweden	5	Bodemkolom	Verschillende	Verschillende	P <sub>t</sub> -concentratie in uitloging	P-AL, P-Olsen	
		46		Zandleem	Akkerbouw		P <sub>i</sub> , P-AL, P-DL, P-Olsen, P-ox, FVG	
(Godlinski <i>et al.</i> , 2004)	Duitsland	24	Lysimeters	?	Grasland	P <sub>t</sub> -verliezen in uitloging	P <sub>i</sub> , P-AL, P-DL, P-Olsen, P-ox, FVG	
		6		Zand	Akkerbouw		P <sub>i</sub> , P-AL, P-DL, P-Olsen, P-ox, FVG	

(Rubaek <i>et al.</i> , 2010)	Dene- marken	?	Bodemkolom	Verschillende	Verschillende	P <sub>t</sub> -verliezen in uitloging	P-Olsen	
(Hartz and Johnstone, 2006)	VS (Cali- fornië)	25	Bodemkolom	Verschillende	Groenten	Opgeloste P- concentratie in runoff en uitloging	P-CaCl <sub>2</sub> > P- resin > P-Olsen > FVG > P <sub>FeO</sub>	Sterke correlaties, met drempelwaarde
(McDowell and Sharpley, 2001a)	VK en VS	70	Lysimeter	Verschillende	Verschillende	o-P-concentratie in runoff en uitloging	P <sub>w</sub> , P-CaCl <sub>2</sub> , P- Olsen, P- Mehlich	Met drempel- waarde
(Smith <i>et al.</i> , 1998)	Engeland	7	Suction cups in bodem	?	?	o-P-concentratie in uitloging	Olsen-P	Exponentieel vanaf drempel- waarde
(Kleinman <i>et al.</i> , 2003)	VS	3	Bodemkolom	Leem-klei	?	P <sub>t</sub> -concentratie in uitloging	P-ox, FVG, P <sub>w</sub> , P-Mehlich	
(Ulén, 2006)	Noorwe- gen	22	Veldexperiment	Verschillende	Verschillende	Opgeloste P- concentratie in drainagewater	FVG-AL	
(De Smet <i>et al.</i> , 1995; Brookes <i>et al.</i> , 1997)	Vlaandere n (West- Vlaandere n)	19	Waarnemingen drainagewater	Zandleem	?	o-P-concentratie in drainagewater	FVG	Exponentiële toename boven 50% FVG
(McDowell and Sharpley, 2001b)	VS	3	Lysimeters	Leem	Soja	o-P-concentratie in uitloging	P-Mehlich, P- CaCl <sub>2</sub> , FVG	Met drempel- waarden
(Lookman, 1995)	Vlaandere n (N)	40	Labo-schudtest	Zand	Akkerbouw	o-P-concentratie in waterextract	FVG	Drempelwaarde 60-70% FVG
(Baert <i>et al.</i> , 1997)	Vlaandere n (Poeke- beek)	?	Waarnemingen drainagewater	Zand- zandleem	Verschillende	o-P-concentratie in drainage	FVG	Bij FVG >50%: o- P-conc > 1 mg P/L

(Kumaragama <i>et al.</i> , 2011)	Canada	2	Runoff regen-simulatie	Zand/klei	?	Opgeloste o-P-concentratie in runoff	P-Olsen, P-Mehlich > P <sub>w</sub>	Pw: soms wel en soms niet significant
(Pote <i>et al.</i> , 1996)	VS	54	Runoff regen-simulatie	Leem	Gras	Opgeloste o-P-concentratie in runoff	P <sub>w</sub> , P-ox, P <sub>FeO</sub> > P-Olsen, P-Mehlich	Geen correlaties met fosforlading
(Maguire and Sims, 2002)	VS	5	Bodemkolommen	Verschillende	?	Opgeloste o-P-concentratie in uitloging	P <sub>w</sub> , P-CaCl <sub>2</sub> , P <sub>FeO</sub> > P-Mehlich, FVG-Mehlich	Met drempelwaarden
(Chrysostome <i>et al.</i> , 2007)	VS	4	Kleine bodemkolommen	Zand	?	P-concentratie in uitloging	P <sub>w</sub>	
(Ashjaei <i>et al.</i> , 2010)	Canada	1	Bodemkolommen	Leem	Wisselend	o-P-lading	P-resin, P-Olsen	Met drempelwaarden
(Leinweber <i>et al.</i> , 1999)	Duitsland	20	Lysimeters	Zand-zandleem	Verschillende	P-concentratie in uitloging	FBV (-), FVG > P-Olsen, P-ox, P <sub>w</sub> , P-DL	Negatieve correlatie met FBV
(Tunney, 2002)	Ierland	4	Veldstudie (watercollectie)	Verschillende	Gras	Opgeloste o-P-ladingen	P-Morgan	Exponentieel
(Dougherty <i>et al.</i> , 2011)	Australië	6	Runoff regen-simulatie	Verschillende	Gras	P-concentratie in runoff	P-DGT > P-Colwell	P-Colwell afhankelijk van bodemtype
(Hahn <i>et al.</i> , 2012)	Zwitserland	2	Runoff regen-simulatie	Leem	Gras	P-concentratie in runoff	P <sub>w</sub>	Afhankelijk van regenintensiteit
(Turner <i>et al.</i> , 2004)	VS	4	Runoff regen-simulatie	Kalk leem/zandleem	Akkerbouw	Opgeloste o-P-concentratie in runoff	P <sub>w</sub> , P-Olsen, P-CaCl <sub>2</sub> , P <sub>FeO</sub>	Enkel P-Olsen onafhankelijk van bodemeigenschappen

(Schroeder <i>et al.</i> , 2004)	VS	6	Runoff regen-simulatie	Zandleem	Gras	Opgeloste o-P-concentratie in runoff Totale P-concentratie in runoff	FVG > P-Mehlich, P <sub>wr</sub> , P <sub>FeO</sub> FVG > P-Mehlich, P <sub>wr</sub> , P <sub>FeO</sub>	Betere correlatie wanneer Fe <sub>ox</sub> en Al <sub>ox</sub> worden meegenomen
Haygarth & Jarvis (1995) in (Brookes <i>et al.</i> , 1997)	VK	4	Lysimeters	?	Gras	P-uitloging	P-Olsen	
(Brookes <i>et al.</i> , 1997)	VK	1	Waarnemingen drainagewater	Leem-klei	Tarwe	Opgeloste o-P en totale P-concentratie in drainagewater	P-Olsen	Drempelwaarde
(Frossard <i>et al.</i> , 2014)	Zwitserland	5	Doorstroom-reactor met radio-isotopen	Wisselend	Gras	Totale P hoeveelheid gedesorbeerd	E-waarde, P-ox, FVG	
(Schindler <i>et al.</i> , 2009)	VS	5	Runoff regensimulatie	Zand en leem	Maïs-soya	Totale P-concentratie in runoff	P-Olsen, P-Bray, P-Mehlich, P <sub>wr</sub> , P-CaCl <sub>2</sub>	
(Pote <i>et al.</i> , 1999)	VS	3	Runoff regensimulatie	Leem en klei	Gras	Opgeloste P-concentratie in runoff	P-Mehlich, P-Olsen, P-Morgan, P-Bray, P-ox, P <sub>wr</sub> , FVG	Gemeten in bovenste 2 centimeter
(Vanden Nest, 2015)	Vlaanderen en Frankrijk	5	Bodemkolommen	Zandleem	Verschillende	Opgeloste en totale P-concentratie in uitloging	P-CaCl <sub>2</sub> > HWP >> P-AL	

## 2.10 OVERZICHT

Vermoedelijk zijn inschattingen van de intensiteit een betere maat voor de fosforbeschikbaarheid omdat het gewas fosfor opneemt vanuit de bodemoplossing. De fosforintensiteit is echter maar een beperkte pool, relatief sterk onderhevig aan wijzigingen en omstandigheden. De fosforcapaciteit is wellicht een minder goede maat voor de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid, wat verklaart waarom vaak grote variaties in kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling worden waargenomen (zie hoger). Een bepalende factor is de fosforbuffercapaciteit van een bodem, de verhouding van de fosforcapaciteit over de –intensiteit (Johnston *et al.*, 2014). Aangezien de intensiteit meer bepalend is voor de fosforbeschikbaarheid zal de kritische fosforcapaciteit toenemen bij hogere fosforbuffercapaciteit (Moody, 2007). Ook bodemcondities, en dan vooral bodemstructuur, zijn bepalend voor de kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling, wellicht omdat deze wortelgroei beïnvloedt (Johnston *et al.*, 2014). Alle testen, met uitzondering van de *in situ* resin-test kunnen bodemstructuur niet in rekening brengen, waardoor voor al deze testen variaties in kritische fosforbeschikbaarheid kunnen verwacht worden bij significante verschillen in bodemstructuur, bijvoorbeeld veroorzaakt door verschillen in organisch stofgehalte (Johnston *et al.*, 2014).

Niet alleen relaties met gewasopbrengst en fosforverliezen, maar ook de praktische haalbaarheid en toepassing zijn belangrijk voor de selectie van een bepaalde fosfortest. In Tabel 9 wordt een overzicht gegeven van de methodes besproken in deze literatuurstudie, waarbij de voornaamste criteria gescoord worden van slecht (+) tot goed (++++). De toekenning van een score is onderwerp van enige subjectiviteit en daarom wordt uitdrukkelijk verwezen naar de tekst hierboven voor specifieke informatie.

Op basis van deze informatie kan een geschikte set geselecteerd worden voor verdere evaluatie.



Tabel 9. Samenvatting van geschiktheid van bodemfosfortesten voor toepassing in Vlaanderen volgens verschillende criteria obv de literatuurstudie. Elk criterium wordt gescoord van slecht (+) tot goed (++++). Waar geen of weinig data beschikbaar zijn, wordt '?' of een beoordeling tussen haakjes weergegeven. Criteria 'gevoeligheid' wordt in lichtgrijs aangeduid omdat deze als goed wordt gescoord indien de test gevoelig is voor effectieve dalingen van de fosforbeschikbaarheid. Echter, een hogere gevoeligheid impliceert ook meer mogelijke ongewenste variatie door tijdelijke veranderingen (omgekeerde waardering).

Naam	Soort methode	Huidige toepassing in Vlaanderen	Toepassing in wetenschap en naburige landen	Toepasbaar voor alle Vlaamse bodemtypes	Praktische haalbaarheid/kosten	Bruikbaarheid voor andere elementen	Variabiliteit van metingen	Variatie kritische P en correlatie met relatieve opbrengst	Gevoeligheid aan veranderingen	Relatie met fosforverliezen
P-AL	Extractie, capaciteit	++++ <sup>s</sup>	+++	+++	++++	++++	++++	++ <sup>s</sup>	+	++
P-ox	Extractie, capaciteit	+++	++	++	++++	++	++++	++	+	++
P-Olsen	Extractie, capaciteit	+	++++	++++	+++	+	+(+)	++	++	++
P-Bray	Extractie, capaciteit	+	++	++	+++	+	++	++	+	++
P-Colwell	Extractie, capaciteit	+	++	++++	+++	+	++	++	++	(++)
P-Mehlich	Extractie, capaciteit	+	++	++++	++++	++++	+++	(++)	+	++
P-AAEDTA	Extractie, capaciteit	+	++	++++	++++	++++	?	?	++	?
P-CAL	Extractie, capaciteit	+	++	+++	++++	+++(+)	?	?	++	?
0,01 M P-CaCl <sub>2</sub> droog	Extractie, intensiteit	+	+++	++++	++++	+++(+)	(++)	+++	++++	++++
0,001 M P-CaCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	Extractie, intensiteit	+	+	++++	++++	+++(+)	(++)	(+++)	++++	(++++)
0,01 M P-CaCl <sub>2</sub> vochtig <sup>b</sup>	Extractie, intensiteit	+	+	++++	++	+++(+)	(++)	(+++)	++++	(++++)

P <sub>w</sub>	Extractie, intensiteit	+	+++	++++	++++	++++	+	(+++)	+++	++
HWP	Extractie, intensiteit	+	+	++++	++	?	(++)	?	+++	(+++)
P <sub>FeO</sub>	<i>Sink</i> -methode	+	++	++++	+	+	++	?	+++	++
P-resin	<i>Sink</i> -methode	+	++	++++	++	++	++	+++	+++	+++
P-DGT	<i>Sink</i> -methode	+	++	+++(+) <sup>c</sup>	++(+)	++(+)	++	++++	+++	(+++)

<sup>§</sup> Extra voordeel: wetenschappelijke en empirische onderbouwing in Vlaanderen; <sup>a</sup> Bijkomend voordeel tov 0,01 M P-CaCl<sub>2</sub>: betere weerspiegeling van fosforconcentratie in de bodemoplossing; <sup>b</sup> Bijkomend voordeel tov P-CaCl<sub>2</sub> droog: geen artificiële fosforvrijgave door drogen; <sup>c</sup> Aangepaste contacttijd voor fosforrijke bodems nodig om saturatie te voorkomen

## 2.11 SELECTIE BODEMTESTEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Op basis van de literatuurstudie en de discussie op de eerste stuurgroepvergadering werd een keuze gemaakt voor de testen die meegenomen worden in de andere werkpakketten van luik 1 (L1.2 en MP1.1). In het verslag van de eerste stuurgroepvergadering is te lezen dat er werd gekozen voor P-AL, P-ox, P-Olsen, P-CaCl<sub>2</sub> en P-DGT. Deze laatste zal door de grotere kost niet op alle bodemstalen uitgevoerd worden. Alle methodes worden op droge bodem uitgevoerd.

Voor P-CaCl<sub>2</sub> werd op de stuurgroepvergadering nog open gelaten of de extractie met 0,001 of 0,01 M CaCl<sub>2</sub> zou uitgevoerd worden. Na de stuurgroepvergadering werden aan de KU Leuven testen uitgevoerd om beide extracties te vergelijken. Gemiddeld was de P-concentratie in het 0,001 M extract twee maal hoger dan in het 0,01 M extract (Tabel 10). De extracten van de 0,001 M CaCl<sub>2</sub> extractie bevatten echter nog vrij veel colloïden, wat hinderlijk is voor de analyses. Na filteren van de extracten over een 0,45 µm membraanfilter werd gemiddeld slechts 87% (variabel) van de P in het 0,001 M CaCl<sub>2</sub> extract teruggevonden, terwijl voor de 0,01 M CaCl<sub>2</sub> extractie 97% van het P teruggevonden werd na filtratie (Tabel 10). Een mogelijk probleem voor de 0,01 M CaCl<sub>2</sub> extractie is de kleine hoeveelheid fosfor die geëxtraheerd wordt. De partners voerden daarom testen uit voor het bepalen van de bepalingsgrens van deze methode (zie verder). Deze is naargelang de partner 0,8-1,0 mg P/kg droge bodem, wat als aanvaardbaar werd beschouwd. Deze methode wordt in de wetenschappelijke literatuur ook meer teruggevonden dan de extractie met 0,001 M CaCl<sub>2</sub>. Daarom werd besloten om 0,01 M CaCl<sub>2</sub> als extractant te selecteren.

Tabel 10. Fosforconcentraties opgemeten in het 0,01 M CaCl<sub>2</sub> extract en in het 0,001 M CaCl<sub>2</sub> extract voor en na 0,45 µm filtratie.

P in 0,001 M CaCl <sub>2</sub> extract				P in 0,01 M CaCl <sub>2</sub> extract			
mg P/L				mg P/L			
	filtratie				filtratie		
Staal	Geen (1)	0,45 µm (2)	(2)/(1)	Geen (3)	0,45 µm (4)	(4)/(3)	(3)/(1)
<b>1A</b>	0,97	0,96	0,98	0,57	0,53	0,93	0,58
<b>1B</b>	0,98	0,98	1,00	0,55	0,54	0,98	0,56
<b>2A</b>	0,22	0,17	0,76	0,13	0,13	0,99	0,59
<b>2B</b>	0,24	0,16	0,68	0,13	0,13	1,00	0,55
<b>3A</b>	0,83	0,72	0,88	0,34	0,31	0,92	0,41
<b>3B</b>	0,76	0,66	0,87	0,32	0,31	0,95	0,42
<b>4A</b>	0,72	0,55	0,77	0,28	0,26	0,94	0,39
<b>4B</b>	0,72	0,57	0,79	0,27	0,26	0,94	0,38
<b>5A</b>	0,75	0,72	0,95	0,35	0,36	1,02	0,47
<b>5B</b>	0,75	0,71	0,96	0,36	0,35	0,97	0,49
<b>6A</b>	2,73	2,37	0,87	1,30	1,25	0,97	0,48
<b>6B</b>	2,69	2,39	0,89	1,27	1,25	0,99	0,47
<b>gemiddeld</b>			<b>0,87</b>			<b>0,97</b>	0,48

### 3 DWP 1.2: KWALITEITSCONTROLE

In 2015 werd de uitvoering van de testen, geselecteerd door het consortium en de stuurgroep (zie 2.11), aan een kwaliteitscontrole onderworpen. De protocollen die gebruikt worden bij de drie partners werden vergeleken en bijgestuurd om zo vergelijkbaar mogelijke resultaten van eenzelfde staal door de verschillende partners te bekomen. Dit werd voor alle testen nagegaan met behulp van een interne ringtest. Elke test werd in tweevoud op 8 verschillende bodemstalen (eigenschappen van de 10 gebruikte bodems, zie Tabel 11) uitgevoerd door de 3 partners. De resultaten daarvan zijn weergegeven in volgende tabellen en worden hieronder besproken. Waar te grote variaties in resultaten werden waargenomen, werden bijkomende acties uitgevoerd.

Tabel 11. Eigenschappen van de 10 bodems gebruikt in de interne ringtest

Bodemnr	Type	pH-KCl
1	Lichte zandleem	5,8
2	Fijn zand	5,1
3	Fijn zand	7,2
4	Lichte leem	6,6
5	Fijn zand	5,0
6	Zandleem	6,8
7	Zandleem	7,1
8	Leem	3,9
9	Zand	7,5
10	Zandklei	7,1

#### 3.1 P-AL

Voor P-AL werd een beperkte variatie van de resultaten bekomen (Tabel 12, gemiddeld 7% variatie) en was geen verdere actie nodig. Er dient wel opgemerkt te worden dat Lab1 meestal de hoogste resultaten bewam, en Lab3 meestal de laagste waarden. Ook bij de lage, kritische fosforbeschikbaarheid, worden lage variaties in de resultaten waargenomen, wat een pluspunt is binnen dit project. Het is immers belangrijk dat de kritische fosforbeschikbaarheid, die we willen vastleggen, nauwkeurig kan bepaald worden.

Tabel 12. P-AL in mg P/kg bodem gemeten in 8 ringteststalen door de 3 partners (gemiddelde van 2 of meer metingen)

Partner/bodem	1	2	3	4	5	6	7	8
Lab1	43	434	435	347	571	569	259	35
Lab2	40	359	390	350	565	590	256	34
Lab3	41	325	331	321	500	537	233	35
gemiddelde	41	373	385	340	545	565	250	35
SD*	1	56	52	16	39	27	14	1
VC (%)°	3%	15%	13%	5%	7%	5%	6%	2%

\*SD=standaard deviatie; ° VC=SD/gemiddelde x 100%

## 3.2 P-OX EN FOSFAATVERZADIGINGSGRAAD

Voor P-ox waren er aanvankelijk grotere variaties zichtbaar in de resultaten dan voor P-AL. Er werden enkele bijkomende testen gedaan om variatiebronnen te detecteren. Zo voerden de verschillende partners elk afzonderlijk de extracties uit, en werden de extracten aan elkaar doorgegeven voor meting met ICP. Op deze manier kan gedetecteerd worden of de variaties afkomstig zijn van verschillen in de extractieprocedure of eerder door de ICP-meting. Dit resulteerde in een aanpassing van het protocol voor de verdunning voor ICP-meting (zelfde verdunning voor P, Fe en Al), en in een beperkte variatie van de resultaten (Tabel 13, gemiddelde variatie van 9%). Ook hier zijn de variaties bij de lage P-ox-waarden beperkt.

Tabel 13. P-ox in mmol/kg (boven) en mg/kg (beneden) gemeten in 8 ringteststalen door de 3 partners (gemiddelde van 2 of meer metingen)

mmol/kg	1	2	3	4	5	6	7	8
Lab1	8,2	19,6	23,5	16,6	44,9	28,3	21,3	11,4
Lab2	8,6	21,1	15,9	14,7	37,5	22,9	18,4	10,1
Lab3	8,5	19,1	18,9	15,3	33,5	25,8	20,5	11,5
<b>gemiddelde</b>	8,4	19,9	19,4	15,5	38,6	25,7	20,1	11,0
<b>SD*</b>	0,2	1,1	3,8	1,0	5,8	2,7	1,5	0,8
<b>VC(%)*°</b>	2%	5%	20%	6%	15%	10%	7%	7%

\*SD=standaard deviatie: ° VC=SD/gemiddelde x 100%

mg/kg	1	2	3	4	5	6	7	8
Lab1	255	606	728	515	1392	876	660	352
Lab2	266	655	493	457	1161	710	571	313
Lab3	264	593	586	473	1040	801	636	356
<b>gemiddelde</b>	262	618	603	482	1198	796	622	340
<b>SD*</b>	6	33	118	30	179	83	46	24
<b>VC(%)*°</b>	2%	5%	20%	6%	15%	10%	7%	7%

\*SD=standaard deviatie: ° VC=SD/gemiddelde x 100%

Voor de berekening van de fosfaatverzadigingsgraad (FVG) is ook de bepaling van Fe en Al in het oxalaatextract nodig. Daarom werden ook deze gehalten met elkaar vergeleken door de 3 partners. Ook hier was de variatie aanvankelijk vrij groot, maar kon dit beperkt worden door aanpassingen in het protocol zoals hierboven besproken (Tabel 14 en Tabel 15, gemiddelde variatie van 10%). Let wel: strikt genomen mag de FVG enkel op zure zandgronden berekend worden. Enkel bodem 1, 2 en 5 vallen onder deze condities. Ook voor de andere bodems werd in deze oefening de FVG bepaald omdat het nog onzeker is of FVG eventueel ook voor niet-zure zandbodems toch een waardevolle fosforbeschikbaarheidstest is (zal in luik 1 geëvalueerd worden).

Tabel 14. Fe<sub>ox</sub> in mmol/kg gemeten in 7 ringteststalen door de 3 partners (gemiddelde van 2 of meer metingen)

Partner/Bodem	1	2	3 <sup>§</sup>	4 <sup>§</sup>	5	6 <sup>§</sup>	7 <sup>§</sup>
Lab1	68,7	15,8	34,5	45,1	40,8	53,8	87,9
Lab2	90,9	21,0	30,8	49,8	47,5	58,0	94,1
Lab3	79,3	18,1	29,9	53	40,4	62,4	100,9
<b>gemiddelde</b>	79,6	18,3	31,7	49,3	42,9	58,1	94,3
<b>SD*</b>	11,1	2,6	2,5	4,0	4,0	4,3	6,5
<b>VC (%)°</b>	14%	14%	8%	8%	9%	7%	7%

\*SD=standaard deviatie: ° VC=SD/gemiddelde x 100%; §: geen zure zandbodem, protocol van FVG in principe niet voor deze bodem geschikt

Tabel 15. Al<sub>ox</sub> in mmol/kg gemeten in 7 ringteststalen door de 3 partners (gemiddelde van 2 of meer metingen)

Partner/Bodem	1	2	3 <sup>§</sup>	4 <sup>§</sup>	5	6 <sup>§</sup>	7 <sup>§</sup>
Lab1	28,4	60,4	55,9	21,7	33,6	31,2	43,9
Lab2	34,2	77,6	43,7	21,9	38,1	30,9	44,7
Lab3	34,3	73,19	52,58	26,1	33,8	36,0	53,2
<b>gemiddelde</b>	32,3	70,4	50,7	23,2	35,2	32,7	47,3
<b>SD*</b>	3,4	8,9	6,3	2,5	2,5	2,9	5,2
<b>VC (%)°</b>	11%	13%	12%	11%	7%	9%	11%

\*SD=standaard deviatie: ° VC=SD/gemiddelde x 100%; §: geen zure zandbodem, protocol van FVG in principe niet voor deze bodem geschikt

De uiteindelijk berekende FVG varieerde bijgevolg ook beperkt tussen de partners, ook bij de lage waarden (Tabel 16). De gemiddelde variatie van alle bodems was 11%. Indien enkel de zure zandbodems meegenomen worden, is de gemiddelde variatie ook 11%. Lab1 had vaak de hoogste waarden.

Tabel 16. FVG (-) gemeten in 8 ringteststalen door de 3 partners (gemiddelde van 2 of meer metingen)

Partner/Bodem	1	2	3 <sup>§</sup>	4 <sup>§</sup>	5	6 <sup>§</sup>	7 <sup>§</sup>	8 <sup>§</sup>
Lab1	0,17	0,50	0,54	0,50	1,13	0,67	0,32	0,09
Lab2	0,14	0,43	0,43	0,41	0,88	0,52	0,27	0,09
Lab3	0,15	0,44	0,44	0,39	0,90	0,53	0,27	0,10
<b>gemiddelde</b>	0,15	0,46	0,47	0,43	0,97	0,57	0,29	0,09
<b>SD*</b>	0,02	0,04	0,06	0,06	0,14	0,09	0,03	<0,01
<b>VC (%)°</b>	10%	9%	13%	13%	14%	15%	12%	3%

\*SD=standaard deviatie: ° VC=SD/gemiddelde x 100%; §: geen zure zandbodem, protocol van FVG in principe niet voor deze bodem geschikt

### 3.3 P-OLSEN

Voor P-Olsen werden voor enkele stalen vrij hoge variaties gemeten tussen de 3 partners. Er werden verschillende testen gedaan, en filtratie werd als een belangrijke factor gedetecteerd. De protocollen werden aangepast: er wordt nu enkel nog gecentrifugeerd en niet meer gefilterd. Hierdoor werd de variatie tussen de verschillende partners kleiner (Tabel 17). De variatie is gemiddeld wel nog 14% van de gemiddelde waarde, door 3 stalen met grote variatie. Uit de literatuurstudie van luik 1 bleek ook reeds dat P-Olsen een grote variatie kent in ringtesten (Kleinman *et al.*, 2001; Neyroud and Lischer, 2003). Dit komt ook duidelijk naar voren in de WEPAL-ringtesten uit Nederland. Dit is een factor die zal meegenomen worden bij de evaluatie voor de selectie van de beste test(en) (DWP 1.5).

Tabel 17. P-Olsen in mg P/kg gemeten in 8 ringteststalen door de 3 partners (gemiddelde van 2 of meer metingen)

Partner/Bodem	1	2	3	4	5	6	7	9
Lab1	9	107	141	95	127	177	99	39
Lab2	15	103	91	80	111	117	84	45
Lab3	15	109	104	94	107	126	87	40
gemiddelde	13	106	112	90	115	140	90	42
SD*	4	3	26	8	11	33	8	3
VC (%)°	28%	3%	23%	9%	9%	23%	9%	7%

\*SD=standaard deviatie: ° VC=SD/gemiddelde x 100%

Om mogelijke interferentie met de kleurreactie door de kleur van het staal na te gaan, werden er verdere testen uitgevoerd op de KU Leuven. Deze testen werden uitgevoerd op WEPAL-stalen waarvan de P-concentratie in het extract gekend is. Het effect van de kleur van het staal werd nagegaan door extracten te schudden met actief kool, te filteren en de kleurreactie erop uit te voeren. De bekomen resultaten werden vergeleken met de resultaten van de normale P-Olsen procedure. Er was echter geen verschil op te merken in de analyseresultaten. De invloed van de kleur van het staal op de analyseresultaten werd ook nagegaan door het staal op te meten bij de correcte golflengte (890 nm) zonder toevoegen van het kleurreagens. De absorbantie zonder toevoegen van het kleurreagens was laag en verwaarloosbaar ten opzichte van de absorbantie van het staal na toevoegen van het kleurreagens. Vermoedelijk werd geen interferentie van de kleur geobserveerd omdat de geanalyseerde stalen geen hoog organische stof gehalte hadden. Bij andere preliminaire Olsen-P testen werd een koffiekleurig extract geëxtraheerd, voor dit staal was correctie met de absorbantie opgemeten voor het toevoegen van het kleurreagens noodzakelijk. Er wordt besloten dat de absorbantie van het extract zonder toevoeging van het kleurreagens opgemeten zal worden indien het extract koffiekleurig is, m.a.w. wanneer het extract veel organische stof bevat, opdat er gecorrigeerd kan worden voor de interferentie van het gekleurde extract met de kleurreactie.

### 3.4 P-CACL2

Er werd gekozen voor de extractie met 0,01 M CaCl<sub>2</sub> omdat hier minder colloïden gevormd worden en deze methode meer gangbaar is dan deze met 0,001 M CaCl<sub>2</sub>. Een mogelijk probleem is echter dat met de 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-extractie vrij weinig fosfor wordt onttrokken, wat problemen met de detectie- en bepalinglimieten met zich kan meebrengen. Daarom werd de bepalingsgrens bepaald door de verschillende partners. Deze werd bepaald met behulp van 6 verschillende stalen die op verschillende dagen in duplo werden gemeten, zoals voorgeschreven door het BAM-protocol ([https://esites.vito.be/sites/reflabos/2015/Online%20documenten/CMA\\_6\\_A.pdf](https://esites.vito.be/sites/reflabos/2015/Online%20documenten/CMA_6_A.pdf)). De bepalingsgrens is dan 6 maal de intra-reproduceerbaarheidsafwijking, met in achtneming van de



blanco-correctie. Door Lab1 werd een bepalingsgrens van 0,8 mg/kg bekomen, voor Lab2 was dit 1,0 mg/kg, voor Lab3 was dit 0,8 mg/kg. Dit werd als aanvaardbaar beschouwd voor de experimenten en analyses die voorzien zijn in het project.

De eerste variatie in bekomen resultaten van de 8 geteste bodemstalen was nog vrij groot tussen de 3 partners, daarom worden nog bijkomende testen uitgevoerd. Hieruit bleek dat centrifugeren en filtreren weer een belangrijke factor was. Ook het onmiddellijk meten van de extracten met ICP-OES bleek zeer belangrijk te zijn. Na de aanpassingen in de protocollen (centrifugeren, niet filteren over 0,45 µm, enkel meten op de dag van extractie) werd een beperkte variatie tussen de drie partners waargenomen (Tabel 18, gemiddelde variatie van 11%).

Tabel 18. P-CaCl<sub>2</sub> in mg P/kg gemeten in 8 ringteststalen door de 3 partners (gemiddelde van 2 of meer metingen)

Partner/bodem	1	2	3	4	5	6	7	10
Lab1	1,7	4,1	4,3	4,6	15,7	12,9	4,2	2,2
Lab2	1,5	4,4	3,6	4,1	13,7	12,1	3,7	1,8
Lab3	1,4	4,0	3,2	3,6	12,8	11,8	3,3	2,5
<b>gemiddelde</b>	1,5	4,2	3,7	4,1	14,0	12,2	3,7	2,2
<b>SD*</b>	0,2	0,2	0,6	0,5	1,5	0,6	0,5	0,4
<b>VC (%)°</b>	11%	4%	15%	12%	10%	5%	13%	17%

\*SD=standaard deviatie: ° VC=SD/gemiddelde x 100%

### 3.5 P-DGT

Voor de meting met DGT is een bepaalde contacttijd vereist, die niet op voorhand vastgelegd is. De contacttijd moet zodanig gekozen worden dat:

- De fosforhoeveelheid die gesorbeerd is op de ijzeroxide-gel meetbaar is op de ICP (concentratie na extractie met HCl boven de bepalingsgrens van de ICP)
- Er geen saturatie optreedt van de ijzeroxidegel (maximaal 5-6 µg P)

Naargelang de bodem veel of weinig beschikbaar fosfor bevat, moet de contacttijd dus aangepast worden. Op basis van testen met bodems met verschillende fosforbeschikbaarheid, werd een preliminaire tabel opgemaakt om de contacttijd af te leiden uit de P-AL waarde (Tabel 19).

Tabel 19. Aangewezen contacttijd voor DGT op basis van P-AL van de bodem

P-AL (mgP/kg)	Contacttijd (uur)
<60	72
60-110	48
120-170	30
180-270	24
280-370	18
380-420	16
430-460	8
470-500	6
510-590	4
>590	2-3

Tabel 20. P-DGT in µg/L gemeten in 7 ringteststalen door de 3 partners (gemiddelde van 2 of meer metingen)

Partner/bodem	1	2	3	4	5	6	7
Lab 1	39,7	216	182	216	1225	1186	167
Lab 2	29,2	200	174	196	1182	1007	153
Lab 3	41,6	267	200	188	1143	970	153
gemiddelde	36,9	228	185	200	1184	1055	158
SD*	6,7	35	13	14	41	115	8
VC (%)°	18%	15%	7%	7%	3%	11%	5%

Na een zelfgeorganiseerde opleiding voor het meten met DGT, werd ook voor deze methode een interne ringtest georganiseerd. De variatie tussen de drie partners bleek beperkt (Tabel 20, gemiddeld 10%).

### 3.6 BESLUIT

Door uitgebreide vergelijking, bijkomende testen en aanpassingen waar nodig, werden methodes en protocollen voor de 5 bodemfosfortesten geselecteerd die beperkte variaties in resultaten tussen de drie partners geven. Met behulp van interne referenties die bij elke analysereeks meegemeten en beoordeeld worden, zal de kwaliteit van de toekomstige resultaten verder bewaakt worden bij alle partners. De analyseresultaten voor de 3 partners zijn dus vergelijkbaar, wat de kwaliteit van de rapportering ten goede komt. Ook voor lage P-concentraties vertonen de geselecteerde methodes een voldoende lage variatie om ook in deze omstandigheden betrouwbare uitspraken over de P-beschikbaarheid te kunnen doen.

Voor de interne ringtest werden stalen gebruikt met een grote variatie in fosforbeschikbaarheid. Er kan voor de verschillende fosforbeschikbaarheidsmethoden nagegaan worden in hoeverre ze deze bodems 1 tot en met 7 (8, 9 en 10 werden niet met alle methodes gemeten) kunnen onderscheiden. Hoe verder de analyseresultaten uit elkaar liggen, hoe groter de kans dat de betreffende methode

onderscheid kan maken tussen verschillende bodems en evoluties van fosforbeschikbaarheid kan detecteren. Dit onderscheidend vermogen neemt toe volgens de volgorde P-ox < FVG < P-CaCl<sub>2</sub> < P-Olsen < P-AL << P-DGT (Tabel 21). Vooral P-DGT springt er bovenuit.

Tabel 21. Minimum- en maximumwaarde van ringteststalen 1-7 voor 6 verschillende fosforbeschikbaarheidsindices (eenheden in mg/kg behalve voor FVG (-) en DGT (µg/L))

	minimum	maximum	maximum/minimum
<b>P-CaCl<sub>2</sub></b>	2	14	9
<b>P-Olsen</b>	13	140	11
<b>P-AL</b>	41	565	14
<b>P-ox</b>	262	1198	5
<b>FVG</b>	0,15	0,97	6
<b>P-DGT</b>	37	1184	32

Ook werd voor de 7 bodems van de interne ringtest eens nagegaan hoeveel P de verschillende fosfortesten uit de bodem extraheren. Dit werd voor de verschillende testen procentueel berekend ten opzichte van de fosforhoeveelheid geëxtraheerd met behulp van de oxalaatextractie (grootste capaciteitsmeting) (Tabel 22). Enkel voor de P-DGT is dit moeilijk aangezien het niet gekend is uit welke hoeveelheid bodem de fosfor geëxtraheerd wordt (dit is geen echte extractie). Indien uitgegaan wordt van enkele mm bodem bovenop de DGT-eenheid, blijkt dit de methode die het minst fosfor per kg bodem extraheert. Daarna neemt de geëxtraheerde hoeveelheid toe volgens P-CaCl<sub>2</sub> (gemiddeld 0,9%) < P-Olsen (gemiddeld 14%) < P-Al (gemiddeld 52%) < P-ox (100%). Uit Tabel 22 is ook duidelijk dat de verhoudingen van de geëxtraheerde fosforhoeveelheden met de verschillende methodes sterk variabel is tussen verschillende bodems.

Tabel 22. Hoeveelheid fosfor geëxtraheerd uit ringteststalen 1-7 met de verschillende fosforbeschikbaarheidsmethoden, procentueel uitgedrukt ten opzichte van de hoeveelheid geëxtraheerd met de oxalaatextractie

	1	2	3	4	5	6	7	gemiddeld
<b>P-CaCl<sub>2</sub></b>	0,6%	0,7%	0,6%	0,8%	1,2%	1,5%	0,6%	0,9%
<b>P-Olsen</b>	5%	17%	19%	19%	10%	18%	14%	14%
<b>P-AL</b>	16%	60%	64%	71%	46%	71%	40%	52%
<b>P-ox</b>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

## 4 DWP 1.2: ROBUUSTHEIDSANALYSE VAN INTENSITEITSTESTEN

Een bodemfosfortest die op routinebasis geanalyseerd moet kunnen worden, mag niet te afhankelijk zijn van het seizoen of bepaalde omstandigheden als regenval, droogte,... Experimenten, uitgevoerd door ILVO (Vanden Nest, 2015), wijzen op variaties van vooral de intensiteitsparameters doorheen het jaar. Daarom zal hier de variatie in de tijd nagegaan worden op bodemstalen die gedroogd worden na staalname (praktijksituatie). Gedurende 2015 werden 4 percelen opgevolgd wat betreft de variatie van de intensiteitstesten in de tijd. Van de 5 geselecteerde testen is er één duidelijke intensiteitstest, namelijk P-CaCl<sub>2</sub>.

### 4.1 MATERIAAL EN METHODEN

Vier Vlaamse percelen werden gedurende 2015 opgevolgd wat betreft variatie in P-CaCl<sub>2</sub>. De eigenschappen van de bodems van de percelen lopen duidelijk uiteen (Tabel 23). Zowel op perceel 1 als 2 werd er geen fosforbemesting toegepast in 2015. Op perceel 3 werd op 21 april 55 ton rundermest per ha (79 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) toegepast. Op perceel 4 was op het ogenblik van staalname een veldproef met compost lopende. Twee behandelingen werden opgevolgd. In de eerste behandeling (zonder compost) werd in 2015 geen fosforbemesting toegepast, in de tweede behandeling (met compost) werd op 11 februari 45 ton compost/ha (356 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) toegepast.

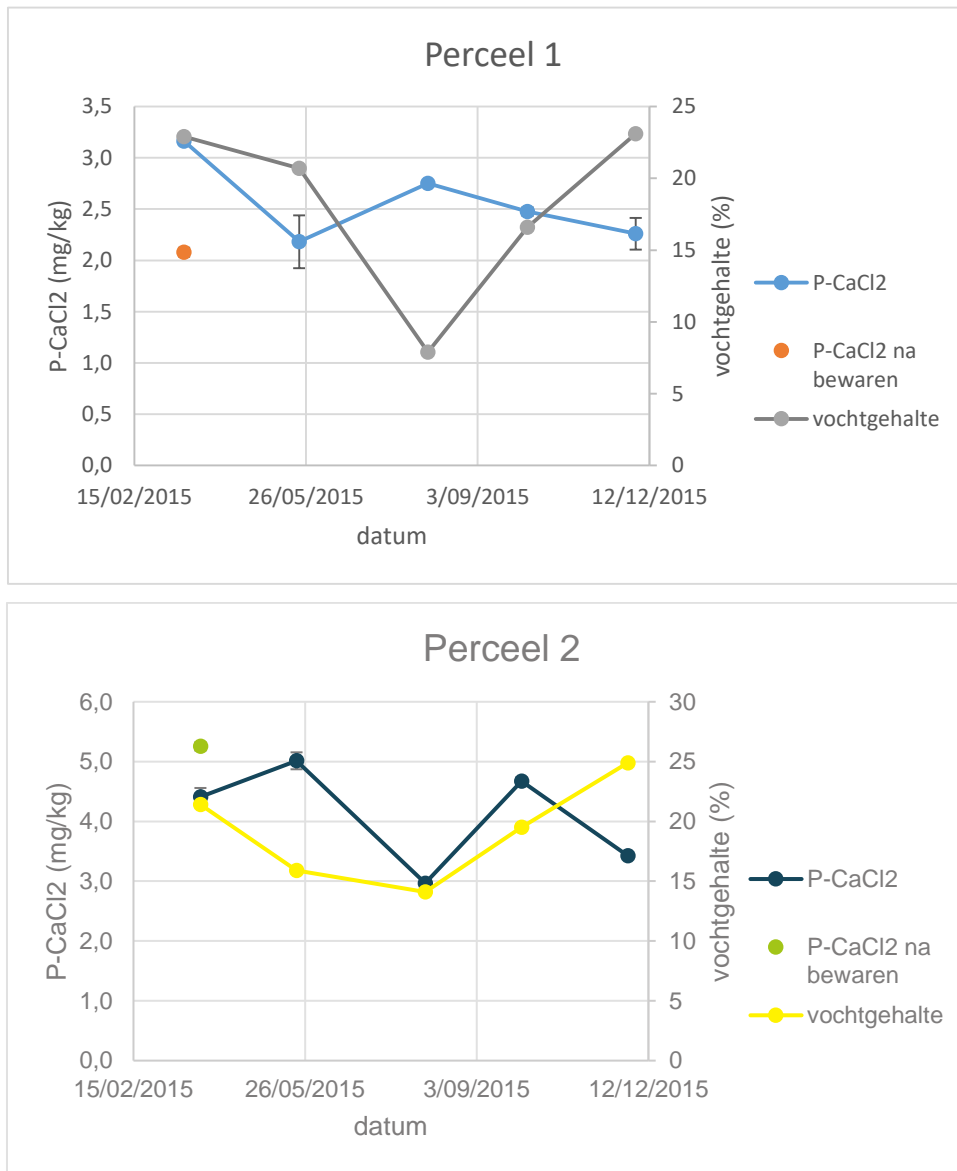
Tabel 23. Eigenschappen van de opgevolgde percelen voor fosforintensiteitstesten

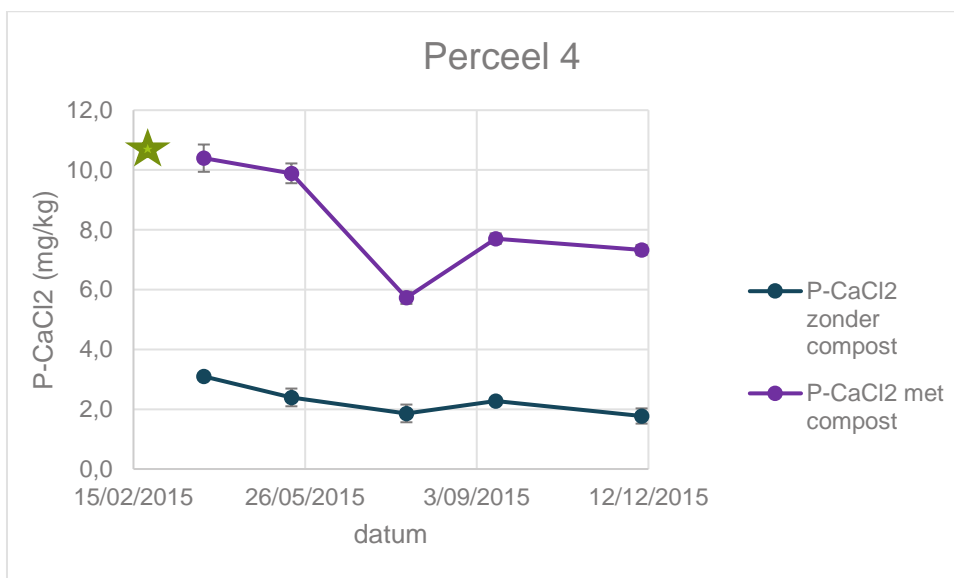
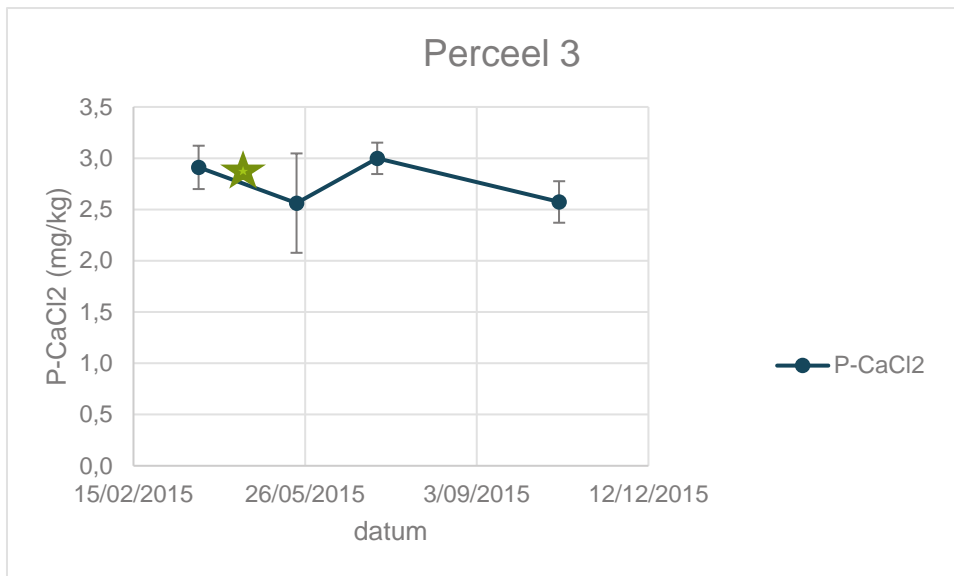
Perceel	Locatie	Type	Teelt	P-AL (mgP/kg)
1	Merelbeke	Lichte zandleem	Grasland	200
2	Poperinge	Lichte leem	Wintertarwe	490
3	Westerlo	Zand	Maïs	230
4	Bierbeek	Leem	Ajuin	110

De 4 percelen zijn elk vijf keer bemonsterd tussen maart en december 2015, met telkens ongeveer 2 maand tussen. De representatieve bodemstaalname werd telkens uitgevoerd zoals voorgeschreven door het BAM-protocol. De bodemstalen werden gedroogd (45°C) en gezeefd (2 mm). Van twee percelen (1 en 2) werd voor een bijkomende test het eerste bodemstaal (maart) deels op kamertemperatuur bewaard gedurende 6,5 maand en pas daarna gedroogd en gezeefd. Het vochtgehalte van de bodemstalen werd bepaald (drogen op 105°C) voor perceel 1 en 2.

Op het droge staal werd P-CaCl<sub>2</sub> (0,01 M CaCl<sub>2</sub>) bepaald. De analyse werd in duplo uitgevoerd. Zoals te zien aan de verticale foutenbalken in Figuur 12 zijn de variaties tussen twee metingen op één staal beperkt.

Figuur 12. Variatie van P-CaCl<sub>2</sub> (mg/kg) en het vochtgehalte (%) gedurende 2015 op 4 verschillende percelen (foutenbalken: standaarddeviatie op P-CaCl<sub>2</sub>-meting in duplo uitgevoerd). Oranje ster: moment van bemesting (enkel voor perceel 3 en compost-behandeling in perceel 4)





## 4.2 RESULTATEN EN BESPREKING

Op alle locaties wijzigt P-CaCl<sub>2</sub> in de tijd (Figuur 12 en Tabel 24). De standaarddeviatie, berekend per perceel, was gemiddeld 18% van de gemiddelde P-CaCl<sub>2</sub> gemeten in het perceel (Tabel 24). Het verschil tussen de maximale en minimale gemeten P-CaCl<sub>2</sub> in het perceel varieerde tussen 0,44 en 4,67 mg P/kg (16-58% van gemiddelde P-CaCl<sub>2</sub>). Deze cijfers onderstrepen de variabiliteit van intensiteitsparameters doorheen het jaar. De grootste variatie werd gevonden in perceel 4 met compost. Vermoedelijk is een deel van de variatie te verklaren door de recente bemesting. De fosfor toegediend via deze bemesting is aanvankelijk nog goed beschikbaar (hoge P-CaCl<sub>2</sub>), maar in daaropvolgende maanden daalt P-CaCl<sub>2</sub> door vastlegging van fosfor door de bodem (Figuur 12). Gelijkaardige trends werden ook vastgesteld door Vanden Nest et al. (2015), weliswaar voor P-CaCl<sub>2</sub> gemeten op vochtige bodem.

Er zijn echter ook op de percelen zonder recente bemesting vrij grote variaties in P-CaCl<sub>2</sub> waar te nemen (Figuur 12 en Tabel 24). De patronen van variatie zijn verschillend van perceel tot perceel en lijken niet gerelateerd aan het vochtgehalte van de bodem.

Tabel 24. Variaties in P-CaCl<sub>2</sub> op de 4 percelen, uitgedrukt als standaarddeviatie en het verschil tussen de maximum en minimum gemeten waarde van 5 metingen in het jaar (telkens in absolute waarde en relatief ten opzichte van het gemiddelde op het perceel)

Perceel	gemiddeld	Standaard-deviatie		Maximum – minimum		Hoogste waarde gemeten in	Laagste waarde gemeten in
		abs	%	abs	%		
1	2,57	0,40	16%	0,98	38%	Maart	Mei
2	4,10	0,87	21%	2,05	50%	Mei	Juli
3	2,76	0,23	8%	0,44	16%	Juli	Mei
4 zonder compost	2,28	0,53	23%	1,32	58%	Maart	December
4 met compost	8,21	1,92	23%	4,67	57%	Maart	Juli
gemiddeld		0,79	18%	1,89	44%		

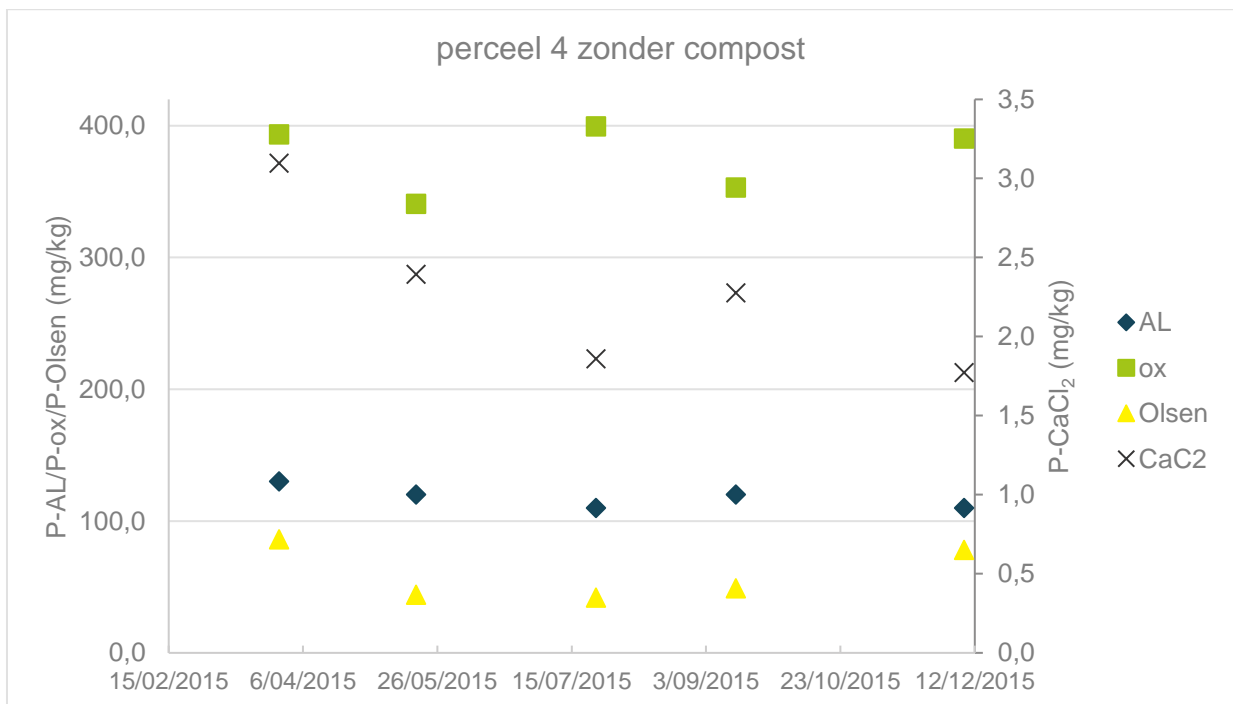
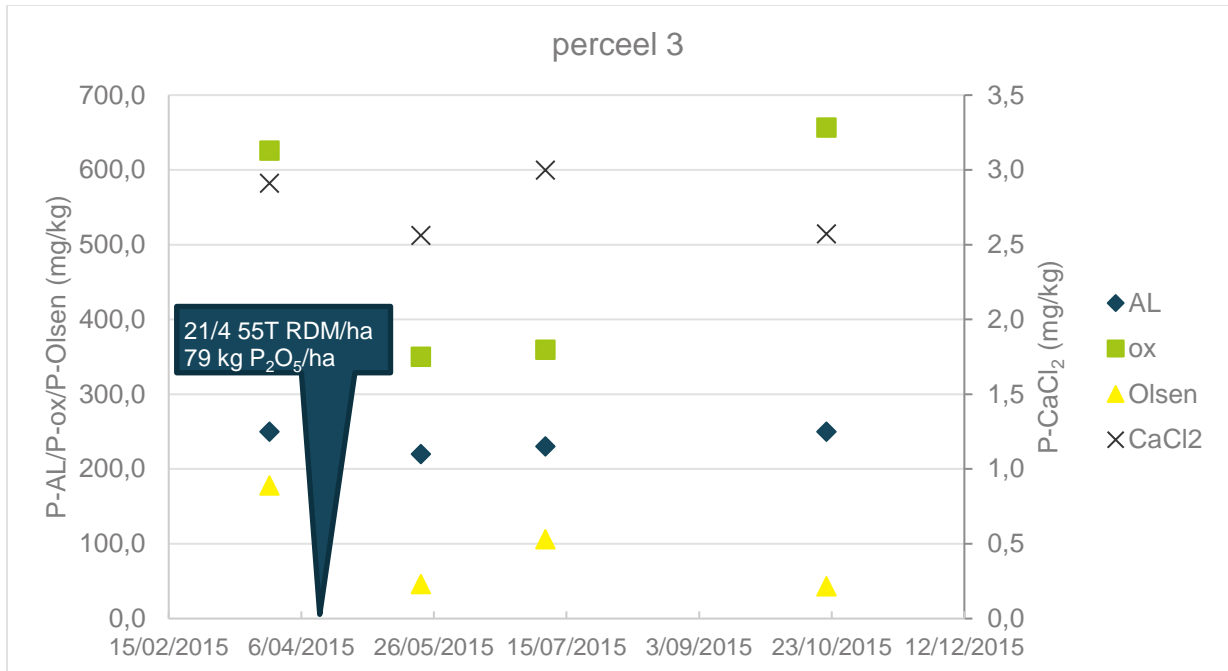
Een bodemstaal gedurende meer dan 6 maand vochtig op kamertemperatuur bewaren, resulteerde in sterk afwijkende P-CaCl<sub>2</sub> ten opzichte van het staal dat onmiddellijk gedroogd werd (Figuur 12). De verandering was voor perceel 1 negatief en voor perceel 2 positief, waardoor er wellicht verschillende processen gedomineerd hebben. Het verschil dat gecreëerd werd op één en hetzelfde bodemstaal was voor beide percelen groter dan de verschillen op de verschillende bodemstalen bemonsterd gedurende het jaar. Dit wijst er op dat processen voor fosforvrijgave en –vastlegging in de bodem grotere variaties in P-CaCl<sub>2</sub> geven dan de staalname zelf.

In de literatuur zijn meerdere mogelijke verklaringen voor variaties van P-CaCl<sub>2</sub> en andere fosforbeschikbaarheidsindices in de tijd te vinden. Vaak worden toenames in fosforbeschikbaarheid in de lente en zomer geobserveerd, ook op niet bemeste percelen (Saunders and Metson, 1971; Chen *et al.*, 2003; Styles and Coxon, 2007; Vanden Nest, 2015). Deze worden verklaard door stijgende temperatuur en microbiële activiteit (Chen *et al.*, 2003; Styles and Coxon, 2007). Op de meeste percelen was de trend eerder dalend dan stijgend, maar dit kan voor de twee bemeste percelen aan fosforvastlegging na bemesting gerelateerd zijn (zie hoger). Een andere mogelijke verklaring voor trends in P-CaCl<sub>2</sub> is wash-out van fosfor bij veel neerslagoverschot (Styles and Coxon, 2007). Dit is eventueel een mogelijke verklaring voor een daling van P-CaCl<sub>2</sub> in het late najaar, zoals geobserveerd op alle percelen. Ook fosforopname door het gewas kan in een tijdelijke daling in de fosforbeschikbaarheid resulteren (Styles and Coxon, 2007; Vanden Nest, 2015). Er was echter niet op alle percelen een duidelijk dalende trend van P-CaCl<sub>2</sub> in het groeiseizoen waarneembaar. Variaties in fosforbeschikbaarheid kunnen daarnaast ook gerelateerd zijn aan variaties in bodem-pH, zoals gesuggereerd door Schwartz *et al.* (2011) en Vanden Nest *et al.* (2015).

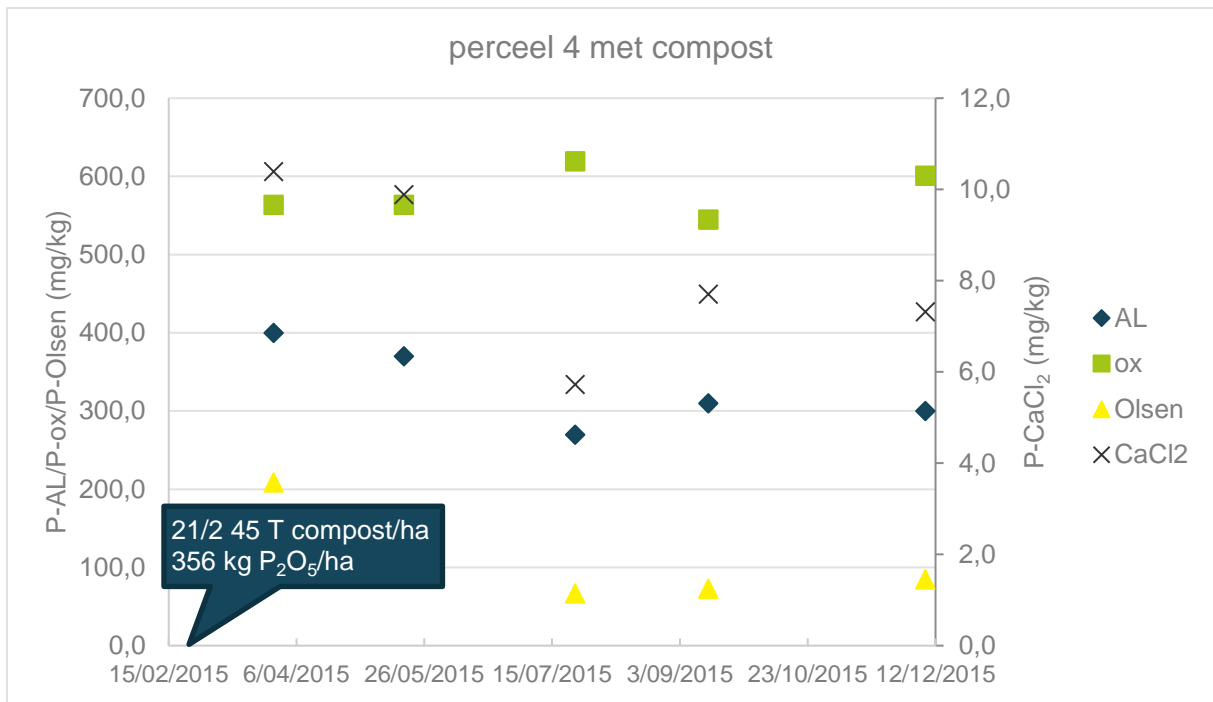
Wat ook de bron is van de variatie, een belangrijke vaststelling is hier dat de variatie in P-CaCl<sub>2</sub> relatief groot is én dat er geen duidelijk moment in het jaar is dat P-CaCl<sub>2</sub> systematisch het laagst of het hoogst is (Tabel 24). Met andere woorden: er is geen duidelijk aangewezen moment voor staalname waarop met enige zekerheid kan gezegd worden dat de gemeten P-CaCl<sub>2</sub>-waarde representatief, laag of hoog is ten opzichte van de jaargemiddelde P-CaCl<sub>2</sub>.

In de offerte werd gesteld dat de robuustheidsanalyse enkel op de intensiteitsparameters ging uitgevoerd worden. Voor perceel 3, 4 zonder compost en 4 met compost, zijn echter ook de andere fosforbeschikbaarheidstesten (met uitzondering van P-DGT) uitgevoerd. Daardoor is de variatie van P-

CaCl<sub>2</sub> te vergelijken met de andere testen. Voor deze 3 percelen (perceel 3, 4 zonder compost en 4 met compost) was de variatiecoëfficiënt (standaarddeviatie procentueel uitgedrukt ten opzichte van het gemiddelde) gemiddeld 18% voor P-CaCl<sub>2</sub>. De gemiddelde variatiecoëfficiënt was kleiner voor P-AL (10%) en P-ox (15%), maar groter voor FVG (22%) en P-Olsen (53%). De variatie in de tijd voor deze percelen is terug te vinden in Figuur 13.







Figuur 13. Variatie van P-AL, P-ox, P-Olsen (linkeras) en P-CaCl<sub>2</sub> (rechteras) (alles in mg/kg) gedurende 2015 op perceel 3, perceel 4 zonder compost en perceel 4 met compost

## 5 DWP 1.3: GEWASRESPONS RELATEREN AAN BODEMFOSFORTESTEN MET BEHULP VAN DEPLETIEPROEF

### 5.1 INLEIDING

Eén van de belangrijkste criteria voor een geschikte bodemfosfortest is het kunnen voorspellen van de gewasrespons, en dit bij verschillende omstandigheden (o.a. verschillende bodemeigenschappen) en scenario's (bijvoorbeeld opbouw of afbouw van bodemfosforgehalte). DWP1.3 bestaat uit het vergelijken van de bodemfosfortesten om (a) de gewasrespons te voorspellen bij lange termijn proefvelden met een duidelijke en grote respons op gewasopbrengst (zie deel 6) en (b) de gewasrespons te voorspellen in situaties van een negatieve P-balans, gebruik makend van een versnelde P-uitmijning van de bodem in de serre (dit deel 5).

In de uitmijningsproef in de serre worden 8 bodems uitgemijnd voor fosfor door grasgroei en –afvoer. Op basis van het verloop in P-opname en gewasgroei en het verloop van het beschikbaar P-gehalte in de bodem kan men onderzoeken welke bodemtest voor beschikbaar P kan aanduiden op welk punt er P-gebrek in de plant optreedt. Er zal voor de 6 fosfortesten (P-CaCl<sub>2</sub>, P-DGT, P-Olsen, P-ox + FVG, P-AL) nagegaan worden vanaf welke bodem-P de gewasopbrengst suboptimaal is. Analyse van het verband tussen het bodem P gehalte gemeten via de verschillende testen en de plant (plantgroei, % P in de plant, P-opname) zal bepalen welke test de meest geschikte is voor het kwantificeren van het plantbeschikbaar P.

### 5.2 MATERIAAL EN METHODEN

#### *Bodemstaalname*

Het experiment werd opgezet met bodems van 8 verschillende percelen. Deze percelen werden geselecteerd op basis van hun geografische locatie, hun textuur en hun hoeveelheid P, gebruik makend van P-AL als index, met behulp van de databank van de Bodemkundige Dienst van België. Om te vermijden dat gewasgroei beperkt wordt door andere factoren dan N en P, werden percelen geselecteerd waarvan de bodem een streefzone-pH en streefzone-gehalte aan organische koolstof heeft. Er werd gezocht naar een variatie aan P-AL-waarden, met een P-AL die niet te hoog was zodat uitmijning tot deficiënte waarden binnen het jaar realistisch is. De eigenschappen van de geselecteerde bodems zijn terug te vinden in Tabel 25. Het gaat om akkerbouwpercelen, enkel bodem 8 is een graslandperceel. Van de bodems werd in februari 2015 250 kg staal genomen van de ploeglaag. De bodemstalen werden genomen als meerdere substalen waarbij een kruispatroon gevolgd werd op elk perceel. Nadat de bodems gedroogd waren (luchtdroog), werden ze gezeefd over 4 mm.

#### *Serrecondities*

De potproef werd opgezet in een serre bij natuurlijk licht. De temperatuur werd hierbij gecontroleerd en varieerde tussen 19-22°C gedurende de dag, en tussen 16-17°C gedurende de nacht, waarbij de laatstgenoemde temperatuur telkens de ventilatietemperatuur is. In de serre is geen koelsysteem aanwezig, waardoor gedurende de zomer de temperatuur kon stijgen tot boven de 22°C in de serre. Het openen van het dak liet echter luchtcirculatie toe, tezamen met het op stand houden van de relatieve luchtvochtigheid op 65% leidde dit ertoe dat de temperatuurstijging beperkt werd tot de buitentemperatuur verminderd met 2°C. Tijdens de winter werd bijkomend artificieel licht voorzien tussen 8u en 22u wanneer de natuurlijke lichtintensiteit daalde onder de 250W. Bevochtiging van de planten gebeurde meermaals per dag via besproeiing van bovenuit. Deze bevochtiging was computergestuurd en de tijdsspanne en intensiteit van sproeien werd aangepast naargelang de behoefte van het gras (zomer vs winter). Deze bevochtiging paste ook automatisch aan afhankelijk van

de stralingsintensiteit die op het dak van de serre gemeten werd. De relatieve luchtvochtigheid werd aangepast indien nodig en was gericht op 65%.

Tabel 25. Bodems gebruikt in de serreproef, en hun eigenschappen. Alle eigenschappen zijn gebaseerd op de databank van de BDB (uitzondering bodem 5, dit is een proefveld van UGent), behalve P-AL dat op de initiële bemonsterde stalen werd gemeten (LN LP behandeling, dus zonder bijkomende N- of P-bemesting)

Bodemnr	P-AL (mg/kg)	pH	%OC	textuur
1	310	5,9	1,26	Lichte leem
2	280	6,6	1,47	Zandleem
3	120	6,2	1,25	Zandleem
4	150	5,6	2,81	Fijn zand
5	200	4,7	-	Zand
6	110	5,3	1,86	Fijn zand
7	120	7,2	1,19	Leem
8	150	6,1	3,79	Leem

#### Opstart potproef

Per bodem werden 4 behandelingen opgesteld, d.w.z.  $4 \times 8 = 32$  behandelingen in totaal. De 4 behandelingen per bodem zijn twee niveaus van N-bemesting (laag (-N) en meer dan voldoende (+N)) in combinatie met geen P-bemesting (-P) of onderhoudsbemesting (+P). Er werd voor 2 N-behandelingen gekozen omdat zo twee snelheden van fosforonttrekking gesimuleerd worden. Een goede test moet immers zowel voor snel- als traaggroeiende gewassen goed scoren. Naast de uitmijningsbehandeling (-P) is er ook een onderhoudsbemesting (+P) omdat relatieve opbrengsten (ten opzichte van +P) moeten kunnen berekend worden. Deze werkwijze vangt mogelijk opbrengstdalingen in de tijd door andere factoren dan fosforbeschikbaarheid op.

Alle behandelingen kregen een initiële bemesting van 25 kg Mg/ha als  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en 50 kg K/ha als  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Hoge stikstofbehandelingen (+N) kregen een initiële dosis van 60 kg N/ha (combinatie van  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  en  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), hoge fosforbehandelingen (+P) werden initieel bemest met 20 kg P/ha als  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . De bodems werden bevochtigd en geplaatst in bakken van 41 cm lengte en 37 cm breedte (oppervlakte  $1517 \text{ cm}^2$ ). De bakken werden gevuld met bodem tot een hoogte van 5 cm. Voor elke bodem werd voor alle behandelingen eenzelfde massa per bak afgewogen. Per behandeling werden vier replica's opgezet, dit geeft een totaal van  $8 \times 4 \times 4 = 128$  bakken. De bodems werden afgedekt met een plasticen zeil om gedurende een week te incuberen. Van elke behandeling werd ook een bodemstaal genomen voor bodemanalyse, deze werd ook mee geïncubeerd zodat de initiële startcondities van de potproef het best gesimuleerd werden tijdens de analyse. Na een week van incubatie werd op 9 maart 2015 Engels raaigras (*Lolium perenne*, Melpetra tetra) ingezaaid met een initiële zaaidensiteit van  $0,43 \text{ mg/cm}^2$  (1 cm onder het bovenoppervlak). Deze dag, waarop de potproef effectief startte, is dag 0 van het experiment. Figuur 14 toont een foto van de opzet.



Figuur 14. De uitmijningsproef opgesteld in de serre aan de KU Leuven.

### *Opvolging potproef*

Wekelijks werd het bodemvochtgehalte bijgesteld, de bakken verplaatst en onkruid verwijderd. Aangezien de biomassa-productie lager was dan verwacht, werd de zaaidensiteit twee maal verhoogd tijdens de potproef: eerst tot  $1,3 \text{ mg cm}^{-2}$  (dag 72), dan tot  $9,3 \text{ mg cm}^{-2}$  (dag 179). Na ongeveer een jaar was de grasgroei enorm gedaald, mogelijks door een teveel aan mos. Van elke pot werd de bovenste laag afgesneden en met de reeds uitgemijnde bodem werden twee nieuwe replica's per behandeling opgestart. Er werd gras ingezaaid met een zaaidensiteit van  $14 \text{ mg cm}^{-2}$  op 15/04/2016. De hoge stikstof behandeling (+N) werd stopgezet op dag 535 voor alle bodems. De overige behandelingen vertoonden in bepaalde bakken nauwelijks groei, vermoedelijk werd het gras verschroeid door hoge temperaturen net nadat het geknipt werd. Daarom werd op 13/10/2016 gras bijgezaaid met een densiteit van  $14 \text{ mg cm}^{-2}$ . De lage stikstof behandelingen (-N) werden stopgezet op dag 668.

Het gras werd geoogst op dag 21, 43, 70, 94, 121, 148, 178, 204, 228, 259, 287, 336, 365, 400, 441, 462, 477, 494, 511, 535, 557, 584, 612, 641 en 667. Dit werd gedaan door het gras te knippen tot op een hoogte van  $\pm 2 \text{ cm}$  (bovenkant bak). Het gras werd gedroogd gedurende 72 uur op  $70^\circ\text{C}$  en gewogen, vervolgens werd het gemalen en geanalyseerd. Bodemstalen werden genomen op dag 71, 150, 228, 365, 400, 462, 540 en 668. Per bak werden 5 substalen genomen (diameter bodemboor = 1 cm). De bodemstalen werden gedroogd gedurende 72 uur op  $45^\circ\text{C}$ , gezeefd over een 2 mm zeef en in een mortier verfijnd alvorens analyse met de 6 testen.

Na elke oogst werden de bodems bemest met stikstof (N), fosfor (P), kalium (K), calcium (Ca), zwavel (S) en magnesium (Mg) (Tabel 26). De onttrekking van nutriënten door het gras werd gecompenseerd via bemesting op basis van de geproduceerde biomassa en het optimale nutriëntengehalte in het gras. Ideale nutriëntenwaarden voor Engels raaigras, gebruikt voor deze berekeningen zijn: 36 g N/kg droge stof (ds), 36 g K/ kg ds, 3 g Mg/ kg ds, 4 g P/ kg ds, 4 g Ca/kg ds (Reuter and Robinson, 1997). Magnesium werd toegevoegd als  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , P als  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , N als  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , K als een combinatie van  $\text{KNO}_3$  en  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  of KCl, Ca als  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Aangezien de biomassa-productie in de -N behandelingen sterk vertraagd was ten opzichte van de +N behandelingen, werd meermaals extra N toegediend aan de -N behandeling, tot 200% compensatie van hetgeen onttrokken werd. Aangezien de nutriënten gecompenseerd werden per geproduceerde biomassa per behandeling, en de biomassa in de -N

behandeling beduidend lager lag dan in de +N behandeling, werd ondanks dat er een hogere procentuele compensatie was in de -N behandeling bij oogst 3 en 4, een lagere absolute hoeveelheid N toegevoegd dan bij de +N behandeling.

Indien uit plantanalyses bleek dat voor bepaalde bodems het fosforgehalte in de +P-behandeling lager was dan de kritische waarde van 2 g P/kg (Reuter and Robinson, 1997), werd bij de volgende bijbemesting extra gecompenseerd voor dit element. Dit was noodzakelijk aangezien de +P behandeling de referentiebehandeling is. Ook voor andere elementen werd er gecompenseerd indien bleek uit de plantanalyse dat een bepaald element een suboptimale waarde had. In Tabel 26 wordt weergegeven voor hoeveel % de onttrokken biomassa werd gecompenseerd per nutriënt. Micronutriënten (Cu, Zn, Mn, B en Mo) werden toegevoegd na de vierde oogst, op dag 101. Voor de -N behandelingen werd 8 mg Mn, 0,8 mg Cu, 4 mg Zn, 0,96 mg B en 0,032 mg Mo toegevoegd per bak, voor de +N behandelingen was dit 23 mg Mn, 2,3 mg Cu, 11,5 mg Zn, 2,76 mg B en 0,092 mg Mo. Deze hoeveelheden werden ook berekend op basis van de ideale gewasgehaltenes (g nutriënt/kg droge stof): 0,1 g Mn/kg, 0,01 g Cu/kg, 0,05 mg Zn/kg, 0,012 mg B/kg 0,0004 mg Mo/kg (Reuter and Robinson, 1997), en op basis van een schatting van een totale opbrengst van 5,0 ton/ha in de -N behandeling en 15 ton/ha in de +N behandeling, opdat deze bemesting van de micronutriënten maar éénmalig zou moeten gebeuren. Mn werd toegevoegd als  $MnSO_4 \cdot 7H_2O$ , Cu als  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , Zn als  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ , B als  $H_3BO_3$  en Mo als  $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ . Aangezien de proef langer duurde dan oorspronkelijk voorzien, en er dus ook meer biomassa was, werden de micronutriënten nogmaals gecompenseerd voor een opbrengst van 8 ton/ha op dag 498 in alle behandelingen.

Tabel 26: Procentuele compensatie van nutriënten tijdens de bijbemesting gebaseerd op de geproduceerde biomassa en ideale referentiewaarden in raai gras. Vanaf oogst 20 was enkel bodem 3 nog opgenomen in de +N behandeling.

Oogst	N	P	K	Mg
	(-, +)	(-, +)	(-N, +N)	(-N, +N)
1	37.5 %, 100%	0%, 100%	100%	100%
2	37.5 %, 100%	0%, 100%	100%	100%
3	200%, 150%	0%, 100%	200%, 150%	200%, 150%
4	200%, 150%	0%, 100%	200%, 150%	200%, 150%
5	150%,100%	0%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
6	150%,100%	0%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
7	100%, 100%	0%, 200%	100%, 100%	100%, 100%
8	37%, 100%	0%, 200%	100%, 100%	100%, 100%
9	44%, 100%	0%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
10	44%, 100%	0%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
11	100%, 150%	0%, 200%	100%, 100%	200%, 200%
12	100 %, 150%	0%, 200%	100%, 100%	200%, 200%
13	44%, 100%	0%, 200%	100%, 100%	100%, 100%
14	100%, 100%	0%, 200%	100%, 100%	100%, 100%
15	150%, 200%	0%, 200%	150%, 200%	150%, 200%
16	44%, 100%	0%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
17	44%, 100%	0%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
18	100%, 150%	0%, 200%	100%, 150%	100%, 150%
19	100%, 150%	0%, 200%	100%, 150%	100%, 150%
20	100%, -	0%, 100%	100%, -	100%, -
21	100%, -	0%, 100%	100%, -	100%, -
22	100%, -	0%, 100%	100%, -	100%, -
23	37%, -	0%, 100%	100%, -	100%, -
24	37%, -	0%, 200%	100%, -	100%, -

### *Bodemanalyse*

De benodigde hoeveelheid bodem werd afgewogen om een bodem:vloeistof ratio te bekomen zoals voorgeschreven in de protocollen die samengevat worden in Tabel 27 (zie ook DWP 1.2). Van de bodemtesten die opgenomen zijn in het "Compendium bemonsterings-en analysemethodes voor mest, bodem en veevoeder (BAM)" werden de opgestelde protocollen gevolgd. De chemische extracties werden geschud in een end-over-end shaker (30 RPM) op 20°C in het donker. Fasescheiding voor P-ox werd uitgevoerd aan de hand van een papier filtratie, voor P-AL, P-Olsen en P-CaCl<sub>2</sub> was dit via centrifugatie (bij 1830g gedurende 10 min). Fosforconcentraties in het extract voor P-ox, P-AL en P-CaCl<sub>2</sub> werden bepaald via inductief gekoppeld plasma optische emissie spectroscopie (bij 213,6 nm, ICP-OES). Ook ijzer (Fe) en aluminium (Al) werden bepaald in het oxalaat extract. De P-concentratie in het P-Olsen extract werd bepaald door colorimetrie zoals beschreven in Watanabe & Olsen (1965). De absorptie van het gekleurd complex werd opgemeten bij 890 nm door een spectrofotometer met een padlengte van 1 cm.

Voor de DGT-methode (diffusieve gradiënt in dunne film techniek) werd 4-5 g bodem gesatureerd met gedestilleerd water (glinsteren van het water op het bodemoppervlak), en overnacht geïncubeerd op 20°C. De volgende dag werd de bodem uitgesmeerd op de DGT eenheid (DGT Research Ltd, DGT eenheid voor P, oppervlakte 3,14 cm<sup>2</sup>) en afgedekt met een parafilm om een optimaal contact te verzekeren. De contacttijd tussen de bodem en de DGT eenheid varieerde om saturatie van de DGT te vermijden, maar ook om voldoende hoge P-concentraties boven de detectielimiet te garanderen. Afhankelijk van de P-CaCl<sub>2</sub> concentratie werd de contacttijd geschat (4h: P-CaCl<sub>2</sub> > 4,4 mg P kg<sup>-1</sup>, 24h: 0,8 < P-CaCl<sub>2</sub> < 4,4 mg P kg<sup>-1</sup> or 48h: P-CaCl<sub>2</sub> < 0,8 mg P kg<sup>-1</sup>). Hierna werden de DGT eenheden ontmanteld en de ferrihydriet gel werd geëluëerd in 1 mL 1M HCl gedurende minstens 24u. De P-concentratie in het eluens werd opgemeten met ICP-OES. De P-DGT concentratie (g L<sup>-1</sup>) werd berekend met behulp van de standaard DGT formules beschreven in Zhang et al. (1998).

De fosfaatverzadigingsgraad (FVG,%) werd berekend aan de hand van Vergelijking (1)

$$FVG (\%) = \frac{100 * P - Ox}{FBV}, \quad (1)$$

waarbij P-ox het oxalaat extraheerbare P (mmol kg<sup>-1</sup>) is en FBV het fosfaatbindend vermogen (mmol kg<sup>-1</sup>). Deze laatste wordt berekend als de helft van de som van het oxalaat extraheerbaar Fe (Fe-Ox) en het oxalaat extraheerbaar Al (Al-Ox).

### *Plantanalyse*

De plantstalen werden gedurende 72u gedroogd op 70°C. De plantbiomassa werd bepaald voor en na drogen. Voor de plantanalyse werd 0.5 g van het gedroogde en gemalen plantmateriaal verast gedurende 6u op 450°C. Na afkoelen werd 20 ml van 7M HNO<sub>3</sub> toegevoegd aan de assen en ultrapuur water werd toegevoegd om een totaal volume van 50 mL te bekomen. Gedurende 50 minuten werd deze oplossing opgewarmd in een warm water bad bij 90°C waarna ze gefilterd werd over filterpapier. Element-analyse werd uitgevoerd via ICP-OES.

Tabel 27: Samenvatting van de protocols voor de bodemtesten

Bodem P test		Maat voor	Extractie	Bodem-	Extractietijd	Fasescheiding	P analyse	Referentie
Volledige naam	Afkorting	capaciteit - intensiteit	oplossing	vloeistof ratio (g/ml)	(min)			
<b>Oxalaat extraheerbaar P</b>	P-ox	Capaciteit	0.2 M (COONH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 0.14 M (COOH) <sub>2</sub> ± pH 3	1:20	120	2.5 µm filtratie	ICP-OES	(Schwertmann, 1964)
<b>Ammonium lactaat extraheerbaar P</b>	P-AL	Capaciteit	0.1 M NH <sub>4</sub> -lactaat 0.4 M azijnzuur pH 3.75	1:20	240	Centrifugeren 10 min bij 1830 g	ICP-OES	(Egnér et al. 1960, Goetelen et al. 2011)
<b>Natriumbicarbonaat extraheerbaar P</b>	P-Olsen	Capaciteit	0.5 M NaHCO <sub>3</sub> , pH 8.5	1:20	30	Centrifugeren 10 min bij 1830 g	Colorimetrie	(Olsen et al. 1954, Watanabe & Olsen 1965)
<b>Calcium chloride extraheerbaar P</b>	P-CaCl <sub>2</sub>	Intensiteit	0.01 M CaCl <sub>2</sub>	1:10	120	Centrifugeren 10 min bij 1830 g	ICP-OES	(Houba, Temminghoff, Gaikhorst, & van Vark, 2000)
<b>Diffusieve gradiënt in dunne film techniek</b>	P-DGT	Intensiteit	Bindingsgel op basis van ferrihydriet	saturatie	2u-48u	Diffusie doorheen een 0.45 µm membraan	ICP-OES	(Zhang et al. 1998, Mason et al. 2005)
<b>Fosfaatverzadigingsgraad</b>	P-FVG	Intensiteit obv capaciteit	0.2 M (COONH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 0.14 M (COOH) <sub>2</sub> ± pH 3	1:20	120	22.5 µm filtratie	ICP-OES	(Van Der Zee, van Riemsdijk, & De Haan, 1990)



## Statistische analyse

Data-analyse werd uitgevoerd met het statistische programma JMP PRO 12. De relatieve opbrengst (RO, opbrengst van de -P behandeling relatief ten opzichte van de gemiddelde opbrengst van de +P behandeling, %) werd geplot in functie van het beschikbare P voor elke test (Ptest) en een Mitscherlich model werd gefit via niet lineaire regressie door de data,

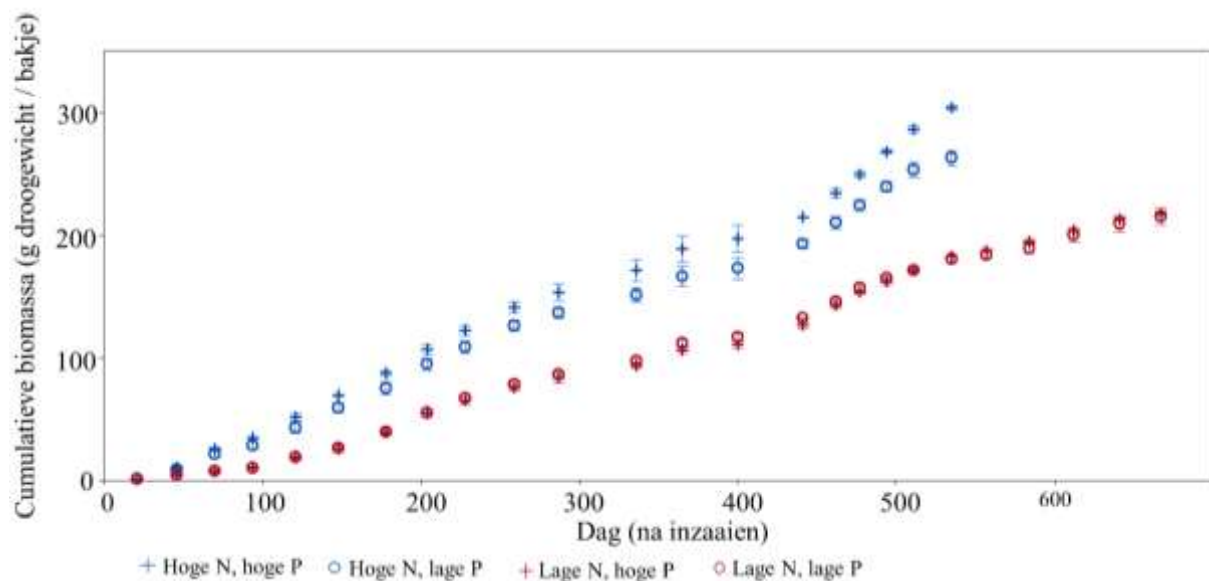
$$RO (\%) = b0 + (100 - b0) * (1 - \exp(-b1 * Ptest)),$$

waarbij  $b0$  de RO bij  $Ptest = 0$  is en  $b1$  de helling van het model. De maximale opbrengst (100%) wordt asymptotisch benaderd bij stijgende  $Ptest$ -waarden; bij  $Ptest = 1/b1$ , is de RO  $b0 + 0.63(100 - b0)\%$ . Zowel de Michaelis-Menten kinetiek als het Mitscherlich model werden gefit op de data van de relatieve opbrengst in functie van  $Ptest$ . Uit praktische overwegingen, en omdat het Mitscherlich type model alom gebruikt wordt in de literatuur (Colomb et al., 2007; Poulton et al., 2013; Six et al., 2013), werd voor dit model gekozen. De  $R^2$  van de fit werd bepaald door de voorspelde RO uit te zetten ten opzichte van de waargenomen RO.

## 5.3 RESULTATEN

### Cumulatieve biomassa

In Figuur 15 wordt de cumulatieve biomassa (g droge stof/bakje) in functie van de tijd voor bodem 7 weergegeven. Dit is de totale biomassa per bakje, berekend als som van de drooggewichten van het gras per bak van alle oogsten. In de figuur is duidelijk te zien dat na het herinzaaien op dag 400 de cumulatieve biomassa sneller stijgt dan voordien. Dit heeft echter geen invloed op de finale dataverwerking waar men geïnteresseerd is in het eindresultaat, namelijk een P uitgemijnde bodem, en waar de snelheid van uitmijnen dus niet van belang is.



Figuur 15. Cumulatieve biomassa-productie (droge stof per bak), d.i. de totale biomassa per bakje, berekend als som van de drooggewichten van het gras per bak van alle oogsten, in functie van de tijd per behandeling voor bodem 7. Een gemiddelde waarde wordt weergegeven, Foutenbalken geven de standaarddeviatie weer. De +N behandeling werd stopgezet op dag 535, de -N behandeling op dag 667. Oppervlakte bakje = 1558 cm<sup>2</sup>. Een biomassa van 100 g droge stof/bakje komt overeen met 6,4 ton droge stof/ha.

In Tabel 28 wordt de finale cumulatieve biomassa (g droge stof/bakje) weergegeven per bodem en per behandeling, d.i. na 535 dagen voor de +N behandelingen, en op dag 667 voor de -N behandeling. Verschil in groei tussen de behandelingen werd voornamelijk bepaald door stikstof. Hoge N-behandelingen hebben een aanzienlijk hogere biomassa-productie. Het effect van N is significant voor

alle bodems. Ondanks het feit dat de lage N behandelingen 100 dagen extra hebben kunnen groeien, ligt hun cumulatieve biomassa nog steeds lager dan deze van de hoge N behandelingen (uitgezonderd bodem 3). Cumulatieve biomassa's van de -P behandeling die statistisch significant kleiner ( $p < 0,05$ ) zijn dan deze van de +P behandeling worden aangeduid met een \* in Tabel 28.

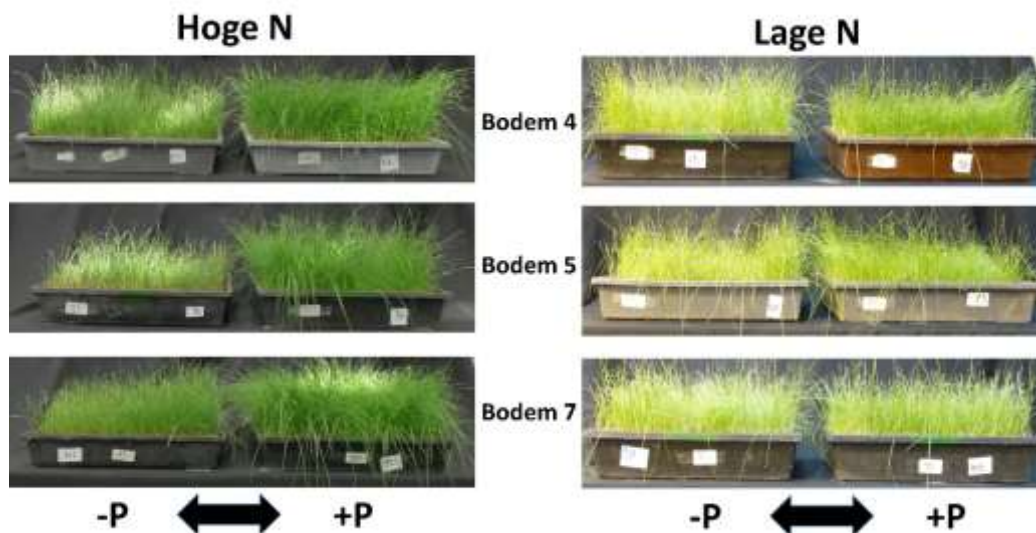
Tabel 28. Cumulatieve biomassa (g drooggewicht/bakje), d.i. de totale biomassa per bakje, berekend als som van de drooggewichten van het gras per bak van alle oogsten per bodem op dag 535 voor de +N behandeling en op dag 667 voor de -N behandeling. Oppervlakte bakje = 1558 cm<sup>2</sup>. Een biomassa van 100 g droge stof/bakje komt overeen met 6,4 ton droge stof/ha. \* = de cumulatieve biomassa in de -P behandeling is statistische significant kleiner dan de cumulatieve biomassa in de +P behandeling.

Behandeling/Bodem	1	2	3	4	5	6	7	8
Lage N, lage P (dag 667)	211	214	196	215	174	186	215	193*
Lage N, hoge P (dag 667)	210	216	200	221	185	195	218	215
Hoge N, lage P (dag 535)	303	280*	287	258*	203*	228*	263*	233*
Hoge N, hoge P (dag 535)	317	290	292	292	222	242	304	257
P-AL initieel mg/kg (dag 0)	310	280	120	150	200	110	120	150

De gemiddelde grasopbrengst in het veld varieert tussen 10-15 ton/ha/jr. Voor het opstellen van het MAP4 (2011-2014) werd een gemiddelde waarde van 11,2 ton/ha/jr vastgelegd. Voor de hoge N behandeling is de gemiddelde cumulatieve opbrengst 267 g biomassa/bakje na 535 dagen groei. Rekening houdend met een oppervlak van 1558 cm<sup>2</sup> geeft dit een totale opbrengst van 17,1 ton/ha of 11,6 ton/ha/jaar. Voor de -N behandeling was de totale cumulatieve opbrengst na 667 dagen gemiddeld 204 g biomassa/bakje, hetgeen overeenkomt met een totale opbrengst van 13,1 ton/ha of 7,1 ton/ha/jaar. Voor de +N behandeling werd dus een zelfde opbrengst behaald als in het veld. Er is echter nog steeds sprake van een versnelde P-onttrekking in vergelijking met veldcondities aangezien P enkel onttrokken kon worden uit 5 cm bodem.

#### *Relatieve opbrengst en %P plant*

Opbrengstverschillen tussen de P behandelingen bij het afsluiten van de depletieproef worden weergegeven in Figuur 16. Na 535 dagen was er in de hoge N behandeling een duidelijk opbrengstverschil waarneembaar tussen de lage P en de hoge P behandeling, terwijl de opbrengstverschillen voor de lage N behandeling op dag 667 eerder beperkt waren. De lichtere kleur van het gras in de -N behandeling in vergelijking met de +N behandeling is deels te verklaren door het verschil in N, maar is in dit geval voornamelijk te wijten aan een verschillende lichtinval bij het nemen van de foto's.



Figuur 16: Opbrengstverschil tussen de - P en +P behandeling voor bodem 4, 5 en 7 na 535 dagen.

In Tabel 29 wordt de relatieve opbrengst (RO) en het %P in het gras bij het afsluiten van de potproef (dag 535 voor +N en dag 667 voor -N) weergegeven. De relatieve opbrengst wordt berekend als de biomassa in de lage P behandeling gedeeld door de gemiddelde biomassa in de hoge P behandeling, en dit door de biomassa van de twee laatste oogsten te combineren om zo variatie te reduceren. Opbrengstverschillen (als een combinatie van de twee laatste oogsten) tussen +P en -P zijn statistisch significant verschillend voor bodem 2, 4, 5, 6 en 7 bij het afsluiten van de +N behandeling. Bij de -N behandeling is voor geen enkele bodem de opbrengst in de -P statistisch significant kleiner dan in de +P. Daarentegen is het %P in het gras statistisch significant kleiner in de -P behandeling ten opzichte van de +P behandeling voor alle bodems en N behandelingen. Bij beide N behandelingen is  $RO > 100$  (statistisch significant) bij bodem 3.

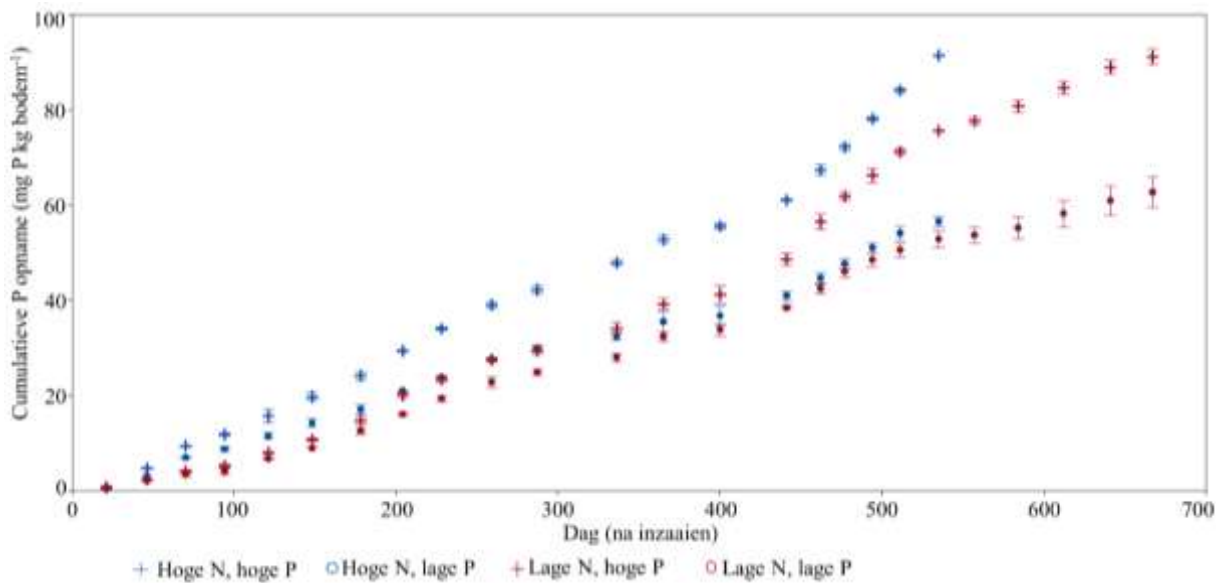
Het %P in het gras van de -P behandeling is hoger in de -N dan in de +N behandeling. Dit illustreert het effect van groeiverdunning, snellere groei in de +N dan in de -N leidt tot groeiverdunning.

Tabel 29. Relatieve opbrengst en %P in het gras per bodem bij het afsluiten van de potproef (dag 535 voor +N en dag 667 voor -N). De relatieve opbrengst werd berekend op basis van de biomassa van de laatste twee oogsten voor afsluiten om variaties te reduceren. \* = de opbrengst (als combinatie van de twee laatste oogsten)/%P plant in de -P behandeling (geen P-bemesting) is statistisch significant verschillend dan deze in de +P behandeling (onderhoudsbemesting voor P). De weergegeven P-AL waarde is de initiële waarde, d.i. het bodemfosforgehalte op dag 0.

Bodem	+N			-N			Initiële P-AL (mg/kg)
	Relatieve opbrengst	%P plant		Relatieve opbrengst	%P plant		
	(%)	+P	-P	(%)	+P	-P	
1	84 ± 21	0,47*	0,22	104 ± 16	0,56*	0,43	310
2	81 ± 3*	0,46*	0,25	100 ± 18	0,56*	0,34	280
3	126 ± 12	0,45*	0,24	115 ± 3*	0,55*	0,30	120
4	64 ± 4*	0,37*	0,21	104 ± 7	0,39*	0,28	150
5	38 ± 1*	0,39*	0,21	98 ± 0,7	0,67*	0,36	200
6	70 ± 1*	0,37*	0,23	74 ± 10	0,54*	0,26	110
7	66 ± 5*	0,38*	0,23	106 ± 7	0,43*	0,28	120
8	62 ± 21	0,40*	0,19	79 ± 4	0,51*	0,25	150

### Cumulatieve P-opname

Figuur 17 geeft de cumulatieve P-opname (=biomassa vermenigvuldigd met %P in de plant) in functie van de tijd voor bodem 7. In Tabel 30 wordt de cumulatieve P-opname weergegeven per bodem op dag 535 voor de +N behandeling en op dag 667 voor de –N behandeling. Ter vergelijking van de N behandelingen wordt ook de cumulatieve P-opname voor de –N behandeling weergegeven op dag 535. Uit Tabel 28 was reeds duidelijk dat zelfs bij langere looptijd (667 in plaats van 535 dagen) de cumulatieve biomassa bij afsluiting van de –N behandeling steeds lager is dan bij de +N behandeling. Bij de –P behandeling is het effect van N op P-opname kleiner dan het effect van N op de biomassa bij de -P behandeling. Dit is het effect van de groeiverdunning: snellere groei (+N) verlaagt het gehalte P in het gewas bij laag P-aanbod. Dat de cumulatieve P-opname quasi gelijk loopt voor beide N-behandelingen wijst erop dat de opname van P in de bodem gecontroleerd wordt door de maximale vrijzettingssnelheid van P door de bodem eerder dan door de vraag van de plant.



Figuur 17. Cumulatieve P-opname door de plant (mg P/kg bodem), van bodem 7. De foutenbalken geven de standaarddeviatie weer.

Tabel 30. Gemiddelde cumulatieve P-opname (mg P/kg bodem) per bodem, op dag 535 voor alle behandelingen en op dag 667 voor de lage N behandeling.

Dag	Behandeling/Bodem	1	2	3	4	5	6	7	8
535	Hoge N, hoge P	133	126	117	114	89	78	91	106
535	Hoge N, lage P	88	87	87	63	60	62	57	73
535	Lage N, hoge P	81	99	76	80	74	76	76	90
535	Lage N, lage P	76	75	60	80	55	49	53	61
667	Lage N, hoge P	101	118	90	95	95	96	91	112
667	Lage N, lage P	95	87	70	91	66	58	63	70
	P-AL initieel mg/kg	310	280	120	150	200	110	120	150

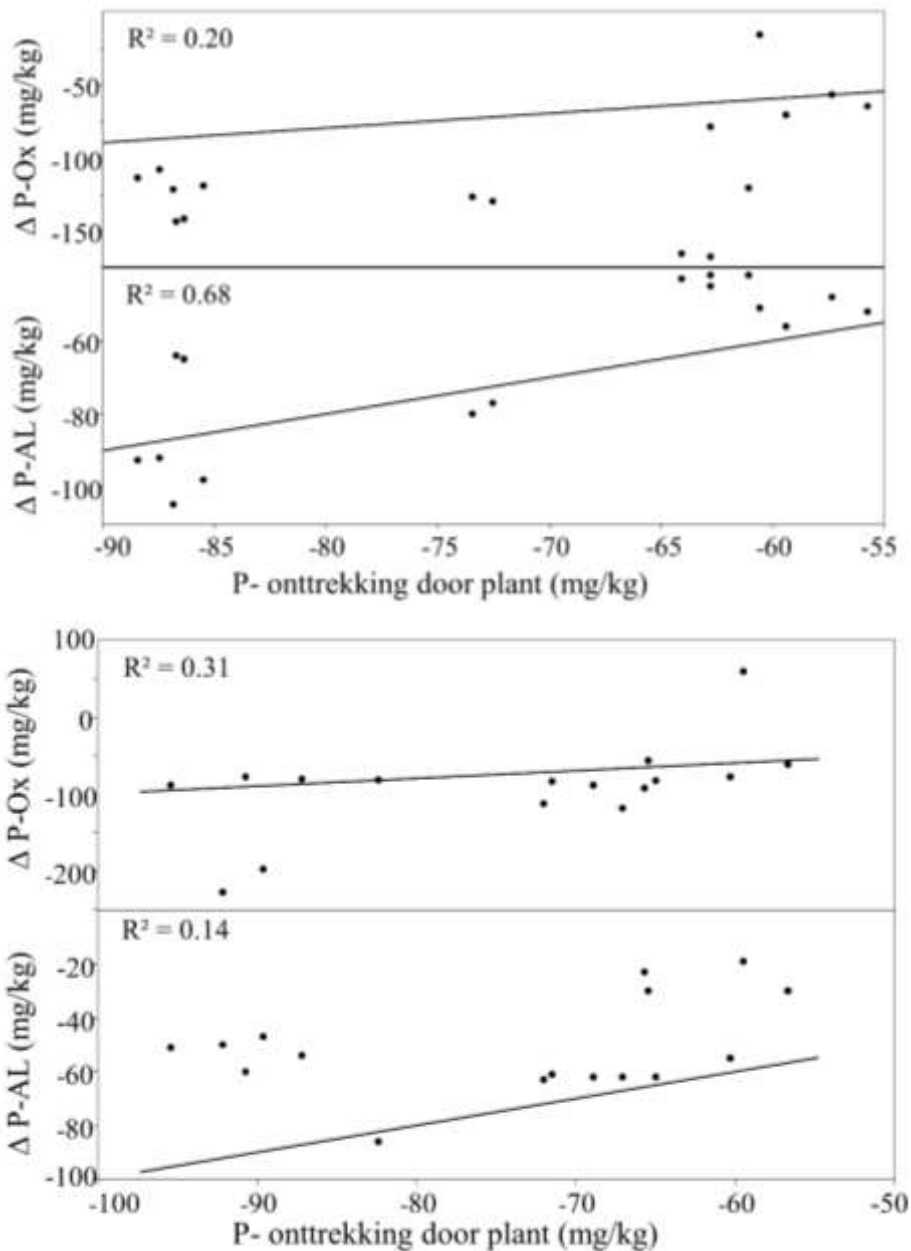
### *Bodem-P-testen en de P-balans*

In Tabel 31 wordt het verschil in bodem-P-testwaarden weergegeven tussen de initiële en finale bodemstalen van de -P behandeling ( $\Delta P$ ). Ter vergelijking wordt ook de cumulatieve P-opname door de plant weergegeven in mg/kg bodem. Een tweezijdige hypothesetoets ( $p < 0,05$ ) werd uitgevoerd om na te gaan voor welke test (P-ox, P-AL en P-Olsen)  $\Delta P$  het best overeenkomt met de cumulatieve P-opname, m.a.w. voor welk van de bodemtesten de nutriëntenbalans klopt. Voor de +N behandeling komt de verandering in P-AL testwaarden tussen het begin en het einde van de proef overeen met de cumulatieve P-opname (de waarden zijn niet statistisch significant verschillend), terwijl voor de -N behandeling zowel de  $\Delta P$ -ox als de  $\Delta P$ -AL de cumulatieve P-opname benaderen. Dit is weergegeven in Figuur 18 waar de  $\Delta P$  uitgedrukt staat ten opzichte van de P onttrokken door de plant. De hoogste  $R^2$  (0,68) wordt waargenomen voor de +N behandeling en de P-AL extractie. De andere  $R^2$  zijn vrij laag maar  $\Delta P$  zijn over het algemeen niet verschillend van de cumulatieve P-opname. De  $\Delta P$ -Olsen is steeds kleiner dan de opname, m.a.w. de P-Olsen is een momentopname van beschikbaar P, bij opname wordt de P-Olsen aangevuld door andere vormen van P in de bodem.

Voor de +N behandeling is de absolute waarde van de daling van het gehalte beschikbaar P gemeten met de oxalaat-extractie meestal hoger dan wat er door het gras werd onttrokken. Dit is geen analytische fout omdat er steeds referentiestalen werden meegenomen in de analyse om zo de juistheid en de reproduceerbaarheid van de analyses te controleren. Het kan te maken hebben met de opname in de wortels (maar een fractie ingesloten in het bodemstaal) en met een daling in de extraheerbaarheid van P bij dalend gehalte beschikbaar P, m.a.w. een fractie van het oorspronkelijk beschikbaar P wordt niet meer extraheerbaar na uitmijning. In een uitmijningsexperiment uitgevoerd door Schelfhout et al. (2015), daalde het beschikbare P (gemeten als P-Olsen) in een uitmijningsexperiment meer dan de hoeveelheid P die verwijderd werd door de biomassa, hetgeen eenzelfde trend aanwijst. Echter, bij onze resultaten werd dit enkel waargenomen bij de oxalaatextractie, die de grootste hoeveelheid P extraheert van de bodem, en niet bij de Olsen extractie. Vermoedelijk is bij de analyse van de -N behandeling iets misgegaan bij de P-ox analyse van bodem 6 en de P-Olsen analyse van bodem 1 aangezien de bodembalans bij de -P behandeling quasi gelijk is aan nul.

Tabel 31. Gemiddeld verschil in bodem-P testwaarden tussen de initiële en de finale bodemstalen van de - P behandeling, alsook de gemiddelde cumulatieve P-opname per bodem voor deze behandeling. \* = ΔP is statistisch significant verschillend van de cumulatieve P opname (2-zijdige hypothesetoets p< 0,05; niet uitgevoerd voor DGT en FVG omwille van de verschillende eenheden).

Bodem	N	Δ P-ox mg/kg	Δ P-AL mg/kg	Δ P-Olsen mg/kg	Δ P-CaCl <sub>2</sub> mg/kg	Δ P-DGT μg/L	Δ P-FVG %	Cumulatieve P opname mg/kg bodem
1	+	-120*	-99	-17*	-1,6*	-140	-13	88
2	+	-110*	-95	-35*	-1,7*	-120	-13	87
3	+	-140*	-65*	-19*	-0,69*	-37	-5,9	87
4	+	-170*	-44*	-13*	-0,06*	18	-3,5	63
5	+	-44	-54	-16	-1,8*	-44	-15	60
6	+	-100	-42*	-9,0*	-0,06*	-17	-2,8	62
7	+	-61	-50	-25*	-1,2*	-67	-7,9	57
8	+	-130*	-79	-29*	-1,5*	-48	-7,0	73
1	-	-85	-53*	-1,8*	-0,48*	-92	-8,8	91
2	-	-80	-73	-34*	-2,2*	-160	-11	87
3	-	-87*	-62*	-16*	-0,78*	-26	-4,9	70
4	-	-210*	-49*	-13*	-0,65*	-24	-3,4	91
5	-	-75	-27*	-9,5*	-2,8*	-98	-16	66
6	-	-1,5	-25*	-9,1*	-0,69*	-45	-0,5	58
7	-	-81*	-59	-23*	-1,3*	-74	-9,8	63
8	-	-120*	-63	-22*	-2,0*	-59	-5,0	70



Figuur 18. Bodem P-balans voor de ammoniumlactaat – en de oxalaatextractie in functie van de hoeveelheid P onttrokken door de plant. Boven = +N behandeling, onder = -N behandeling. In de figuur worden de individuele datapunten weergegeven, de volle lijn geeft de 1:1 lijn weer

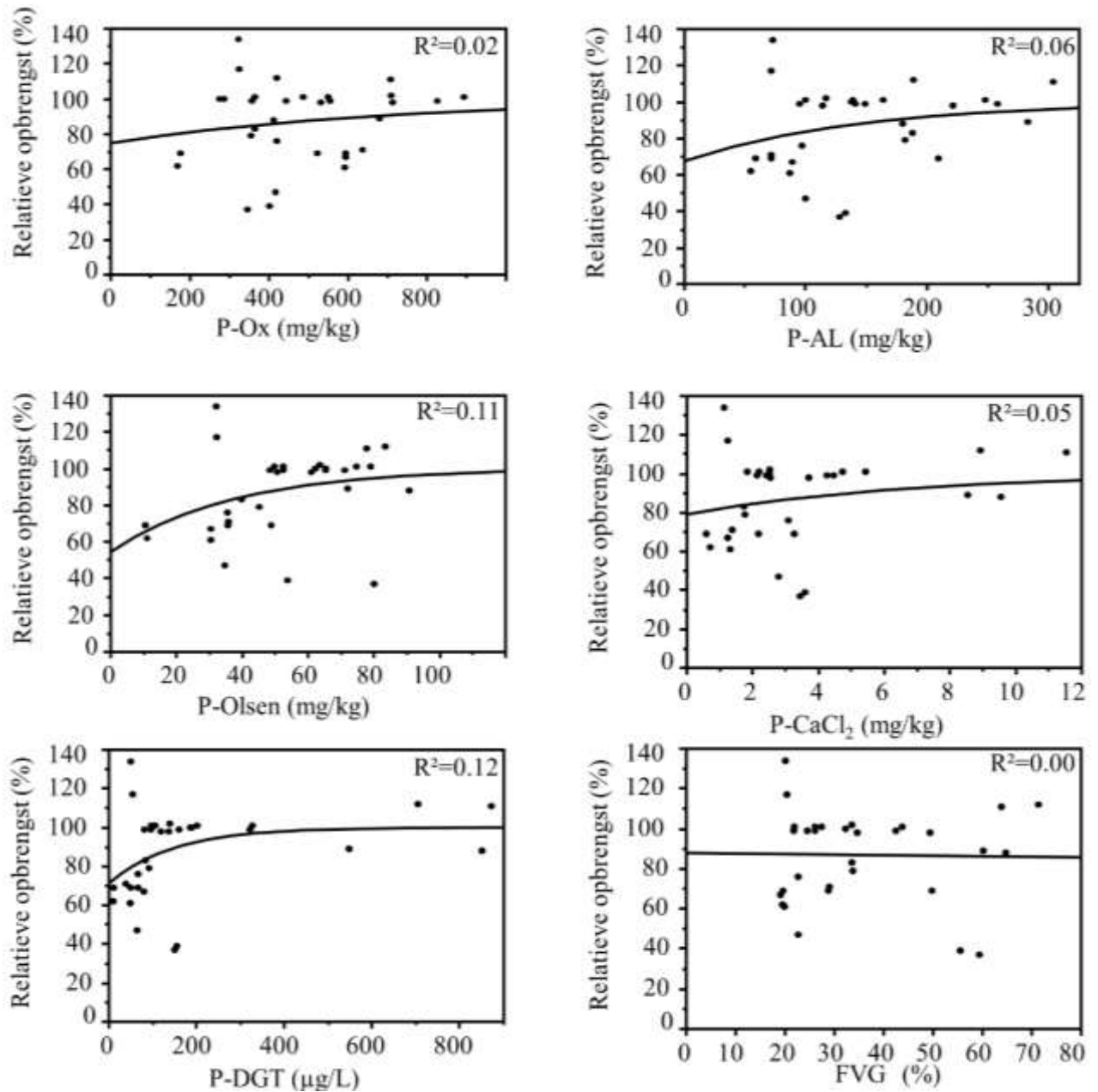
## 5.4 EVALUATIE BODEM-P-TESTEN - POTPROEF

### Relatieve opbrengst in functie van bodem P gehalte

In Figuur 19 wordt de relatieve opbrengst voor de +N behandeling weergegeven in functie van de bodem-P-testwaarden gemeten met de verschillende bodem-P-testen, waarbij de lijn het gefitte Mitscherlich model is. Er werd verkozen om de data van de -N behandeling niet mee op te nemen in deze analyse aangezien voor deze behandeling de opbrengst van de -P behandeling nooit statistisch significant kleiner was dan deze van de +P behandeling en de plot van de RO in functie van de bodem-P-testwaarden een puntenwolk oplevert. Voor de P-CaCl<sub>2</sub> extractie en de P-DGT kan visueel een bodem-P-gehalte bepaald worden waarboven de opbrengst >80% (voor de andere testen wordt er bij hoog bodem-P-gehalte nog steeds opbrengsten <80% waargenomen). Deze is 3,5 mg/kg voor de CaCl<sub>2</sub> extractie en 160 µg/l voor de DGT techniek. De  $R^2$  van de modelfit ligt laag ( $R^2 \leq 0.12$ ), de fouten op de



voorspelde helling (parameter b1) zijn groot voor al de testen (53-135%) en voor de fosforverzadigingsgraad wordt zelfs een negatieve helling waargenomen. Deze data-analyse laat dus niet toe om voorspellingen te maken van kritische fosforgehalten en om conclusies te maken betreffende welke P beschikbaarheidstest het best het plant beschikbare P kwantificeert in een uitmijningsscenario.



Figuur 19. Relatieve opbrengst in functie van de bodem P testwaarden gemeten met de verschillende testen voor de +N behandeling op de finale bodemstalen (dag 535). De punten zijn individuele observaties, de lijnen zijn de fits van het Mitscherlichmodel.

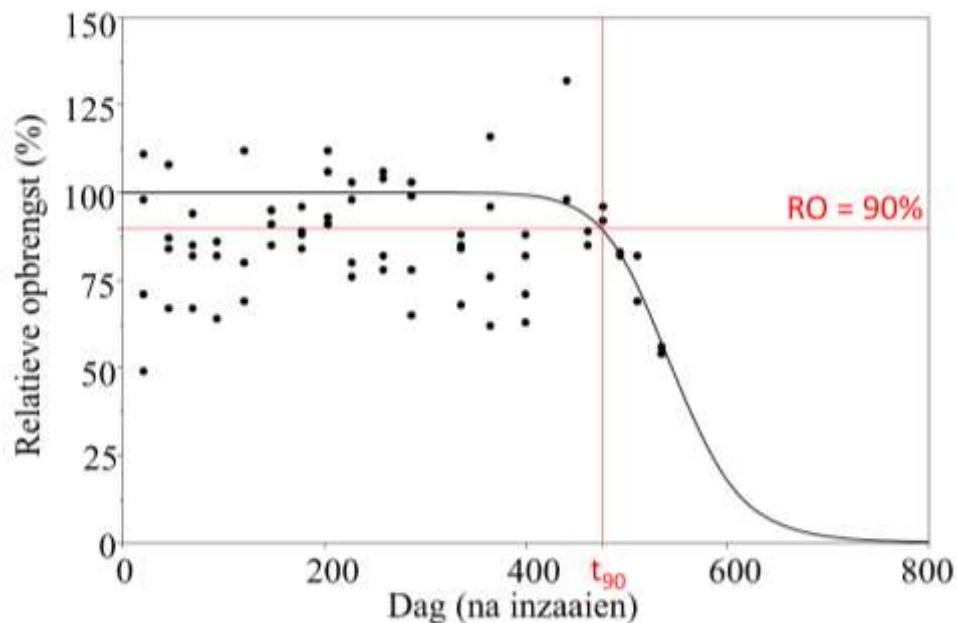
### De kritische voorraad beschikbaar P in de bodem

Aangezien via de Mitscherlich-analyse niet geconcludeerd kon worden welke bodem-P-test het best het plant beschikbare P kwantificeert in een uitmijningsscenario, werd een andere aanpak onderzocht, namelijk zoeken naar de tijd en de bijhorende opgenomen hoeveelheid P waarboven de opbrengst scherp begint te dalen door P-gebrek. De relatieve opbrengst RO van het gras werd voor elke oogst (niet cumulatief) uitgezet in functie van de tijd voor de -P behandeling per bodem en per N behandeling, en op deze data werd volgend model gefit:

$$RO (\%) = \frac{100}{1 + \left(\frac{t}{t_{50}}\right)^n}$$

Waarbij  $t_{50}$  het tijdstip is waar een RO van 50% bereikt wordt, en  $n$  de helling van de functie bepaalt. Hoe groter  $n$ , hoe langer het duurt voor RO afneemt, maar hoe groter de helling van de afname in RO. De analyse werd enkel op de -P behandeling uitgevoerd aangezien de RO van de +P behandeling niet daalt in de tijd. Via de gefitte vergelijking werd  $t_{90}$  bepaald, dit is het tijdstip waarop een RO van 90% gehaald wordt. Dit is conceptueel weergegeven in Figuur 20 voor bodem 7. Er werd gekozen voor een RO van 90% (niet 95% zoals voor de veldproeven in luik 2) omdat toevallige kleine fluctuaties in de tijd gemakkelijk minder dan 95% RO kunnen bedragen. Er zijn slechts twee herhalingen per bodem en dan zit 95% in de ruis. Bovendien wordt hier een andere benadering toegepast dan in luik 2 wegens het gebrek aan goede modelfit op de data van RO versus bodem-P-test (zie hierboven).

Vervolgens werd de kritische cumulatieve P-opname bepaald (CCP), die gedefinieerd wordt als de cumulatieve P opname op  $t_{90}$  in de -P behandeling, d.i. de cumulatieve P opname op het moment dat er een RO van 90% is, via een interpolatie van de cumulatieve P opname tussen twee oogsten. Deze CCP werd vervolgens uitgezet in functie van de initiële bodem P testwaarden.



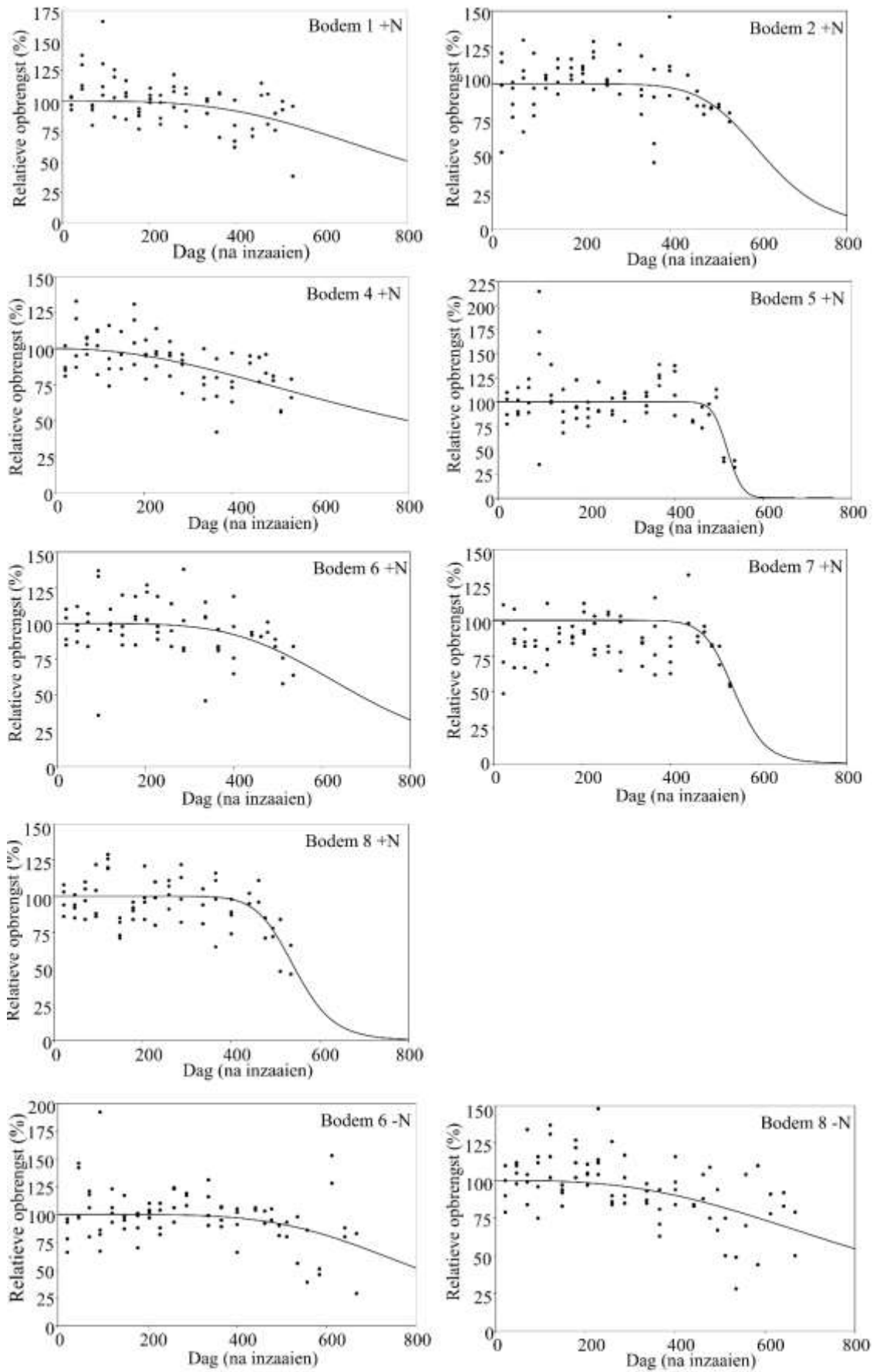
Figuur 20: Relatieve opbrengst in functie van de tijd voor de +N-P behandeling van bodem 7. De volle lijn geeft de modelfit weer. Het tijdstip waarop de RO = 90% wordt gedefinieerd als  $t_{90}$ .

De relatieve opbrengst in functie van de tijd en de modelfit worden weergegeven in Figuur 21, de modelparameters, de  $t_{90}$  en de CCP worden weergegeven in Tabel 32. Het model kon gefit worden voor alle bodems van de +N behandeling (uitgezonderd bodem 3), en voor bodem 6 en bodem 8 van de -N behandeling. Vermoedelijk werd voor de andere data geen fit bekomen doordat de RO niet voldoende daalde in functie van de tijd. De kritische cumulatieve P-opnamen (CCP) verschillen een factor 2 tussen de verschillende bodems.

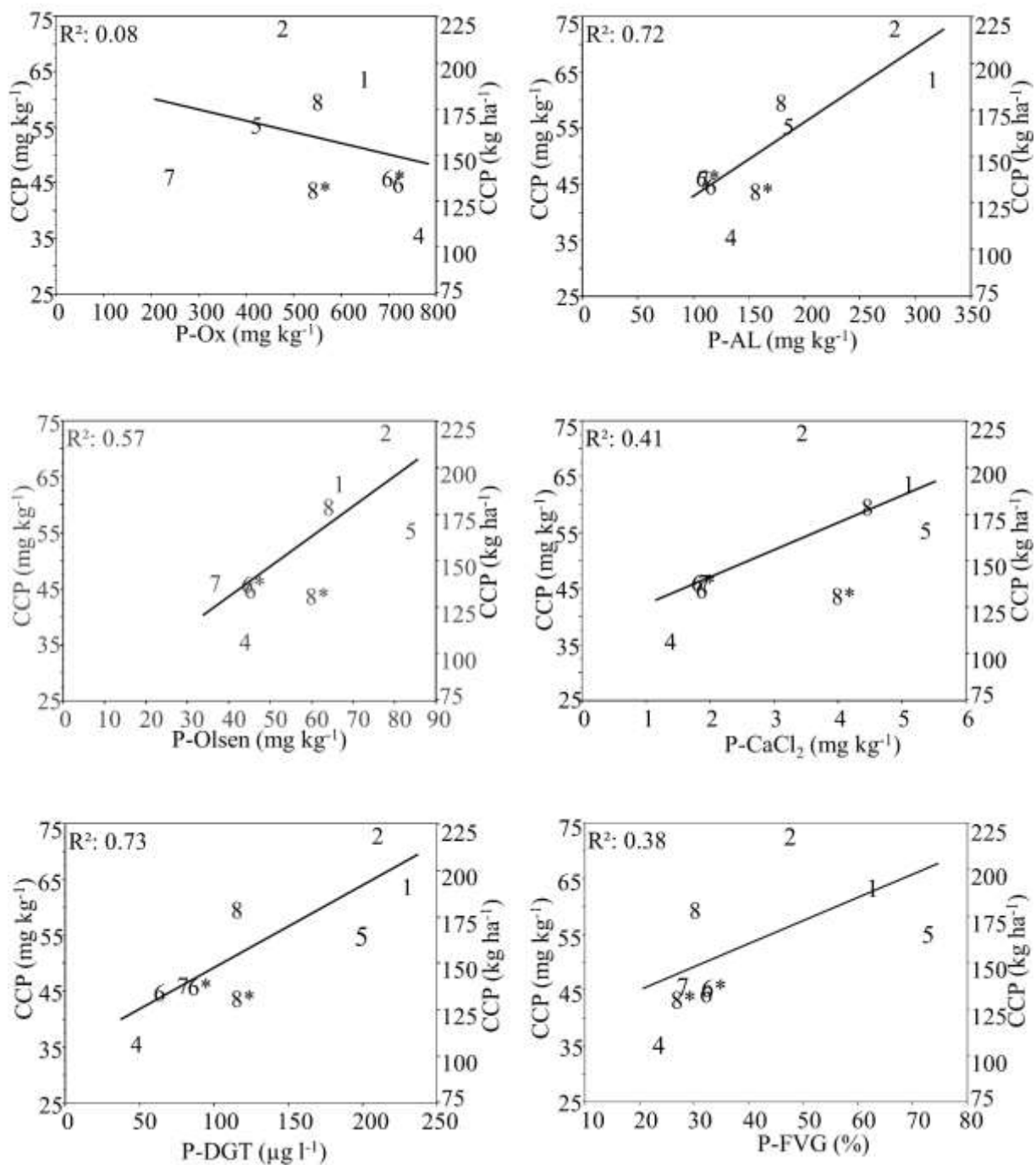
Tabel 32: Modelparameters voor de fit van de relatieve opbrengst in functie van de tijd, alsook de  $t_{90}$  en de kritische cumulatieve P-opname (CCP).

Bodem	N	n	$t_{90}$ (dag)	CCP (mg/kg)
1	+	$3.5 \pm 2.4$	$429 \pm 51$	65
2	+	$8.4 \pm 6.3$	$472 \pm 32$	74
4	+	$2.1 \pm 0.68$	$288 \pm 40$	37
5	+	$32 \pm 17$	$484 \pm 17$	56
6	+	$4.6 \pm 2.8$	$425 \pm 43$	46
7	+	$16 \pm 8.3$	$474 \pm 23$	47
8	+	$12 \pm 4.5$	$456 \pm 20$	61
6	-	$4.8 \pm 3.2$	$514 \pm 64$	47
8	-	$2.9 \pm 1.1$	$402 \pm 54$	45

De CCP is uitgezet ten opzichte van de initiële bodem-P-testwaarden in Figuur 22, waarbij de –N behandelingen worden aangeduid met een \*. Ter herinnering: CCP is de cumulatieve P-opname op het moment dat de relatieve opbrengst van de individuele oogsten van de –P-behandeling dalen onder 90%. De hoogste  $R^2$  wordt bekomen voor P-AL en P-DGT. Wanneer men kijkt naar de absolute CCP-waarden, dan wordt opgemerkt dat voor bodems met een initiële hoge P-AL waarde (vb. bodem 1: P-AL = 314 mg/kg en CCP = 65 mg/kg) de CCP niet proportioneel hoger ligt dan voor andere bodems die een lagere P-AL hebben (vb. bodem 6: P-AL = 110 mg/kg en CCP = 46). Dit impliceert dat de relatieve opbrengst al daalt tot 90% bij een hoge bodem P-AL waarde. Wanneer een RO van 90% bereikt voor bodem 1 is er namelijk nog 249 mg/kg (=314-65 mg/kg) in de bodem. Voor de P-Olsen test wordt een nagenoeg 1:1 relatie teruggevonden tussen de CCP en de initiële bodem P testwaarden. Deze test zou dus op basis van zijn initiële bodem P gehalte goed kunnen voorspellen wanneer de RO onder de 90% daalt. Dit impliceert dat wanneer de balans gemaakt wordt, het P-Olsen gehalte van de bodem quasi nul zou moeten zijn wanneer een RO van 90% behaald wordt. Bijvoorbeeld voor bodem 1 +N is het initiële P-Olsen gehalte 66 mg/kg, en wanneer een RO van 90% bereikt wordt is er al 65 mg/kg P opgenomen door de plant. In praktijk echter daalt het P-Olsen gehalte niet tot 0, de P-Olsen onderschat dus het plant beschikbare P.



Figuur 21: Relatieve opbrengst in functie van de tijd voor de -P behandeling. De volle zwarte lijn geeft de modelfit weer.



Figuur 22: Kritische cumulatieve P opname (CCP) voor de -P behandeling per bodem in functie van de initiële bodem-P-testwaarden. \* = -N behandeling.

## 5.5 CONCLUSIE

Het doel van deze depletieproef was bepalen welke test het best het plant beschikbare P kwantificeert in een uitmijningsscenario. Geen enkele van de zes bodemtesten, toegepast op de bodemstalen op het eind van de uitmijning slaagde erin om de relatieve opbrengst (RO) te voorspellen. De totale

onttrekking van P door de plant, uitgedrukt als de cumulatieve P opname per eenheid bodemgewicht was in overeenstemming met de daling in P-ox en de P-AL tussen het begin en het einde van de uitmijning, m.a.w. de nutriëntenbalans klopt met die testen. Voor andere testen was de daling in het beschikbaar P kleiner dan de onttrekking, m.a.w. de twee eerste testen geven een correcter beeld dan de andere testen van de direct toegankelijke hoeveelheid. Het tijdstip vanaf wanneer de RO < 90% is varieerde tussen 288 en 514 dagen na inzaaien afhankelijk van het bodemtype en N-behandeling. De cumulatieve P opname op dat moment correleerde best met de P-AL en P-DGT. De combinatie van dit gegeven en het feit dat men met de P-AL waarden een correcte nutriëntenbalans kan maken, suggereert dat de P-AL test de meest zinvolle betekenis heeft in een uitmijningsscenario i.v.m. de andere testen.

Algemeen kan men besluiten dat de analyses op de depletieproef aantonen dat de kwantiteitstesten beter scoren. Bij het analyseren van de data moet er echter rekening mee gehouden worden dat de resultaten bekomen zijn in artificiële condities, i.e. in een uitmijningsproef in de serre op een bodemlaag van 5 cm.

## 6 DWP 1.3: GEWASRESPONS RELATEREN AAN BODEMFOSFORTESTEN MET BEHULP VAN BEMESTINGSPROEVEN IN OMLIGGENDE REGIO'S

### 6.1 INLEIDING

De selectie van de geschikte bodemtest(en) voor gewasrespons is niet enkel gebaseerd op het uitmijningsexperiment in de serre (deel 5), maar ook op bestaande veldproeven. Een vereiste voor deze veldproeven is dat er een duidelijke P-respons is om de drempels nauwkeurig te kunnen vaststellen. In Vlaanderen is er volgens onze informatie geen P-bemestingsproef waarbij de effecten van de bemesting op de opbrengst (P-respons) enkel toe te wijzen zijn aan fosfor. Daarom wordt de batterij testen (P-CaCl<sub>2</sub>, P-DGT, P-Olsen, P-ox, P-AL) geëvalueerd op bodemstalen afkomstig van bestaande lange termijn bemestingsproeven uit omliggende regio's.

### 6.2 MATERIAAL EN METHODEN

#### *Bodemstalen*

Gedurende 2015 werden 218 bodemstalen van verschillende lange-termijnexperimenten in Europa met variërende bodemkarakteristieken, klimaat en bemestingsgeschiedenis verzameld. De bodems waren afkomstig uit vijf verschillende landen en afkomstig van elf verschillende locaties: België (2), Frankrijk (3), het Verenigd Koninkrijk (4), Duitsland (1), Zweden (1). De experimenten zijn gelegen op bodems met variërende karakteristieken. Ze omvatten een brede range in pH (4.7-7.1) (gemeten in 0.01M CaCl<sub>2</sub>), bodemtextuur (zand-klei) en oxalaat-extraheerbaar ijzer en aluminium (Fe-Ox en Al-Ox, zie Tabel 33). In totaal gaat het over 33 verschillende proefvelden (Tabel 34). Een proefveld is gedefinieerd als een test van P op de groei van een gewas binnen hetzelfde jaar en voor dezelfde combinaties met andere bemesting. Wanneer dit werd gemeten bij twee verschillend N-K dosissen, zijn dit per definitie twee verschillende proefvelden. Op alle proefvelden werd de gewasgroei gemeten bij verschillende P-bemestingsdosissen waarbij P0 staat voor geen P input, P1 voor een P input die overeenkomt met de jaarlijkse P export door het gewas, P2 voor een P input die het dubbel is van P1, enz. Andere macro-en micronutriënten werden toegevoegd in voldoende hoeveelheden. Voor NPK factoriale experimenten werden enkel stalen genomen waarbij er een voldoende N&K bemesting was.

Voor elk bodemstaal werden de overeenkomstige opbrengstdata ter beschikking gesteld. Voor bepaalde proefvelden werden deze data aangevuld met deze van de omliggende jaren zodat meer gewassen konden worden opgenomen in de analyse. Hierbij werd er verondersteld dat de bodem P-inhoud slechts weinig varieerde tussen de omliggende jaren. De totale analyse werd zo uitgevoerd op 317 datapunten met opbrengstwaarden van tarwe, gerst, aardappel, suikerbiet, maïs en vlas.

De gewasopbrengsten bij de hoogste P-bemestingsdosis varieerden afhankelijk van het veld, het gewas en het jaar. Deze variatie werd weggewerkt door de opbrengstdata om te zetten naar relatieve opbrengst data, d.i. de opbrengst relatief ten opzichte van de overeenkomstige opbrengst van de plot met de hoogste P-bemestingsdosis. Deze laatste wordt de referentiebehandeling genoemd waarbij er een maximale opbrengst is (100% relatieve opbrengst). De 100% relatieve opbrengst (RO) werd berekend als het gemiddelde van de replica's van deze behandeling op een proefveld, tenzij anders gespecificeerd in de tekst.

Tabel 33: Bodemkarakteristieken van de lange-termijnexperimenten in Europa. Oxalaat-extraheerbaar ijzer (Fe-Ox), oxalaat-extraheerbaar aluminium (Al-Ox) en pH (gemeten in 10<sup>-2</sup>M CaCl<sub>2</sub>) werden berekend als het gemiddelde van alle bodemstalen op een locatie (gemeten in deze studie). Andere bodemkarakteristieken (korrelverdeling, organische stof (OM) werden bekomen van data die eerder in de literatuur gerapporteerd werden. Dit ter illustratie van de variatie in bodemkarakteristieken, de data komen echter niet noodzakelijk overeen met het jaar waarvan de bodemstalen geanalyseerd werden in deze studie.

Locatie	Fe-Ox / mg kg <sup>-1</sup>	Al-Ox / mg kg <sup>-1</sup>	pH <sup>3</sup>	Bodemtextuur	Klei / %	Zand / %	Leem / %	Gravel / %	OM / %	Referentie
Gembloux <sup>2</sup>	2511	742	5,9	Leem	18	4	78	n.d	1.7 <sup>1</sup>	Persoonlijke communicatie
Ath	2239	515	6,5	Leem	10	8	82	n.d		(Vanderdeelen et al., 1984)
Rostock	2008	637	5,8	Zandleem				n.d		
Carcarès Sainte Croix	1025	441	4,9	Zand	6	81	14	0	1.8	(Pellerin, Mollier, & Plénet, 2000)
Pierroton	270	547	4,7	Zand	5	93	2	0	2.2	(Denoroy et al., 2013), Pers communicatie
Toulouse	1374	656	6,9	Kleileem-klei	27	35	38	n.d	0.9	(Colomb, Debaeke, Jouany, & Nolot, 2007)
Peldon	3517	659	6,6	Kleileem	31	10	59	n.d	3.9	(Knight et al., 2014), Pers communicatie
Great Carlton	2391	598	6	Fijne leem	30	44	26	n.d	1.6	(Knight et al., 2014), Pers communicatie
Exhaustion Land	3006	1038	7,1	Zandige leem	20	28	52	n.d	n.d	Persoonlijke communicatie
Saxmundham	1615	631	7,1	Zandige kleileem	25	50	25	n.d	n.d	Persoonlijke communicatie
Lanna	3718	1097	5,9	Kleileem	47	6	46	1.3	4.4	(Bergström & Shirmohammadi, 1999)

<sup>1</sup> % C omgezet naar % OM door te vermenigvuldigen met een factor 1.6

<sup>2</sup> Korrelverdeling bepaald op twee van de 54 plots van het experiment, een gemiddelde waarde is gerapporteerd

<sup>3</sup> Gemiddelde pH van de bodemstalen gemeten in 0.01 M CaCl<sub>2</sub>, bodem:vloeistof ratio = 1:10

n.d. geen gegevens van deze bodemparameter teruggevonden in de literatuur



Tabel 34: Overzicht van de lange termijn P-responsvelden in Europa. Een beschrijving van de experimenten wordt verder in de tekst weergegeven. De relatieve opbrengst (RO) bij de P0 behandeling (nulbemesting voor P) wordt berekend als de ratio van de opbrengst bij de P0-behandeling op de opbrengst bij de hoogste P-behandeling. De Olsen P in de P0 (opgemeten in deze studie) is de gemiddelde waarde over alle P0-plots, tenzij anders weergegeven in de tekst.

Locatie	Proefvelden n <sup>1</sup>	Bodemtextuur	Start	Aantal P-behandelingen inclusief controle	Jaar van staalname <sup>2</sup>	Gewas	Olsen P in P0 / mg kg <sup>-1</sup>	Relatieve opbrengst bij P0 / %	Bodemstaal n
<b>Gembloux (België)</b>	5	Leem	1967	3	2015	Tarwe	16	95	18
					2014	Vlas	16	49	
					2013	Gerst	16	91	
					2012	Tarwe	16	98	
					2011	Suikerbiet	16	88	
<b>Ath (België)</b>	8	Leem	1965	5	1982	Tarwe	27	95	9
					1985	Tarwe	27	96	
					1980	Gerst	27	90	
					1981	Aardappel	27	58	
					1983	Gerst	27	95	
					1984	Suikerbiet	27	93	
					1986	Gerst	27	84	
					1987	Suikerbiet	27	98	
<b>Rostock (Duitsland)</b>	2	Zandleem	1998	geen compost: 2	2015	Maïs	27	90	16
				+ compost: 2			35	106	
<b>Carcarès Sainte Croix (Frankrijk)</b>	1	Zand	1972	6	2004	Maïs	21	92	24

<b>Pierroton (Frankrijk)</b>	1	Zand	1995	5	2015	Maïs	5.8	61	20
<b>Toulouse (Frankrijk)</b>	1	Kleileem - Klei	1968	4	2006	(Harde) Tarwe <sup>6</sup>	4.7	71	16
<b>Peldon<sup>3</sup> (VK)</b>	1	Kleileem	2009	18	2011	Tarwe	9.7	69	18
<b>Great Carlton<sup>3</sup> (VK)</b>	1	Fijne Leem	2009	18	2011	Tarwe	9.1	81	18
<b>Exhaustion Land (VK)<sup>4</sup></b>	10	Zandige leem	1986 (1856)	4 on 5 plots with different NPK history	1999 2008	Tarwe Tarwe	4.2 4.8	15-69 27-69	2x20
<b>Saxmundham (VK)<sup>5</sup></b>	2	Zandige kleileem	1899	18	1978 1982	Tarwe Tarwe	5.4 4.6	47 63	2x18
<b>Lanna (Zweden)</b>	1	Kleileem	1936	3	2013	Tarwe	8.1	73	3
<b>Totaal aantal</b>									
<b>11</b>	33					6			218

<sup>1</sup> Aantal gewas-jaar combinaties of plots met een verschillende behandeling/ bemestingsgeschiedenis per locatie

<sup>2</sup> Jaar van gepaarde bodem – gewas data, cursief gedrukte jaren geven jaren van gewas data weer voor dewelke geen bodemstalen geanalyseerd konden worden, en dewelke vervangen werden door bodemstalen van het dichtst aanliggende jaar in standaard lettertype.

<sup>3</sup> Het merendeel van de 18 plots op deze locatie werden bemest met een variabele hoeveelheid P om bodem-P-waarden (Olsen) tussen 10-25 mg P kg<sup>-1</sup> bodem te bekomen. Aangezien er geen replica's van de behandelingen bestaan op deze locatie, is de weergegeven Olsen P in de P0 deze van de plot met de laagste bodem-P-waarde.

<sup>4</sup> Vier P-behandelingen (P0, P1, P2 en P3) werden opgestart in 1986 op vijf plots met een verschillende achtergrondbemesting; de P-behandelingen werden gestopt in 1992. Vanaf 2000 werd P opnieuw jaarlijks toegevoegd als onderhoudsbemesting, d.i. equivalent aan de gewas P-opname, aan alle +P-

behandelingen. De P0 Olsen wordt weergegeven als een range van de bodem-P-waarde van de behandeling zonder P-toevoeging per achtergrondbemesting.. Ook de relatieve opbrengst wordt weergegeven als een range voor de vijf verschillende bemestingsgeschiedenissen.

<sup>5</sup> Jaren van staalname verschillen in N bemesting: 1978 (120 kg N ha<sup>-1</sup>) en 1982 (160 kg N ha<sup>-1</sup>). Olsen-P en relatieve opbrengst worden weergegeven voor de plot met de laagste bodem-P-waarde, omdat deze locatie geen replica's van de behandelingen heeft.

<sup>6</sup> Harde tarwe werd samen met de andere tarwe data geanalyseerd als één gewas.

## *Beschrijving lange termijn experimenten*

### Gembloux (België)

Dit proefveld is eigendom van het Landbouwkundig onderzoekscentrum van Wallonië (CRA-W) en bevindt zich in Wallonië. Sinds 1967 werden er negen behandelingen aangelegd op deze typische leembodem: 3 kalium bemestingsdosissen (K0, K1, K2) gecombineerd met 3 fosfor bemestingsdosissen (P0, P1 26.2 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>, P2). Elke behandeling werd zes keer herhaald in een volledig gerandomiseerd design. De initiële bodem-P-inhoud in 1968 was 176 mg P kg<sup>-1</sup> bodem (gemeten als P-AL), de huidige bodem-P in de P0-behandeling is 70 mg P kg<sup>-1</sup> bodem. Tot 2001 kreeg de P2-behandeling de dubbelde hoeveelheid bemesting van de P1-behandeling (52,4 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>). In 2002 werd de P2-behandeling omgezet naar een P1,5-behandeling (39,5 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>) dewelke de referentiebehandeling was (100% relatieve opbrengst). De gewassen worden geteeld in een 3-jaar rotatiesysteem: suikerbiet, zomertarwe en wintergerst. In 2014 werd exceptioneel vlas geteeld. De bodemstalen van de K1-behandeling in 2015 werden geanalyseerd, de relatieve opbrengst van tarwe in dit jaar was 95%. Opbrengstdata van voorgaande jaren werden bekomen en gekoppeld aan het bodem-P-gehalte van 2015. Vijf verschillende proefvelden werden gedefinieerd als verschillende jaargewas combinaties (Tabel 34) De opbrengst voor de P0-behandeling was 88% voor suikerbiet (2011), 98% voor tarwe (2012), 91% voor gerst (2013) en 49% voor vlas (2014) (persoonlijke communicatie, CRA-W).

### Ath (België)

Dit factorieel NPK-bemestingsexperiment werd opgestart in 1965 door de Bodemkundige Dienst van België en de toenmalige Rijksuniversiteit Gent op een leembodem in het noordelijk deel van Wallonië. De proef is gestopt in 1987. Het experiment wordt beschreven door Vanderdeelen et al. (1984) en Vandendriessche et al. (1994). De initiële bodem pH (H<sub>2</sub>O) was 7,6 en de P-bemestingsdosissen die toegepast werden op het veld waren: P0, P1 (35 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>), P2, P3 en P4. Alle behandelingen werden zes maal herhaald in een random design. De initiële bodem-P-inhoud was 163 mg P kg<sup>-1</sup> bodem (gemeten als P-AL), dewelke gedaald was tot 80 mg P kg<sup>-1</sup> bodem in 1987 in de P0-behandeling. Wintertarwe, wintergerst, suikerbiet en aardappelen werden geteeld in rotatie gedurende deze 23 jaar. Bodemstalen van 1982 en 1985 waren beschikbaar voor analyse. Gedurende deze twee jaar werd tarwe geteeld op het veld. De P2-behandeling van 1982 ontbrak en werd daarom niet opgenomen in de analyse. Aangezien de bodemstalen opgeslagen werden als een mengstaal waren er geen replica's beschikbaar voor analyse. De P-inhoud in het bodemstaal werd daarom gerelateerd aan de gemiddelde opbrengst van de replica's van dezelfde P-behandeling. De relatieve opbrengsten in de P0-behandeling was 95% in 1982 en 96% in 1985. Opbrengstdata van 1980-1987 waren beschikbaar, waardoor het mogelijk was om andere gewassen zoals suikerbiet, aardappel en gerst op te nemen in de analyse. De relatieve opbrengsten in de P0-behandeling voor de andere gewassen waren 90% (1980) en 95% (1983) voor gerst, 58% (1981) voor aardappel, 93% (1984) en 98% (1987) voor suikerbiet.

### Rostock (Duitsland)

Dit lange-termijnexperiment op het proefveld van de universiteit van Rostock werd opgestart in 1998 op een lemige zandbodem en bevindt zich in het noordoosten van Duitsland, 15 km van de Baltische Zee (54°3'41.47"N; 12°5'5.59"E). De site werd eerder al beschreven in de literatuur door Eichler-Löbermann et al. (2007) en Krey et al. (2013). De bodem wordt beschreven als een Cambisol volgens het bodemclassificatiesysteem "World Reference Base for Soil Resources". De gemiddelde temperatuur in de regio is 8,1°C en de gemiddelde jaarlijkse neerslag bedraagt 600mm. De initiële bodem-P-inhoud was 490 mg P kg<sup>-1</sup> bodem en het initieel plantbeschikbare P was 42 mg P kg<sup>-1</sup> bodem (gemeten via een dubbele lactaatextractie). Er werden negen behandelingen aangelegd die varieerden in anorganische (nul, triple superfosfaat (TSP) zomer bemesting, triple superfosfaat (TSP) winter bemesting) en organisch (nul, dierlijke mest, compost) P bemesting, elk met vier replica's in een gerandomiseerd blok design. Anorganische P werd jaarlijks toegevoegd (21,8 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>) en organische P werd om de drie jaar toegevoegd (30 ton ha<sup>-1</sup> dierlijke mest of compost). De gewassen

die geteeld werden sinds de start van het experiment zijn: koolzaad, tarwe, gerst, maïs, rogge, sorghum en zonnebloem. Sinds 2013 werd elke behandeling onderverdeeld in vier subplots op dewelke maïs, maïs + boon, sorghum, en sorghum + Andes Lupine geteeld werden (persoonlijke communicatie, universiteit van Rostock). De stalen die in deze studie geanalyseerd werden, waren afkomstig van vier behandelingen (controle (P0), TSP, compost, compost +TSP) van 2015 van de maïsteelt. Er werden twee proefvelden gedefinieerd omdat organische stof ook een invloed kan hebben op de gewasopbrengst: een proefveld met compost (Rostock 2) en een proefveld zonder compost (Rostock 1). De totale fosfor die werd toegevoegd tussen 1998 en 2012 voor de vier geselecteerde behandelingen was 0 kg P ha<sup>-1</sup> voor de controlebehandeling, 330 kg P ha<sup>-1</sup> voor de compostbehandeling, 328 kg P ha<sup>-1</sup> voor de TSP behandeling, en 685 kg P ha<sup>-1</sup> voor de compost + TSP behandeling (persoonlijke communicatie, universiteit van Rostock). De relatieve opbrengst in de controlebehandeling (90%) werd berekend relatief ten opzichte van de TSP-behandeling, en de relatieve opbrengst van de compostbehandeling (106%) werd berekend in vergelijking met de compost + TSP-behandeling.

#### Carcarès Sainte Croix (Bordeaux, Frankrijk)

Deze lange-termijnproef startte in 1972 op een zandbodem in het zuidwesten van Frankrijk (43° 52'N, 0°44' W, 55m boven zeeniveau) en eindigde in 2004. De proef werd onderhouden door het Frans Nationaal Instituut voor Landbouwkundig Onderzoek (INRA) en werd eerder beschreven door Pellerin et al. (2000), Plénet et al. (2000) en Mollier et al. (2008). De bovenste bodemlaag (0-25 cm) bevatte 6% klei, 13.5% leem, 80,5% zand en 1,78% organische stof. De pH (H<sub>2</sub>O) was 5,9. Initieel werden 3 P-bemestingsdosisen toegepast [P0 (0 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>), P1.5 (42,8 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>) en P3 (94,3 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>)], dewelke vier maal herhaald werden in een volledig gerandomiseerd blok design. De Olsen-P van de P0-behandeling was 23 mg P kg<sup>-1</sup> bodem. Gedurende het laatste jaar van het experiment (2004) werd de P0-behandeling onderverdeeld in 4 sub-behandelingen P0-0, P0-1 (65,5 kg P ha<sup>-1</sup>), P0-2 (218 kg P ha<sup>-1</sup>) en P0-3 (655 kg P ha<sup>-1</sup>) om een breder bereik in opbrengsten en bodem-P-niveaus te bekomen (persoonlijke communicatie). Gedurende elk jaar werd geïrrigeerde maïs geteeld op het veld. Voor deze studie werden bodemstalen van 2004 geanalyseerd en gekoppeld aan de opbrengstdata. De gemiddelde relatieve opbrengst van de P0-0-behandeling relatief ten opzichte van de P3 (100%)-behandeling was 92%.

#### Pierroton (Bordeaux, Frankrijk)

Dit proefveld werd opgestart in 1995 op een zandbodem door het Frans Nationaal Instituut voor Landbouwkundig Onderzoek (INRA) en werd beschreven door Denoroy et al. (2012 en 2013). De bodem wordt geclassificeerd als een Podzol en bevat 93% zand, 2% leem en 5% klei. De initiële P-inhoud van de bodem was 12 mg P kg<sup>-1</sup> bodem (Olsen-P). Het experiment omvat vijf behandelingen: P0, P0,75, P1 (± 20 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>), P2 en P4, dewelke elk vier keer herhaald worden in een gerandomiseerd blok design. Sinds 2002 werd de P0-behandeling omgezet naar een P0,5-behandeling omdat de opbrengst gedaald was tot minder dan 20% van de opbrengst van de P1-behandeling. Er werd jaarlijks geïrrigeerde maïs geteeld op deze velden, uitgezonderd voor 2006 (braak) en 2010 (wortel). Er werden bodemstalen van 2015 geanalyseerd, de relatieve opbrengst van de P0,5-behandeling was 61%.

#### Toulouse (Frankrijk)

Dit proefveld van het Frans Nationaal Instituut voor Landbouwkundig Onderzoek (INRA) werd opgestart in 1968, 10 km ten zuidwesten van Toulouse (43.5°N, 1.43°E) en werd eerder beschreven door Jouany et al. (1994) en Colomb et al. (2007). Het proefveld is een lemige kleibodem gaande naar een kleibodem en wordt doorkruist door een kalkband dewelke een ruimtelijke variatie van CaCO<sub>3</sub> en pH (6,6-8,4) veroorzaakt. Het experiment omvat vier P-behandelingen: P0, P1 (± 17,5 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>), P2 en P4, elk vier maal herhaald. De replica's zijn gelijk verdeeld over de kalkrijke en niet-kalkrijke delen. In 1978 werd elke behandeling onderverdeeld in 2 sub-behandelingen: op één hiervan werd

jaarlijks een P-dosis (van  $\pm 21,8 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ ) toegevoegd aan alle initiële P behandelingen (groep A), op de andere werden de initiële P-bemestingsdossissen behouden. Deze laatste werd in 1991 opgesplitst in een geïrrigeerde en goed bemeste plot (groep B), en een weinig bemeste en niet-geïrrigeerde plot (groep C). Vanaf dat jaar veranderden ook de jaarlijkse P-bemestingsdossissen naar  $11 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$  (P1) en  $22 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$  (P2 en P4). In 1994 werd de P-input in de P4-behandeling opgedreven naar  $33 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ . Verschillende gewassen werden geteeld op dit proefveld: tarwe, maïs, zonnebloem, sojaboon, sorghum, tuinboon, raap en erwt. Bodemstalen van groep B in 2006 werden geanalyseerd, gedurende dit jaar werd harde tarwe geteeld, de gemiddelde relatieve opbrengst van de P0-behandeling bedroeg 71%

#### Peldon (Essex, Engeland), Great Carlton (Lincolnshire, Engeland)

Deze proefvelden vormen een deel van een Engels project dat gefinancierd wordt door de “Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB)” met als doel het kritische P-gehalte te bepalen op verschillende bodemtypes. Het onderzoek startte in 2009 en wordt beschreven in Knight et al. (2014). De bodem in Peldon is een zware kleibodem met een initiële bodem pH van 7,4. De bodem in Great Carlton is een fijne leembodem met een initiële pH van 6.9. Alle proefvelden van dit project hadden een initiële P-Olsen  $\leq 15 \text{ mg P kg}^{-1}$  bodem. Initieel werden op elk proefveld 18 plots aangelegd die bemest werden met verschillende hoeveelheden TSP om bodem-P-waarden tussen  $10\text{-}25 \text{ mg P kg}^{-1}$  bodem te bekomen. Gedurende twee jaar werd er geen P toegevoegd aan de plots, hierna werd elke plot onderverdeeld in drie subplots waarvan 2 niet bemest werden en de derde plot kreeg elk jaar (3<sup>de</sup> en 4<sup>de</sup> jaar) fosforbemesting ( $87,3 \text{ kg P ha}^{-1}$ ). In Peldon werd er continu tarwe geteeld op het proefveld, in Great Carlton werd tarwe en raap geteeld, ofwel was het een braakliggend stuk grond. Voor beide proefvelden werden bodemstalen van 2011 bekomen voor analyse, d.i. net voor de sub-onderverdeling van de 18 hoofdplots. Gedurende dit jaar werd op beide proefvelden tarwe geteeld. Aangezien de Olsen-P inhoud van een plot afhankelijk was van het initiële bodem-P-gehalte en van de hoeveelheid P-bemesting, werden er in dit experiment geen behandelingen gedefinieerd noch herhalingen. De relatieve opbrengst werd daarom berekend in vergelijking met de plot met de hoogste opbrengst. De relatieve opbrengst varieerde van 69 tot 99% voor de bodems van Peldon, en tussen 75 en 99% voor de bodems van Great Carlton.

#### Exhaustion Land (Harpenden, Engeland)

Deze lange-termijnproef in Harpenden is eigendom van het Rothamsted Research Centrum en werd eerder beschreven in Rothamsted Research (2012) en Poulton et al. (2013). Het experiment startte in 1856 op een zandige leembodem (20% klei, 52% leem en 28% zand), en is geclassificeerd als een Luvisol. Initieel was de bodem-pH van het proefveld zuur. Bemesting van de bodem voor 1850 heeft ervoor gezorgd dat de pH gestegen is tot 7,0-8,0 (gemeten in  $\text{H}_2\text{O}$ ), erna werd de pH onderhouden op 7,0. Het experiment startte in 1856 met 8 behandelingen: 2 plots zonder bemesting, en 6 plots met een variërende NPK-bemesting. In 1876 werden 2 stalmestbehandelingen toegevoegd, waardoor er in totaal tien behandelingen bekomen werden. De plots werden jaarlijks bemest tot 1901. Gedurende 1901-1940 werden de plots niet bemest. Vanaf 1940 werden de velden opnieuw bemest met N. De bodemstalen die gebruikt werden voor deze analyse waren afkomstig van een experiment dat startte in 1986 op vijf (geen bemesting (1), stalmest (2), N-bemesting (3), NPK-bemesting (4) en P-bemesting (5)) van de tien behandelingen. In 1986 werden elk van deze 5 plots onderverdeeld in 4 P-bemestingen: P0, P1, P2 en P3. Hierdoor waren er in totaal 20 plots, elk met een verschillende achtergrondbemesting of huidige bemesting, waardoor dit experiment geen replica's heeft. Gedurende 1986-1992 werd de bemesting jaarlijks toegevoegd onder vorm van TSP:  $0 \text{ kg P ha}^{-1}$ , P1 :  $43,7 \text{ kg P ha}^{-1}$ , P2 :  $87,3 \text{ kg P ha}^{-1}$ , P3 :  $131,0 \text{ kg P ha}^{-1}$ . Gedurende de andere jaren van dit decennium werd geen P toegevoegd aan de plots. Vanaf 2000 werd P weer jaarlijks toegevoegd als een onderhoudsbemesting, d.i. equivalent aan de gewasopname van P, aan alle +P behandelingen. Verschillende gewassen zijn geteeld geweest op dit proefveld: wintertarwe (1856-1874), aardappelen (1876-1901), granen (1901-1949), zomergerst (1949-1991) en wintertarwe (sinds 1991). Er werden stalen geanalyseerd van 1999, d.i. na een periode zonder bemesting, en van 2008, d.i. na enkele jaren onderhoudsbemesting. Voor elk jaar werden 5

proefvelden gedefinieerd op basis van de achtergrondbemesting, waardoor er 10 proefvelden waren op deze locatie (2x5). In 1999 varieerde de RO van de P0-behandeling tussen 15-69% afhankelijk van de bemestingsachtergrond, in 2008 was dit tussen 27-69%.

#### Saxmundham (Engeland)

Dit experiment startte in 1899 op een zandige klei-leem bodem (25% klei) en wordt beschreven door Johnston, et al. (2013). Sinds 1965 heeft Rothamsted Research de verantwoordelijkheid over deze site. Initieel werden acht behandelingen toegepast op deze locatie, elk met een verschillende totale P-bemesting gedurende 1899-1968 (0-2510 kg P ha<sup>-1</sup>, kunstmest en/of stalmest). In 1969 werd elke behandeling onderverdeeld in vijf sub-behandelingen dewelke elk een verschillende totale P-bemesting kregen gedurende 1969-1982 (0-379 kg P ha<sup>-1</sup>) (persoonlijke communicatie, Rothamsted Research). Gedurende deze laatste periode werd er in rotatie aardappelen, zomergerst, suikerbiet en wintertarwe geteeld. Aangezien de plots een verschillende bemestingsachtergrond hebben gehad, heeft dit experiment geen replica's. Bodemstalen (2x20) werden geanalyseerd van twee verschillende jaren om verschillende N-bemestingsdosissen in rekening te brengen: 1978 (120 kg N ha<sup>-1</sup>) en 1982 (160 kg N ha<sup>-1</sup>). Gedurende deze jaren werd tarwe geteeld op het veld. De RO werd berekend ten opzichte van de maximale opbrengst die waargenomen was op de subplots. De RO varieerde tussen 47-100% in 1978 en tussen 63-100% in 1982.

#### Lanna (Zweden)

Deze lange-termijnproef bevindt zich in het zuidwesten van Zweden (58°21'N, 13°08'E) en startte in 1936 om het effect van fosfor en bekalking te bestuderen op een lemige kleibodem. Het experiment wordt beschreven door Bergström & Shirmohammadi (1999) en Mattsson (2001). De toplaag (0-30 cm) van de bodem bestaat uit 46,5% klei, 46,2% leem, 6,0% zand en 1,3% gravel. De organische stof inhoud van de bodem is 4.4%. Verschillende niveaus van P-bemesting (superfosfaat en calciumfosfaat) en bekalking werden toegepast. Er werden voornamelijk granen (wintertarwe, haver en gerst) geteeld op het veld. Voor dit onderzoek werden enkele bodems zonder bekalking en verschillende P-niveaus gekozen (geen P, jaarlijkse bemesting van superfosfaat, zelfde totale hoeveelheid van superfosfaat maar om de 6 jaar). De geanalyseerde stalen dateren van 2013, gedurende dit jaar stond er tarwe op het proefveld. Er waren geen replica's aanwezig voor de analyse omdat de stalen als behandeling werden bewaard. Als referentiebehandeling werd de behandeling gekozen met een jaarlijkse P-toevoeging. De RO van de P0-behandeling was 73%.

#### *Bodem-P-testen*

Alle bodemstalen werden gezeefd (< 2mm) en overnacht gedroogd op 45°C. De procedures van de bodem-P-testen werden reeds beschreven in sectie 2.1.2. Het P-CaCl<sub>2</sub> en P-DGT werd bij dit deel van de proef bepaald met behulp van ICP massa spectroscopie (Agilent 7700x). Er werd verondersteld dat de DGT, de CaCl<sub>2</sub>-extractie en de fosfaatverzadigingsgraad (aangezien deze, in tegenstelling tot de gelinkte P-Ox, gerelateerd is voor de P-concentratie in het uitloogwater die op termijn kan uitlogen, zie DWP 2.3) een maat zijn voor de P-intensiteit (I) van de bodem, d.i. de P in bodemoplossing. In tegenstelling, zijn de oxalaat extractie, de ammoniumlactaat extractie en de Olsen-extractie een maat voor de P-intensiteit + de P-kwantiteit (Q) van de bodem. Deze laatste drie zullen hierna voor de eenvoudigheid benoemd worden als testen die een maat zijn voor de P-kwantiteit (Q), Q-testen.

#### *Statistische analyse*

Data-analyse werd uitgevoerd met het statistische programma JMP PRO 12. De relatieve opbrengst (RO, %) werd geplot in functie van het bodembeschikbare P voor elke test (Ptest) en een Mitscherlich model werd gefit via niet lineaire regressie door de data,

$$RO (\%) = b_0 + (100 - b_0) * (1 - \exp(-b_1 * P_{test})),$$

waarbij b<sub>0</sub> de RO bij Ptest = 0 is en b<sub>1</sub> de helling van het model. De maximale opbrengst (100%) wordt asymptotisch benaderd bij stijgende P-test-waarden; bij Ptest = 1/b<sub>1</sub>, is de RO b<sub>0</sub>+0.63(100-b<sub>0</sub>)%.

Zowel de Michaelis-Menten kinetiek als het Mitscherlich model werden gefit op de data van de relatieve opbrengst in functie van Ptest. Aangezien de modelfit quasi gelijk was, uit praktische overwegingen en omdat het Mitscherlichmodel alom gebruikt wordt op dit soort data (Colomb et al., 2007; Menzies et al., 2005; Poulton et al., 2013; Six et al., 2013) werd gekozen voor dit model. Homoscedasticiteit van de residuen werd bevestigd door de White test ( $p > 0,05$ ). De  $R^2$  van de fit werd bepaald door de voorspelde RO te plotten in functie van de geobserveerde RO. Kritische bodem-P-testwaarden ( $P_{krit}$ ), d.i.; de bodem-P-waarden bij een RO van 95%, werden bepaald voor elke test met behulp van een inverse predictie van bovenstaande vergelijking. Er werd gekozen voor een kritische grens van 95% RO in navolging van verschillende studies (Bollons and Barraclough, 1999; Colomb et al., 2007; Sanchez-Alcala et al., 2015), maar ook andere grenzen (80%, 90%, 98%) worden gebruikt. Dit hangt af van het te willen nemen risico op vals positieve en vals negatieve respons (zie verder). Deze analyse werd eerst uitgevoerd voor de volledige dataset inclusief alle gewassen.

Vervolgens werd het model gefit op de data voor elk gewas afzonderlijk met behulp van dummyvariabelen. Ervan uitgaande dat er slechts een klein effect is van het gewas op het intercept ( $b_0$ ), is het effect van het gewas enkel afhankelijk van de helling ( $b_1$ ), deze kwantitatieve variabele kan gecodeerd worden met binaire dummyvariabelen (0/1).

$$RY (\%) = b_0 + (100 - b_0) * (1 - \exp(-b_{1_{gem}} * (1 + b_{1_t} * d_t + b_{1_g} * d_g + b_{1_a} * d_a + b_{1_s} * d_s + b_{1_m} * d_m + b_{1_v} * d_v) * Ptest))$$

waarbij  $b_0$  het intercept is,  $b_{1_{gem}}$  is de gemiddelde helling,  $b_{1_x}$  is de specifieke helling voor een gewas,  $d_x$  is de dummyvariabele specifiek voor het gewas, t is tarwe, g is gerst, a is aardappel, s is suikerbiet, m is maïs en v is vlas. De specifieke hellingen voor elk gewas werden bekomen door de algemene parameters ( $b_0$  en  $b_{1_{gem}}$ ) constant te houden en het model dusdanig te fitten.

Wanneer alle dummyvariabelen ( $d_x$ ) gelijk zijn aan 0, bekomt men het resultaat voor het gemiddelde gewas ( $b_{1_{gem}}$ ), en dus ook de gemiddelde respons ( $RO_{gem}$ ). Indien men bvb specifiek naar suikerbiet kijkt, zal enkel deze dummyvariabele ( $d_s$ ) een waarde 1 aannemen en de overige dummyvariabelen zullen gelijk zijn aan 0, bijgevolg zal enkel de gewasspecifieke helling van suikerbiet ( $b_{1_s}$ ) in rekening worden gebracht. Deze corrigeert de gemiddelde helling voor dit specifieke gewas en bijgevolg bekomt men een gewasspecifieke respons voor suikerbiet ( $RO_s$ ). Met behulp van deze benadering kan men ook in de omgekeerde richting de gewasspecifieke kritische P-waarde bepalen voor elke test. Tenslotte werd voor elk proefveld  $P_{krit}$  bepaald. Proefvelden met een gemiddelde RO  $\geq 95\%$  in de P0-behandeling werden niet opgenomen in deze analyse, aangezien er quasi geen opbrengstdaling is

Voor de fosfaatverzadigingsgraad werd een deel van de analyse uitgevoerd op de volledige bodemcollectie, alsook op de zure zandbodems apart (bodem van Pierroton en Carcarès Sainte Croix, 44 datapunten, aangeduid als FVG\*). Aangezien slechts 1 gewas en slechts 2 verschillende proefvelden als data beschikbaar waren voor de FVG\*, konden niet alle statistische analyses op deze manier uitgevoerd worden.

## 6.3 RESULTATEN

### Bodem-P-testen

Ter informatie wordt de gemiddelde bodem-P-waarde en het bereik van testwaarden waarin de bodemstalen liggen, weergegeven in Tabel 35. Hieruit blijkt dat de oxalaatextractie de meest agressieve extractie is. De coëfficiënt van variatie van elke test ( $CV_{test}$ ), berekend als de ratio van de standaarddeviatie van alle bodem-P-testwaarden over de gemiddelde waarde, varieert tussen de verschillende bodemtesten. Dit impliceert dat bepaalde testen een groter potentieel hebben om



verschillende resultaten te vinden tussen verschillende bodemstalen wanneer er een groter meetbereik werd bestreken met de bodemstalen geanalyseerd in deze vergelijkende studie. Een groter onderscheidend vermogen maakt het mogelijk gemakkelijker om een duidelijke kritische waarde te definiëren. De  $CV_{\text{test}}$  daalt in de volgorde: DGT >  $\text{CaCl}_2$  > Olsen > AL > FVG\* > FVG. > Ox. De DGT test heeft dus het grootste onderscheidend vermogen en de oxalaatextractie het kleinste. Deze cijfers kunnen enkel gebruikt worden om de testen onderling te vergelijken. Ter informatie wordt nog meegegeven dat de Pearson correlatiecoëfficiënt het grootste was voor DGT en  $\text{CaCl}_2$  ( $r = 0,98$ ; testen die een indicator zijn van de intensiteit), en tussen de AL-en de Olsen-extractie ( $r = 0,96$ ; testen die een indicator zijn van de kwantiteit (Q)).

#### *Relatieve opbrengst als functie van de bodem-P-testen*

De respons van de gewasopbrengst voor verschillende bodem-P-testen gemodelleerd met de Mitscherlich vergelijking in functie van de bodem-P-testwaarden wordt weergegeven in Figuur 23. Ter verduidelijking van de respons op kleinere schaal, wordt een zoom weergegeven in Figuur 24. De gewasopbrengst-respons uitgedrukt ten opzichte van een log-getransformeerde schaal van de bodem-P-testwaarden wordt weergegeven in Figuur 25.

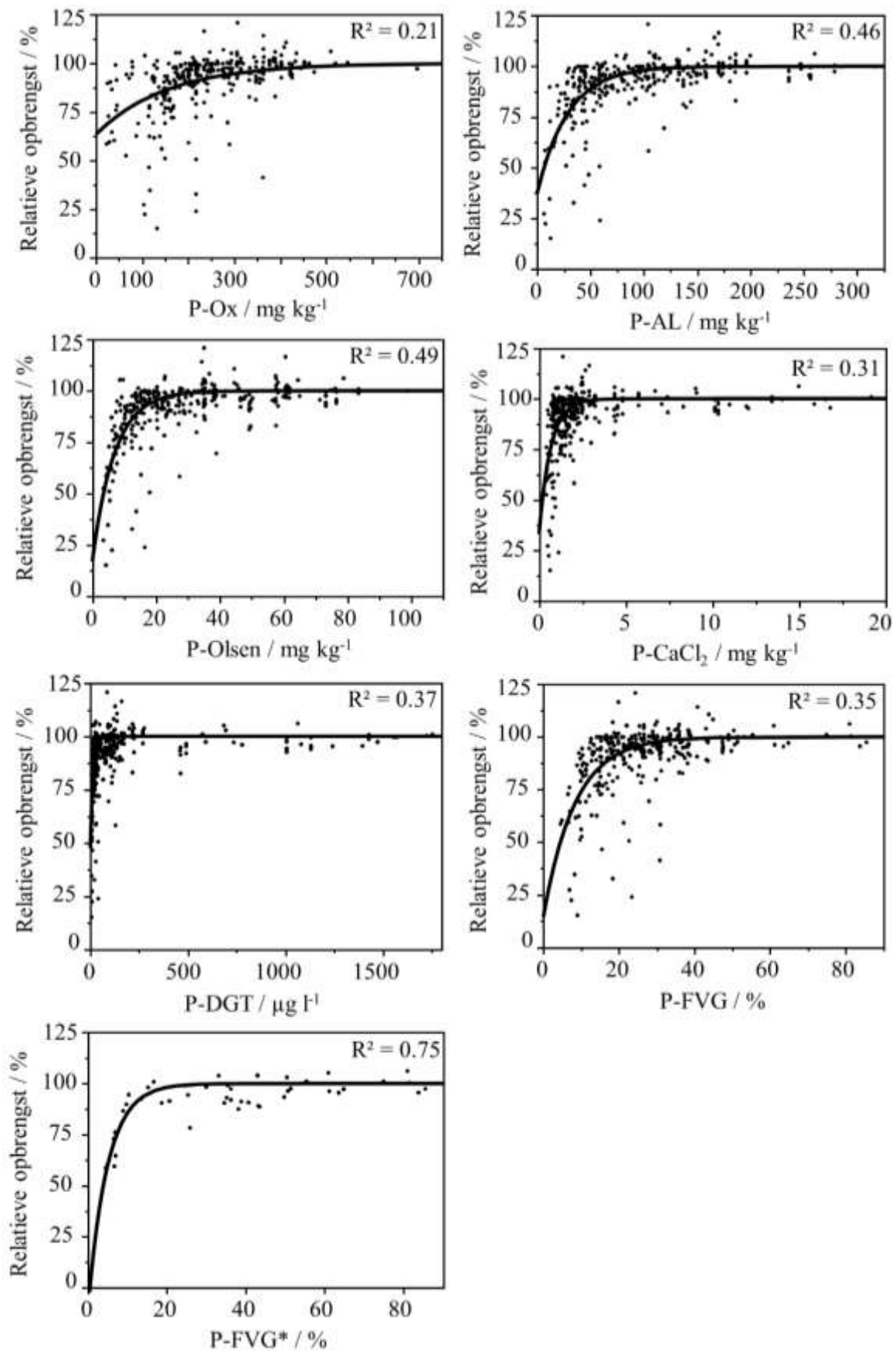
De RO (alle gewassen gecombineerd) stijgt met stijgende bodem-P-waarden. De Olsen- ( $R^2=0,49$ ) en de AL- ( $R^2=0,46$ ) extractie verklaren het best de gewasrespons. Op een normale schaal lijken de fit van  $\text{CaCl}_2$  en DGT ook voldoende. Wanneer men echter op log schaal kijkt, kan men meer ruis van de data waarnemen in de lagere concentratierange, hetgeen de lagere  $R^2$ -waarden verklaart. De  $R^2$  van FVG\* (zure zandgronden alleen) is hoger dan de FVG (zelfde test op alle bodems). Dit kan verklaard worden doordat de analyse van de zure zandgronden uitgevoerd wordt op slechts 2 locaties en slechts 1 gewas, waardoor er al minder variatie op de data zit.

#### *Testspecifieke kritische fosforwaarde*

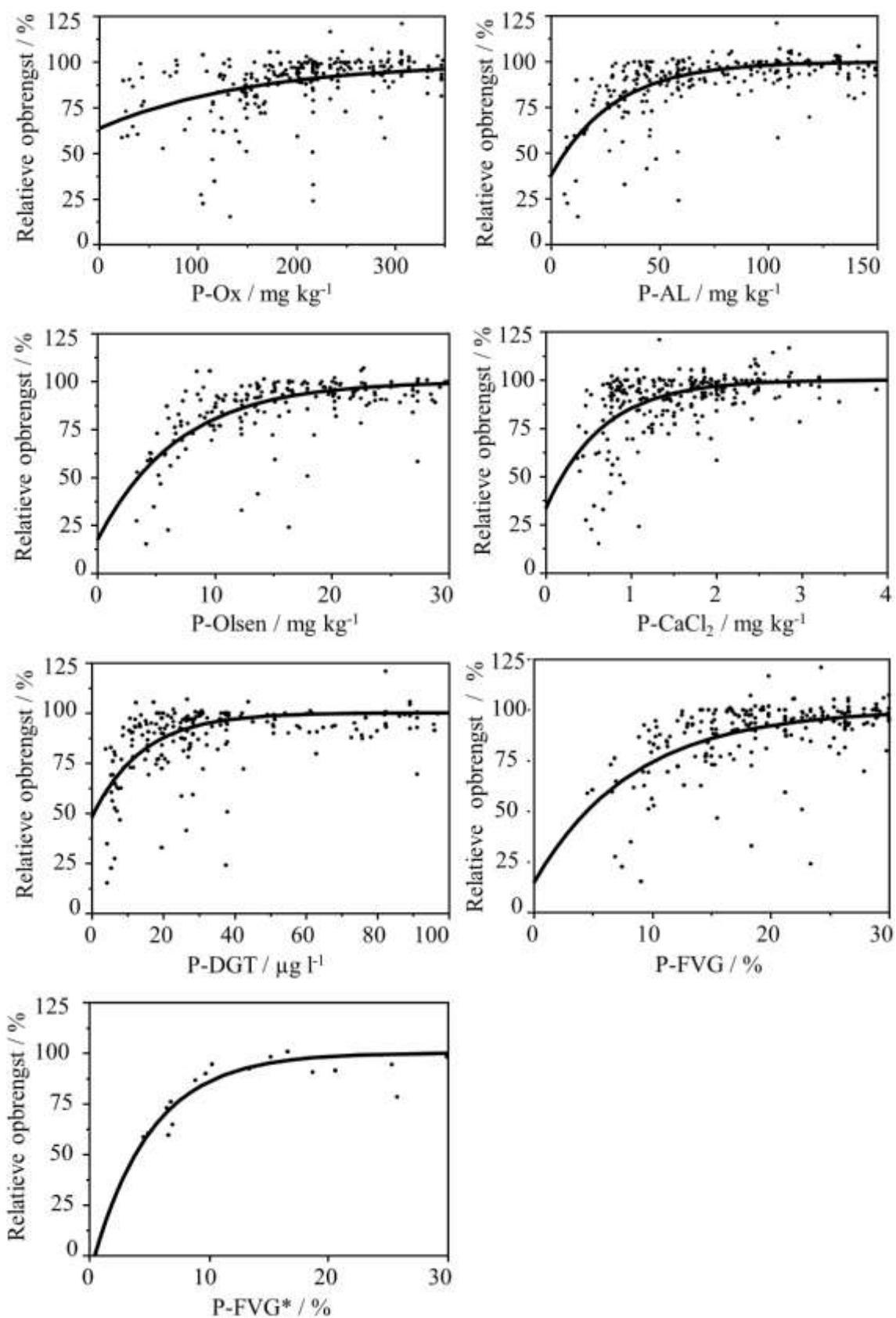
De kritische P-waarden ( $P_{\text{test}}$  bij RO = 95%), en de relatieve breedte van het 95%-betrouwbaarheidsinterval (relatief ten opzichte van  $P_{\text{krit}}$ ) is weergegeven in Tabel 35. Deze waarde is het hoogst voor DGT en het laagst voor FVG, m.a.w. FVG heeft een hoger onderscheidend vermogen in de kritische range voor P. Echter, er kan geargumenteed worden dat deze relatieve breedte gecontrasteerd moet worden met de inherente variabiliteit van de test. Zo heeft de DGT het grootste onderscheidend vermogen, d.i. de CV is het grootst, en dus kan een grotere relatieve breedte gecompenseerd worden door een groter onderscheidend vermogen. De statistische onzekerheid, die berekend wordt als de ratio van de relatieve breedte van  $P_{\text{krit}}$  op de  $CV_{\text{test}}$  is het laagste voor DGT gevolgd door  $\text{CaCl}_2$ .

Tabel 35. Bodem-P-testwaarden van de bodems gebruikt in de data-analyse (links) en de kritische P-testwaarden, ( $P_{krit}$ ) d.i. bodem testwaarden bij RO = 95% gemodelleerd via de Mitscherlichcurve op de data van alle gewassen, locaties en jaren (rechts.) De relatieve breedte van het 95% betrouwbaarheidsinterval van  $P_{krit}$  (~onzekerheid) stijgt met de coëfficiënt van variatie van de bodem-testwaarden ( $CV_{test}$ , ~variabiliteit). De ratio van de onzekerheid op variabiliteit kan gedefinieerd worden als een index van statistische onzekerheid om  $P_{krit}$  te bepalen, deze waarde is het laagst voor de DGT (onderlijnde waarde). De FVG\* is de FVG test beperkt tot zure zandgronden.

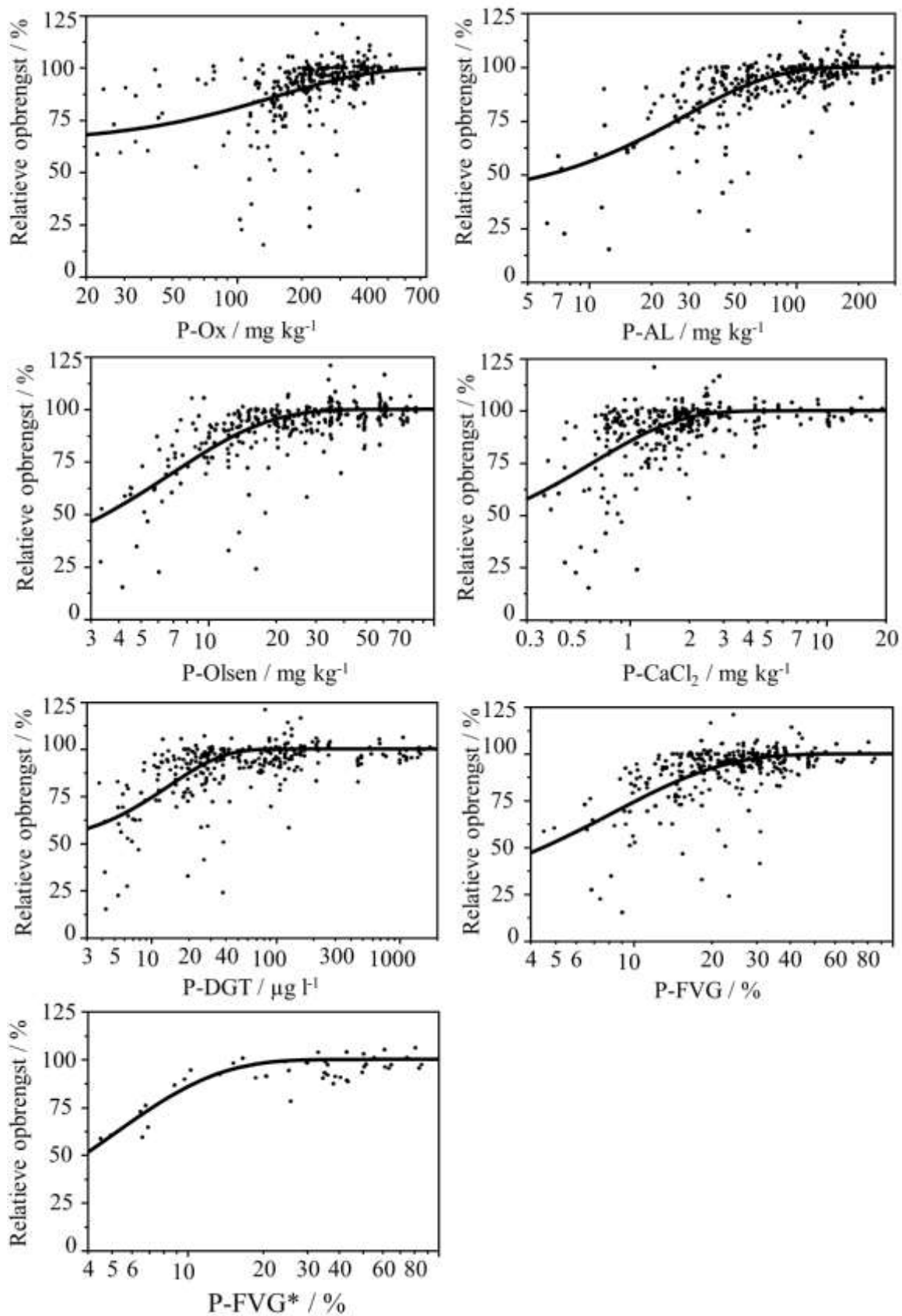
Bodem P testwaarden				Kritische P (bij 95% relatieve opbrengst)			
Bodem P test	Gem.	Range	$CV_{test}$ / %	$P_{krit}$	95% betrouwbaarheidsinterval		Statistische onzekerheid (= B/A) / %
			=A		absoluut	Breedte van het interval relatief ten opzichte van $P_{krit}$ (%) = B	
P-ox / mg kg <sup>-1</sup>	250	23–700	45	<b>310</b>	260–360	32	71
P-AL / mg kg <sup>-1</sup>	100	6,2–320	69	<b>73</b>	64–81	23	33
P-Olsen / mg kg <sup>-1</sup>	31	3,3–100	70	<b>19</b>	17–22	26	37
P-CaCl <sub>2</sub> / mg kg <sup>-1</sup>	3.0	0,4–19	120	<b>1.7</b>	1,5–1,9	24	20
P-DGT / μg l <sup>-1</sup>	200	3,6–1800	190	<b>33</b>	27–38	33	<u>17</u>
P-FVG / %	27	4,5–85	52	<b>24</b>	21–26	21	40
P-FVG* / %	37	4,5–85	64	<b>15</b>	11–19	53	83



Figuur 23: De relatieve opbrengst (RO) in functie van de bodem-P-waarden bepaald via de verschillende bodem-P-testen. De punten zijn individuele observaties, de lijnen worden voorspeld met het Mitscherlichmodel. De FVG\* is de FVG-test beperkt tot zure zandgronden.



Figuur 24: In detail grafieken van de relatieve opbrengst (RO) in functie van de bodem-P-waarden bepaald via de verschillende bodem-P-testen. De punten zijn individuele observaties, de lijnen worden voorspeld met het Mitscherlichmodel. De FVG\* is de FVG-test beperkt tot zure zandgronden.



Figuur 25: De relatieve opbrengst (RO) in functie van de bodem-P-waarden bepaald via de verschillende bodem-P-testen met log-getransformeerde X-assen. De punten zijn individuele observaties, de lijnen worden voorspeld met het Mitscherlich model. De FVG\* is de FVG-test beperkt tot zure zandgronden.

### *P<sub>krit</sub> per gewas*

Er was een significant effect van het gewas op de helling van de Mitscherlich vergelijking, en dus ook op de kritische P-gehalten ( $P_{krit}$ ). In het algemeen daalde de gewas afhankelijke specifieke  $P_{krit}$  volgens: aardappel > vlas > gerst ~ suikerbiet ~ tarwe > maïs (Tabel 36). Statistisch significante effecten geven een verschil weer tussen een gewasrespons en de gemiddelde respons, hetgeen wordt aangegeven met een asterix,

Voor maïs is de gewasspecifieke kritische P-AL-waarde 46 mg/kg, hetgeen laag is, en hetgeen ook lager is dan het gemiddelde van de individuele proefvelden (94 mg/kg, 100 mg/kg en 47 mg/kg) (Tabel 37). Dit kan verklaard worden door de statistische analyse: twee proefvelden hebben slechts een matige respons bij P0 terwijl één proefveld een meer uitgesproken respons heeft bij P0 (Pierroton) (zie Tabel 34). Deze laatste heeft de grootste invloed op de Mitscherlichcurve, en dus ook op de afgeleide kritische P-waarde. Daarom moeten de gewasspecifieke kritische P-waarden in Tabel 36 met voorzichtigheid geïnterpreteerd worden.

### *P<sub>krit</sub> per proefveld (locatie, gewas, jaar).*

De kritische P-testwaarden werden ook bepaald per proefveld (Tabel 37). Een robuuste bodem-P-test kan gedefinieerd worden als een test voor dewelke  $P_{krit}$  het minst varieert tussen bodems. Deze analyse werd enkel uitgevoerd op de data van tarwe omdat dit gewas op 16 proefvelden werd teruggevonden (Tabel 38). Andere gewassen werden op slechts 2-3 proefvelden geteeld. De variatie in  $P_{krit}$ -waarden wordt uitgedrukt als de relatieve onzekerheid. De kleinste waarde van de relatieve onzekerheid drukt uit dat een bodem-P-test het minst varieert over bodem. Deze onzekerheid wordt berekend als de ratio van  $CV_{P_{krit}}$  over  $CV_{test}$ . De eerstgenoemde is hier de standaarddeviatie van de  $P_{krit}$  voor alle bodems per gewas, gedeeld door de algemene waarde. De relatieve onzekerheid was het laagste voor de  $CaCl_2$ -extractie, m.a.w. het is de test die het effect van bodem (m.a.w. effect van de locatie maar ook effect van jaar van proefveld) het meest uitsluit. De invloed van variabelen op  $P_{krit}$  daalde volgens locatie > pH > gewas > textuur. Het is logisch dat de kritische drempels meer afhankelijk zijn van locatie dan van gewas, omdat de variabele locatie alle effecten omvat die kunnen worden waargenomen op 1 locatie (gewas, bodem, klimaat,...).

Tabel 36: Gewasafhankelijke kritische P-waarden en gemiddelde waarde voor alle gewassen per test, locaties en jaren gecombineerd. De asterix geeft weer dat een gewas een significant verschillende  $P_{krit}$  heeft ten opzichte van de gemiddelde  $P_{krit}$ .

P <sub>krit</sub> (bij 95% relatieve opbrengst)								
Bodem-P-test/gewas	Gemiddelde		Tarwe	Vlas <sup>1</sup>	Aardappel <sup>1</sup>	Suikerbiet	Gerst	Maïs
P-ox / mg kg <sup>-1</sup>	310		310	340	400*	280	310	120*
P-AL / mg kg <sup>-1</sup>	73		69	140	200*	77	75	46*
P-Olsen / mg kg <sup>-1</sup>	19		18*	40*	76*	23	22	18
P-CaCl <sub>2</sub> / mg kg <sup>-1</sup>	1.7		1.7	2.3	7.8*	1.2	1.2	1.2*
P-DGT / µg l <sup>-1</sup>	33		28*	134*	940*	44	38	32
P-FVG / %	24		23	45	45*	26	27	17*
n	317		178	18	4	28	31	60

n: aantal individuele observaties per gewas

\*: Geeft weer dat het gewas een significant verschillende  $P_{krit}$  heeft ten opzichte van de gemiddelde respons. Dit wordt bepaald door het 95% betrouwbaarheidsinterval van de gewas specifieke dummy variabelen.

<sup>1</sup>: Kritische waarden werden zonder gewas specifieke dummyvariabelen aangezien op slechts 1 proefveld aardappelen en vlas geteeld werd. Significante verschillen van  $P_{krit}$  tussen aardappel/vlas en de gemiddelde respons werden bepaald op het 95% betrouwbaarheidsinterval van beide kritische waarden.

Tabel 37: Kritische P-waarden gesorteerd per gewas voor alle proefvelden

Gewas	Locatie	Jaar	P-ox / mg kg <sup>-1</sup>	P-AL / mg kg <sup>-1</sup>	P-Olsen / mg kg <sup>-1</sup>	P-CaCl <sub>2</sub> / mg kg <sup>-1</sup>	P-DGT / µg l <sup>-1</sup>	P-FVG / %
<b>Gerst</b>	Ath	1980	390	210	<sup>2</sup>	<sup>2</sup>	<sup>2</sup>	43
		1983 <sup>1</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		1986	400	200	61	8.6	870	43
	Gembloux	2013	270	70	18	1.3	35	24
<b>Vlas</b>	Gembloux	2014	340	140	40	2.3	134	45
<b>Maïs</b>	Caracares Sainte Croix	2004	210	94	32	4.6	250	43
	Rostock1	2015	320	100	30	1.5	72	34
	Rostock2	2015 <sup>1</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Pierroton	2015	76	47	19	1.0	35	15
<b>Aardappel</b>	Ath	1981	400	200	76	7.8	940	45
<b>Suikerbiet</b>	Ath	1984	310	120	36	3.5	310	35
		1987 <sup>1</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Gembloux	2011	250	68	21	1.2	56	24
<b>Tarwe</b>	Ath	1982 <sup>1</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		1985 <sup>1</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Exhaustion land 1	1999	160	27	9	0.9	6	11
	Exhaustion land 2		230	61	16	1.3	21	17



	Exhaustion land 3		180	34	8	0.9	8	13
	Exhaustion land 4		230	73	13	1.0	10	14
	Exhaustion land 5		210	62	12	1.0	9	14
	Exhaustion land 1	2008	170	32	12	0.8	12	11
	Exhaustion land 2		200	58	18	1.1	23	14
	Exhaustion land 3		<sup>3</sup>	33	13	0.8	15	12
	Exhaustion land 4		240	67	21	1.1	20	16
	Exhaustion land 5		190	57	15	0.9	14	13
	Gembloux	2012 <sup>1</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		2015 <sup>1</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Great Carlton	2011	200	60	18	2.2	43	20
	Lanna	2013	290	<sup>2</sup>	<sup>2</sup>	<sup>3</sup>	18	18
	Peldon	2011	280	120	46	2.7	110	20
	Saxmundham	1978	220	120	20	1.9	54	28
		1982	180	81	16	1.6	15	22
	Toulouse	2006	150	56	8	1.1	12	20

<sup>1</sup> Gemiddelde RO van de P<sub>0</sub>-behandelingen groter of gelijk aan 95% (zie Tabel 34) en daarvoor niet opgenomen in deze analyse (n.d.).

<sup>2</sup> De ondergrens van het P<sub>krit</sub> betrouwbaarheidsinterval had negatieve waarden, de geschatte P<sub>krit</sub> werd niet verder opgenomen in de analyse

<sup>3</sup> Model kon niet juist gefit worden, geen inverse predictie mogelijk

Tabel 38: De kritische bodem-P-waarden voor tarwe van 16 proefvelden (verschillende locaties, jaren of achtergrondbemesting) en de coëfficiënt van variatie ( $CV_{P_{krit}}$ ) over de bodem per bodem-P-test. De relatieve onzekerheid wordt berekend als de ratio van  $CV_{P_{krit}}$  op  $CV_{test}$ . De kleinste waarde (meest consistente waarde) is onderlijnd.

	P-ox / mg kg <sup>-1</sup>	P-AL / mg kg <sup>-1</sup>	P-Olsen / mg kg <sup>-1</sup>	P-CaCl <sub>2</sub> / mg kg <sup>-1</sup>	P-DGT / µg l <sup>-1</sup>	P-FVG / %
<b>P<sub>krit</sub>, bereik</b>	150—290	27—120	8.3—46	0.8—2.7	6.1—110	11—28
<b>CV<sub>P<sub>krit</sub></sub> / % (=C)</b>	20	45	56	44	106	29
<b>CV<sub>test</sub> (Tabel 35) / % (=A)</b>	45	69	70	120	190	52
<b>Relatieve onzekerheid P<sub>krit</sub> (= C/A*100)</b>	45	65	80	<u>37</u>	56	55

### *Kans op slagen en kans op mislukken van het voorspellen van de gewasrespons*

De slaagkans op het correct voorspellen van de gewasrespons op de P-bemesting in bodems met bodem-P-testwaarden kleiner dan  $P_{krit}$ , en de kans op het mislukken van het voorspellen van de respons op P-bemesting in bodem met bodem-P-waarden groter (of gelijk aan) de kritische waarden wordt weergegeven in Tabel 39. De kans op mislukken geeft de kans weer waarbij de bodem-P-testen voorspellen dat er voldoende opbrengst zal zijn, maar dat dit in praktijk toch niet het geval is. De slaagkans op het correct voorspellen van de respons op P-bemesting was het hoogste voor de Olsen- en de AL-extractie, alhoewel de waarden voor de andere testen vergelijkbaar waren. Ook voor de kans op mislukken van het voorspellen van de P-respons scoorde de AL-extractie het beste (laagste waarde, 25%), maar deze waarde was slechts marginaal verschillend van de waarde voor de andere testen.

Tabel 39: Kans op slagen voor het correct voorspellen van de respons op P-bemesting in bodems met een bodem-P-testwaarde kleiner dan  $P_{krit}$ , m.a.w. kans op correcte positieve test. En, in tegenstelling, de kans op een vals negatieve test, d.w.z. dat er toch een respons is op P-bemesting niettegenstaande de bodemanalyse aantoont dat de kritische waarde overschreden is (bodem P-test groter of gelijk aan  $P_{krit}$ .) De onderlijnde waarde geeft de meest geschikte test weer.

Bodem-P-test	Kans op het correct voorspellen van P-respons (%) <sup>1</sup>	Kans op mislukken om gebrek aan P-respons te voorspellen (%) <sup>2</sup>
P-ox	60	<u>26</u>
P-AL	76	28
P-Olsen	<u>78</u>	29
P-CaCl <sub>2</sub>	68	39
P-DGT	75	30
P-FVG	66	31

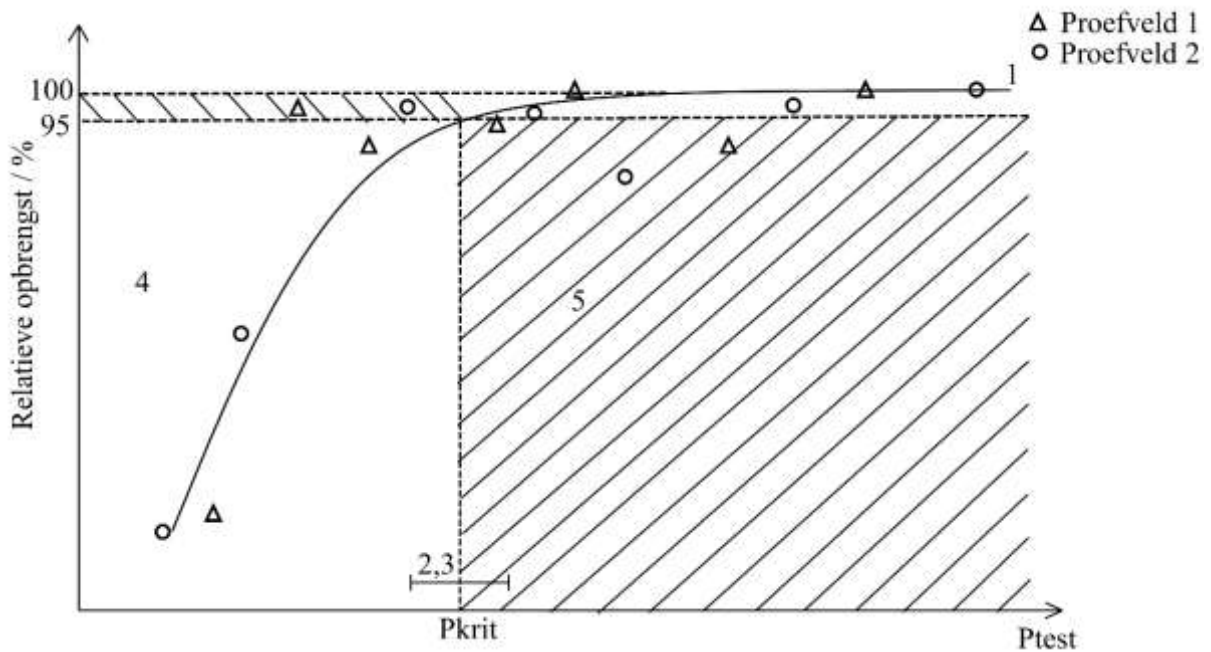
<sup>1</sup> Ratio van het aantal proefvelden met een RO < 95% in vergelijking met het totaal aantal proefvelden in bodems met een bodem-P-testwaarde kleiner dan  $P_{krit}$ , waarbij deze laatste de gewasafhankelijk  $P_{krit}$  is.

<sup>2</sup> Ratio van het aantal proefvelden met een RO < 95% in vergelijking met het totale aantal proefvelden met bodem-P-testwaarden hoger (of gelijk aan)  $P_{krit}$ , waarbij de laatste de gewasafhankelijke waarde is.

## 6.4 DISCUSSIE

### *Evaluatiecriteria*

De enkelvoudige bodem-P-testen werden geëvalueerd aan de hand van volgende criteria zoals geïllustreerd wordt in Figuur 26.



Figuur 26: Grafische voorstelling van de evaluatiecriteria voor de bodem-P-testen om het plant beschikbare P te voorspellen. 1. De  $R^2$ -waarde van Mitscherlichcurve (lijn); 2. De statistische onzekerheid van het 95%- betrouwbaarheidsinterval van  $P_{krit}$  bij RO 95%; 3. De relatieve onzekerheid van de kritische P-waarden over verschillende proefvelden; 4. De slaagkans op het correct voorspellen van de respons op de P-bemesting in bodems met bodem-P-testwaarden kleiner de  $P_{krit}$ . (fractie punten lager dan de 95% lijn); 5. De kans op mislukken van het voorspellen van de respons op P-bemesting in bodems met bodem-P-waarden groter (of gelijk aan) de kritische waarden fractie punten lager dan de 95% lijn). Symbolen zijn gesimuleerde data ter illustratie.

**(1):** De  $R^2$ -waarde van de plot van de relatie tussen de waargenomen RO en de voorspelde RO

De  $R^2$ -waarde is het hoogst voor de Olsen- en de AL-extractie, de oxalaatextractie scoort het slechtste op dit criterium.

**(2):** De statistische onzekerheid van de kritische bodem-P-waarde, d.i. de geïnterpoleerde waarde bij RO 95%. De onzekerheid is gebaseerd op het 95%- betrouwbaarheidsinterval van  $P_{krit}$ .

De statistische onzekerheid was het laagst, en dus meest optimaal voor de DGT-test, en het slechtste voor de oxalaatextractie. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval is in het algemeen eerder klein voor elke test (<35% van het gemiddelde) vanwege het grote aantal data opgenomen in de analyse. Daarbovenop zijn de statistische onzekerheden niet sterk verschillend ( $\pm$  een factor 2) tussen de verschillende testen (uitgezonderd P-ox). Hieruit wordt geconcludeerd dat dit criterium weinig praktische relevantie biedt.

**(3):** De relatieve onzekerheid van de kritische bodem-P-waarden over verschillende proefvelden na het fitten van het Mitscherlichmodel voor elk individueel proefveld. Enkel de data van tarwe werden hier in rekening gebracht omdat andere gewassen slechts op een beperkt aantal proefvelden geteeld werden en dit criterium dus niet relevant is.

De Olsen-extractie scoort het slechtst op dit criterium, de kritische waarden variëren tussen 8 en 46  $\text{mg kg}^{-1}$  afhankelijk van het jaar en de bodem, hetgeen bijna het hele spectrum van Olsen-P waarden omvat in de geanalyseerde bodems. In dit opzicht is de CaCl<sub>2</sub>-extractie de meest robuuste test, de kritische P-waarden variëren slechts een factor 3 en dit is slechts een kleine fractie van het spectrum van mogelijk P-CaCl<sub>2</sub>-waarden. Deze test onderscheidt dus het meest consistent de deficiënte bodems van de bodems met voldoende P tussen verschillende jaren en bodems.

**(4):** De slaagkans op het correct voorspellen van de respons op de P-bemesting in bodems met bodem-P-testwaarden kleiner de  $P_{krit}$ .

**(5):** De kans op mislukken van het voorspellen van de respons op P-bemesting in bodem met bodem-P-waarden groter (of gelijk aan) de kritische waarden.

Voor criteria 4 en 5 waren de verschillen tussen de testen klein, maar de AL- en Olsen-extractie waren het best, aangezien de oxalaatextractie enkel goed scoorde op de kans op mislukken van het voorspellen van de respons maar slecht scoorde op de kans op het correct voorspellen van de P-respons.

Vanuit een praktisch standpunt is de kans op mislukken (25%) om deficiëntie te diagnosticeren vrij hoog en misschien moeilijk te verdedigen, maar dit is gerelateerd aan de keuze van de drempelwaarde (RO=95%). Observaties waarbij een RO < 95% wordt waargenomen gebeuren van nature uit al door variaties in het veld, zelfs wanneer er voldoende nutriënten worden toegevoegd. Een keuze van een RO = 80% is waarschijnlijk meer betekenisvol in deze analyse, maar kan praktisch niet aanvaardbaar zijn bij landbouwers. Omwille van deze redenen worden criteria 4 en 5 niet meegenomen in de eindexamen van de enkelvoudige bodem-P-testen.

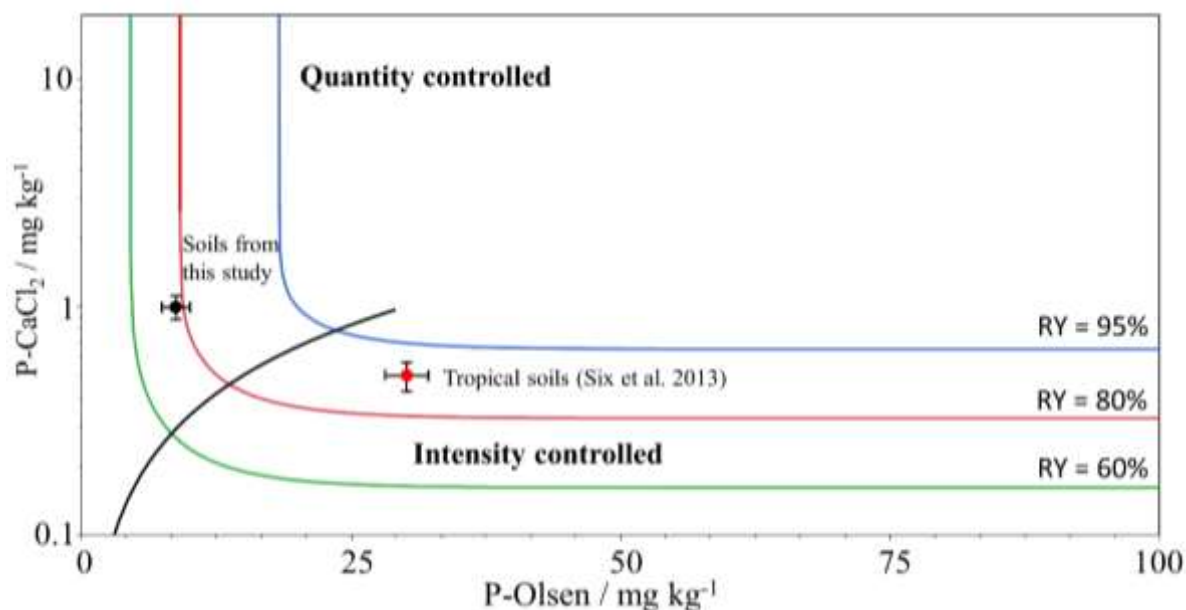
Er kan dus geen eenduidige conclusie genomen worden over welke test de beste is. Er kan wel duidelijk gesteld worden dat P-ox in het algemeen een slechtere test is. Testen die een maat zijn voor de kwantiteit waren beter in het fitten van de respons (criterium 1), terwijl de intensiteitstesten beter scoorden op de onzekerheden op de drempelwaarden (criterium 3).

#### *Combinatie van bodem-P-testen*

Een Mitscherlichmodel dat Q- en I-testen combineert, d.i. een niet-lineair respons oppervlaktemodel gebaseerd op twee contrasterende bodem-P-testen, wordt beschreven door:

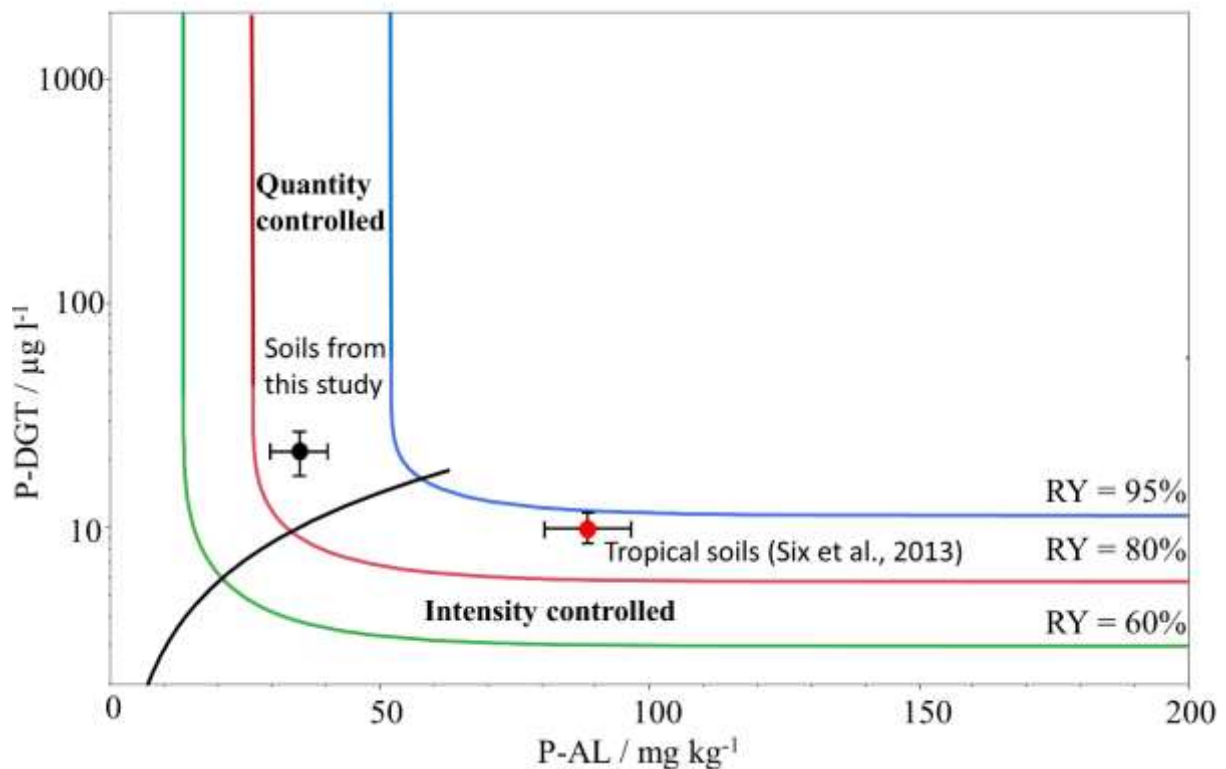
$$RY (\%) = b_0 + (100 - b_0) * (1 - \exp(-b_1 * P_{test_1}))(1 - \exp(-b_2 * P_{test_2})),$$

waarbij  $b_0$  het intercept is, en  $b_1$  en  $b_2$  parameters zijn overeenkomend met  $P_{test_1}$  en  $P_{test_2}$ . Dit model werd succesvol gefit op alle data gebaseerd op de Olsen- en  $CaCl_2$ -extractie als indicators voor Q en I respectievelijk. Andere Q-I combinaties werden getest, maar de beste fit werd bekomen voor de combinatie van Olsen en  $CaCl_2$ . Significante waarden van  $b_1$  en  $b_2$  werden bekomen (gebaseerd op hun 95% betrouwbaarheidsintervallen) en de  $R^2$  van het gecombineerd model (0.50) is marginaal groter dan dit van het Olsen model (0.49) of de  $CaCl_2$  (0.31). Dit respons oppervlaktemodel wordt weergegeven in 2D in Figuur 27 waarbij de contourlijnen de voorspelde RO voorstellen bij 95%, 80% en 60%, datapunten worden niet visueel weergegeven om het overzicht te bewaren. De zwarte lijn geeft de theoretische ratio weer van P-Olsen op P- $CaCl_2$  van 30. De figuur toont aan dat er twee zones te onderscheiden zijn die een invloed hebben op de RO met een kleine transitiezone: het boven linkerdeel waarbij een opbrengststijging enkel mogelijk is als P-Olsen stijgt, d.i. de opbrengst wordt gecontroleerd door de P-kwantiteit van de bodem, en visa versa, in het rechter beneden deel wordt de opbrengst gecontroleerd door de intensiteit. De transitiezone bevindt zich rond een P-Olsen op P- $CaCl_2$  ratio van 30. De meeste bodem-P-waarden van P-deficiënte bodems (RO < 80%) van deze studie bevinden zich in het Q-gecontroleerde deel en hebben een P-Olsen/P- $CaCl_2$  ≤ 20. De ratio in tropische bodems (RO < 80%) bestudeerd door Six et al. (2013) daarentegen was ongeveer 60, hetgeen boven de drempelwaarde van 30 is en zich in het I-gecontroleerde deel van de grafiek bevindt. In de laatstgenoemde studie was DGT superieur ten opzichte van andere bodem-P-testen. Dit verschil kan verklaard worden door bodemeigenschappen: niet enkel de lagere bodem-P-waarden maar ook de hogere Al-inhoud, lagere OM-inhoud en de lagere pH.



Figuur 27: Resultaten van de respons oppervlakteanalyse van de RO data. De Mitscherlich responscurve van de RO werd gefit op combinatie van twee verschillende bodem-P-testen (P-Olsen en P-CaCl<sub>2</sub>) hetgeen resulteerde in een model met een R<sup>2</sup> van 0.50. Op de figuur worden geen data weergegeven, enkel contourlijnen van RO (60%, 80% en 95%) worden weergegeven als een functie van de twee verschillende bodem P testen. De zwarte lijn geeft de theoretische ratio.(P-Olsen op P-CaCl<sub>2</sub>) weer van 30. Onder deze lijn, wordt P sterker gesorbeerd en is de gewasrespons volledig afhankelijk van de intensiteit van de bodem. De zwarte cirkel is het gemiddelde (foutenbalken geven de standaardfout weer) van de gemiddelde waarde van de Europese bodems in deze studie met RO < 80%. De rode cirkel is de overeenkomstige waarde voor tropische bodems (Six et al., 2013).

Eenzelfde resultaat als hierboven beschreven werd bekomen bij een combinatie van de AL-extractie en de DGT techniek (Figuur 28). Wanneer de analyse gedaan werd op een combinatie van de AL- en CaCl<sub>2</sub> extractie, kon het model niet gefit worden.



Figuur 28: Resultaten van de respons oppervlakteanalyse van de RO data. De Mitscherlich responscurve van de RO werd gefit op combinatie van twee verschillende bodem-P-testen (P-AL en P-DGT) hetgeen resulteerde in een model met een  $R^2$  van 0.49. Op de figuur worden geen data weergegeven, enkel contourlijnen van RO (60%, 80% en 95%) worden weergegeven als een functie van de twee verschillende bodem P testen. De zwarte lijn geeft de theoretische ratio.(P-AL op P-DGT) weer van 3500. Onder deze lijn, wordt P sterker gesorbeerd en is de gewasrespons volledig afhankelijk van de intensiteit van de bodem. De zwarte cirkel is het gemiddelde (foutenbalken geven de standaardfout weer) van de gemiddelde waarde van de Europese bodems in deze studie met RO < 80%. De rode cirkel is de overeenkomstige waarde voor tropische bodems (Six et al., 2013).

## 6.5 CONCLUSIE

Deze vergelijkende studie toont aan dat geen enkele van de zes bodemtesten superieur was aan de andere om de gewasopbrengst te verklaren bij P-gebrek. Naargelang de gehanteerde criteria werden andere volgordes bekomen. De oxalaatextractie was duidelijk inferieur ten opzichte van de andere testen. Geen enkele enkelvoudige bodem-P-test leverde één enkele kritische waarde (drempels van gebrek) geldig over verschillende proefvelden voor P, er blijft dus een aanzienlijke residuele onzekerheid. De P-CaCl<sub>2</sub>-test geeft echter de meest robuuste kritische drempels over bodems en jaren heen terwijl de Olsen-test zeer variabele drempels oplevert. De P-AL en P-Olsen hebben wel de beste  $R^2$  met gewasopbrengst. Significante verschillen in drempels tussen gewassen werden gevonden die aanduiden dat de behoefte aan beschikbaar P varieert naargelang gewas. De bekomen drempels van de P-AL kunnen ter indicatie worden vergeleken met de streefzones gehanteerd door de BDB. De hier gevonden drempels liggen lager dan de gehanteerde streefzone (120–180 mg/kg P-AL) in het huidig beoordelingssysteem (uitgezonderd voor vlas en aardappel). In praktijk moet er echter rekening gehouden worden met gewasrotatie, waardoor het praktisch onmogelijk is om streefwaarden per gewas te hanteren, maar waarbij een streefzone moet worden nagestreefd. Wanneer een bodem zich binnen deze streefzone bevindt, kan mits een beredeneerde gewasafhankelijke bemesting een optimale opbrengst bekomen worden voor alle gewassen.

Een indirecte analyse suggereerde dat intensiteitstesten zoals DGT of CaCl<sub>2</sub>-extractie het niet merkant beter doen dan Q-testen (P-Olsen, P-AL). Dit is in tegenstelling tot recente studies (Mason et al., 2010; Six et al., 2013; Speirs et al., 2013). Vermoedelijk werden die recente studies uitgevoerd in bodems met

een zeer sterke fixatie of sorptie van P terwijl dit in de jonge, Europese bodems niet zo groot is als in sterk P-deficiënte en sterk verweerde bodems.

Om na te gaan of een combinatie van 2 bodem-P-testen tot een beter resultaat leidt, werden alle combinaties van kwantiteits- en intensiteitsmetingen getest. De beste fit werd bekomen voor de combinatie van Olsen en  $\text{CaCl}_2$ .



## 7 DWP 1.4: KOLOMPROEVEN I.F.V. OVERSCHRIJDEN VAN MILIEUDREMPELS BIJ P-UITLOGING UIT BODEMS

### 7.1 INLEIDING

Bij de selectie van de fosforbeschikbaarheidsindices moet de **geschiktheid van de fosforbeschikbaarheidsindex om kritische fosforverliezen te detecteren**, in rekening worden gebracht. Daarom worden kolomproeven uitgevoerd waarbij fosforconcentraties in de uitspoelingsoplossing van een reeks contrasterende bodems (textuur en fosforbeschikbaarheid) worden gerelateerd aan de verschillende mogelijke fosforbeschikbaarheidsindices. Ook hier is het dus de vraag of een intensiteits-, capaciteitsmeting of een combinatie van beiden het meest geschikt zijn om de fosforbeschikbaarheid voor uitspoeling te weerspiegelen. Er worden nog geen kritische waarden voor fosforbeschikbaarheid voor het milieu afgeleid (pas in luik 2).

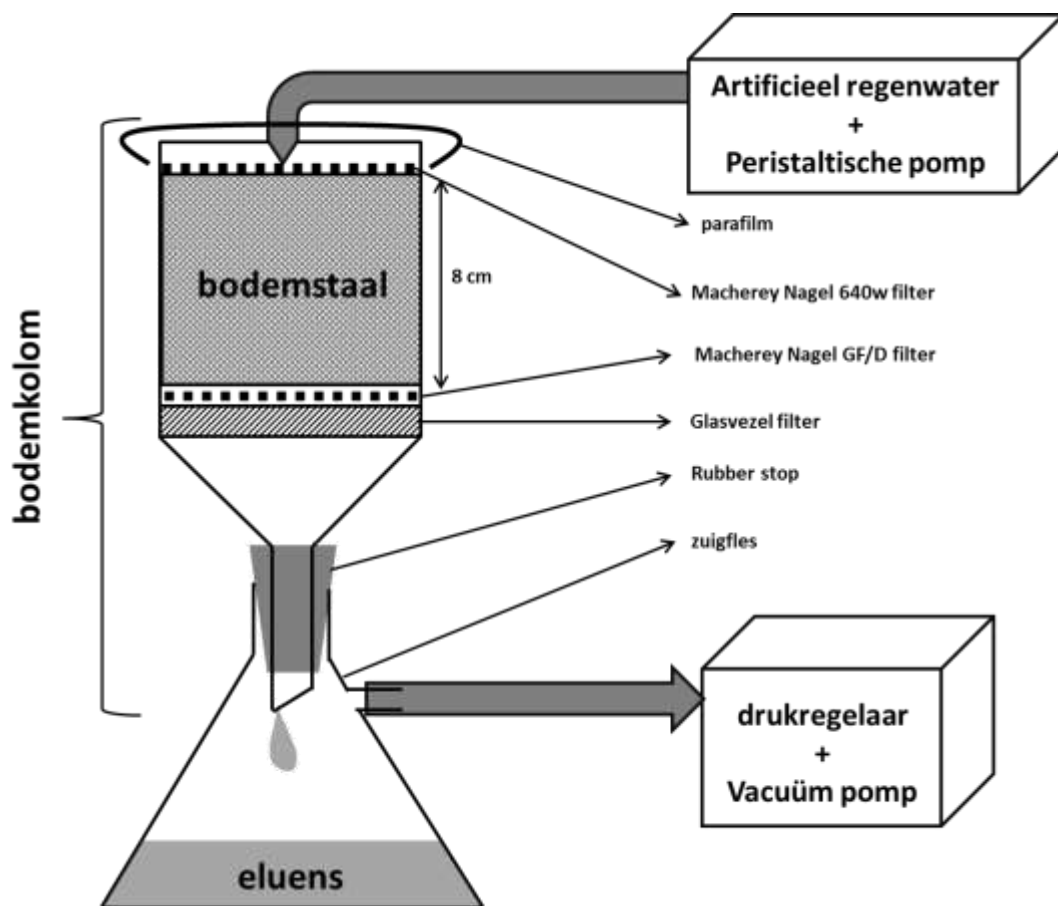
### 7.2 MATERIAAL EN METHODEN

In 2016 werden kolomproeven met 21 verschillende bodems in drievoud uitgevoerd. De opzet van het kolomexperiment is gebaseerd op Lookman (1995) waarbij specifiek uitspoeling wordt gemeten bij onverzadigde condities (veldcapaciteit,  $\psi = -10\text{kPa}$ ).

Er werd bodem verzameld van de bouwvoor (0-30 cm) om daarmee drie verse gestoorde bodemkolommen (drie herhalingen) in het labo op te stellen. De bodem werd vochtig gezeefd (2 cm) waarbij plantenmateriaal, stenen en wormen werden verwijderd zonder de bodem te drogen en zonder micro-aggregaten te vernietigen. Het vochtgehalte van de bodem werd bepaald, waarna het equivalent vochtige bodem van 1,374 kg droge bodem in een kolom (ROBU<sup>®</sup>, glasfilter) werd geplaatst (Figuur 29). De diameter van de kolommen is 12,5 cm, de hoogte is 8 cm. Op deze manier werd een bulkdensiteit van 1,4 kg dm<sup>-3</sup> bekomen voor alle bodems. Met een geschatte partikeldensiteit van 2,65 kg dm<sup>-3</sup> werd het porievolume op 47,2% geschat, oftewel 463,1 ml porievolume (PV) per kolom.

De bodemkolommen werden met behulp van een peristaltische pomp (Watson Marlow 503S/RL) continu bedruppeld met artificieel regenwater aan een debiet van gemiddeld 3,5 mm/dag (1,7-5,1 mm/dag). Het synthetisch regenwater had een concentratie van 0,02 mM SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 0,04 mM Cl<sup>-</sup>, 0,02 mM Ca<sup>2+</sup>, 0,003 mM K<sup>+</sup>, 0,02 mM Na<sup>+</sup> en een pH van 5,45. Deze samenstelling is gebaseerd op de samenstelling van artificiële regen gebruikt door Lookman (1995) en op de samenstelling van regen dichtbij Chimay (België) gemeten door André et al. (2007).

Een Macherey-Nagel 640w papierfilter bovenop de bodemkolommen zorgde ervoor dat het bedruppelde regenwater goed verdeeld werd over het bodemoppervlak en voorkwam preferentiële stroming in de kolom. Nadat het regenwater door de bodemkolom was gelopen, passeerde het nog een Macherey Nagel GF/D filter en een glasvezelfilter (10-16 µm).



Figuur 29. Schematische voorstelling van de proefopzet voor het uitloogexperiment (Vanden Nest *et al.*, 2014)

Onderaan werd een onderdruk van 10 kPa aangelegd met behulp van een vacuümpomp (Becker) en digitale drukmeter (KNF Neuberger) om de zuigspanning van onderliggende bodem na te bootsen (Figuur 29). Daarmee wordt ook voorkomen dat bodemverzadiging optreedt wat zou kunnen resulteren in zuurstofgebrek en de ermee gepaard gaande ongewenste ijzerreductie en verhoogde fosfervrijstelling. Percolerend bodemvocht werd onderaan opgevangen in aangesloten erlenmeyers. Het volledige systeem werd in het donker geïnstalleerd bij een constante temperatuur van  $18,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Het percolatiewater werd twee keer per week bemonsterd en deels gefilterd ( $0,45 \mu\text{m}$ , MN Chromafil GF/P-45/25). Zowel de gefilterde als niet gefilterde percolaten werden geanalyseerd op fosfor-, koolstof-, ijzer-, calcium- en aluminiumconcentraties met ICP-OES. Na vier weken werd de uitloging stopgezet, tenzij de uitloegende fosforconcentratie nog niet gestabiliseerd was. Uiteindelijk percoleerde 1,5 tot 4,5 porievolumes (PV) door de kolommen.

De bodems waarmee de kolomproeven werden uitgevoerd variëren in textuur (zand, zandleem en leem) en fosforgehalte (Tabel 40). Naast de standaard bodemeigenschappen (pH-KCl en %OC) en de batterij bodemfosfortesten werd ook het calcium- (AL-extract), ijzer- (AL- en ox-extract) en aluminiumgehalte (ox-extract) in de bodems geanalyseerd.

De statistische analyse van de resultaten werd uitgevoerd met het dataverwerkingsprogramma JMP (SAS).

Tabel 40. Eigenschappen van de bodems gebruikt in de kolomproeven

Nr bodem	Gemeente	Grondsoort	pH-KCl	%OC	P-AL (mg P/kg)
K1	Geraardsbergen	Leem	6,62	1,60	51
K2	Brakel	Leem	5,97	0,98	80
K3	Laarne	Zand	5,06	2,20	134
K4	Melle	Zandleem	6,12	1,04	195
K5	Merelbeke	Zandleem	5,46	1,79	48
K6	Kanne	Leem	6,66	1,44	67
K7	Tielt-Winge	Lichte leem	5,7	1,25	106
K8	Tongeren	Lichte leem	6,18	1,21	147
K9	Oosterzele	Zandleem	5,44	5,44	149
K10	Oosterzele	Zandleem	4,75	4,11	79
K11	Neerpelt	Zand	4,70	1,59	256
K12	Deinze	Zandleem	3,81	0,90	133
K13	Neerpelt	Zand	5,77	1,74	166
K14	Neerpelt	Zand	5,29	2,41	171
K15	Sint-Lievens-Esse	Leem	6,53	1,41	308
K16	Herzele	Leem	6,52	1,33	154
K17	Deinze	Zand	3,92	1,45	42
K18	Waregem	Zand	5,24	1,68	73
K19	Overmere	Zand	3,84	1,82	240
K20	Merelbeke	Zandleem	6,21	3,74	310
K21	Merelbeke	Zandleem	5,49	0,92	240

## 7.3 RESULTATEN

### 7.3.1 Correlatie tussen bodemfosfortesten

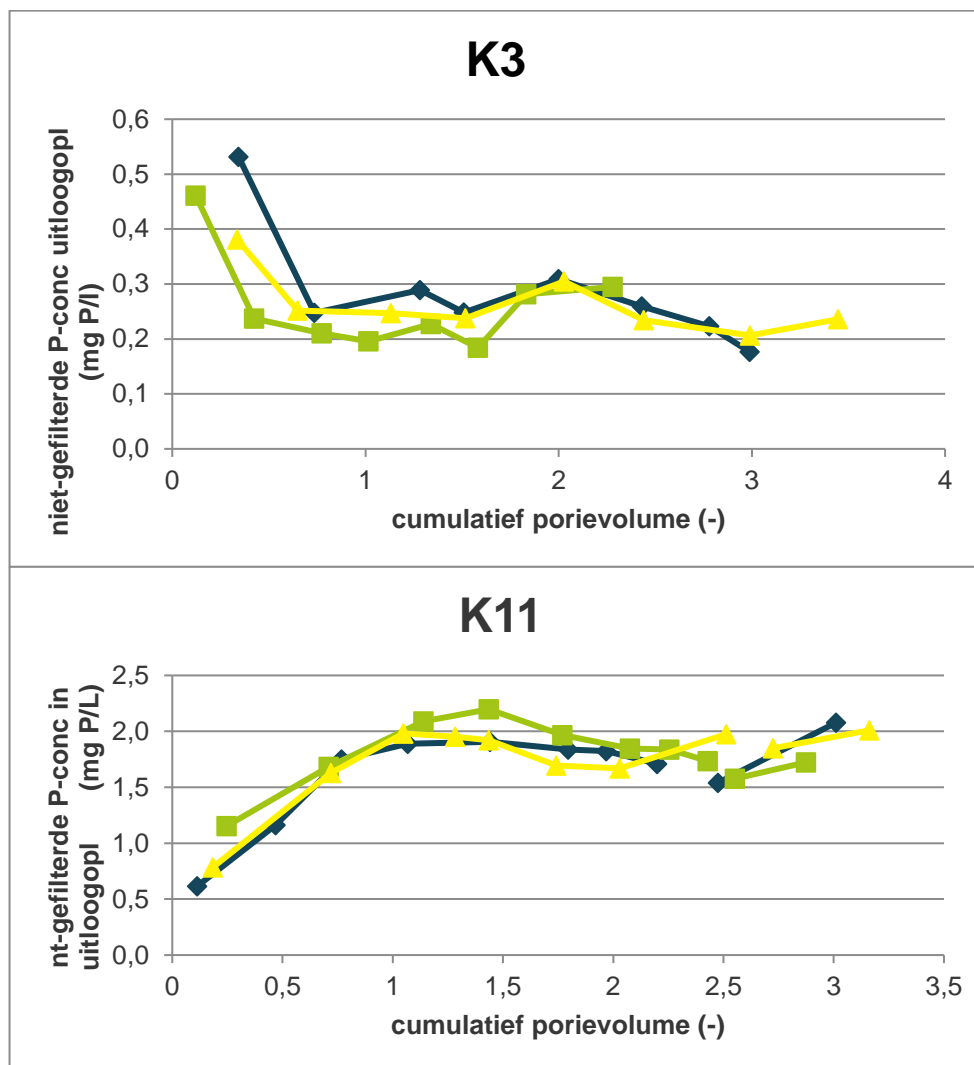
Alle zes de bodemfosfortesten zijn sterk gecorreleerd ( $p < 0,001$  voor alle combinaties) voor de geanalyseerde 21 bodems (Tabel 41).

Tabel 41. Correlatiecoëfficiënten  $r$  voor correlaties tussen de verschillende bodemfosfortesten voor 21 bodems van de kolomproef. Alle correlaties zijn statistisch significant ( $p < 0,001$ )

	P-AL	P-ox	FVG	P-Olsen	P-CaCl <sub>2</sub>	P-DGT
P-AL	1	0,71	0,89	0,87	0,72	0,85
P-ox		1	0,57	0,65	0,76	0,66
FVG			1	0,84	0,60	0,76
P-Olsen				1	0,55	0,67
P-CaCl <sub>2</sub>					1	0,83
P-DGT						1

### 7.3.2 Evolutie naar evenwichtconcentratie

Voor sommige bodems daalt en voor andere bodems stijgt de fosforconcentratie in de uitloogoplossing gedurende de uitloging van de eerste porievolumes, maar voor alle bodems stabiliseert de uitloogende fosforconcentratie na 1 tot 4 porievolumes (Figuur 30). Ook voor de andere gemeten elementen (Ca, Al, Fe en C) stabiliseert de concentratie in de uitloogoplossing na 1-4 porievolumes (details niet getoond). De gefilterde fosforconcentratie was beperkt lager dan de niet-gefilterde fosforconcentratie (gemiddelde 92%) en volgde dezelfde trend.



Figuur 30. Niet-gefilterde fosforconcentratie in de uitloogende oplossing van 2 bodems van de kolomproef in functie van het cumulatief porievolume. De verschillende kleuren zijn de drie herhalingen per bodem. Voor bodem 11 (K11, onderaan) werd een stopflow uitgevoerd. Waar de lijn van de P-concentratie onderbroken is, werd gedurende 6 dagen geen aanvoer van regenwater toegepast.

De gemiddelde uitloogende fosforconcentratie van een bodem werd bepaald door de uitgelogde fosforhoeveelheid cumulatief uit te zetten ten opzichte van het cumulatief volume doorgelopen percolatiewater. De richtingscoëfficiënt van deze curve is dan het gewogen gemiddelde van de uitloogende fosforconcentratie voor deze bodemkolom. Dit gewogen gemiddelde wordt als resultaat van de kolomproef gebruikt om te relateren aan de verschillende bodemfosfortesten.

Om na te gaan of de fosforconcentratie in de uitloogoplossing in evenwicht is met de bodem, werd op het einde van de kolomproef voor 3 bodems (9 kolommen) de aanvoer van artificeel regenwater gedurende 6 dagen gestopt. Na deze 6 dagen werd de aanvoer terug opgestart en werd de uitloogende fosforconcentratie gedurende een verdere week bepaald. Deze bleek niet verschillend te zijn van de fosforconcentratie in de uitloogoplossing vóór het stoppen van de aanvoer van het

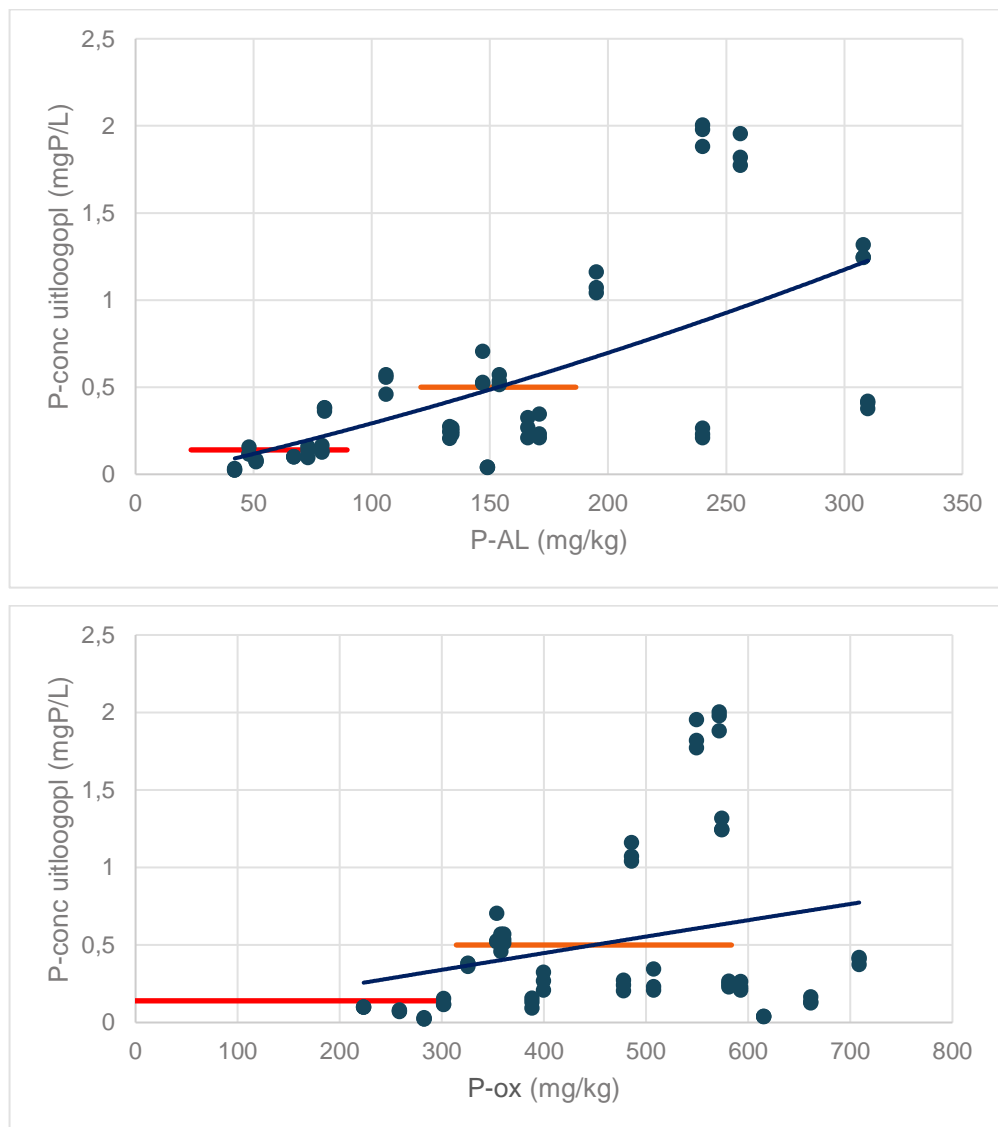
regenwater (Figuur 30 onderaan). De fosforconcentratie bleek dus niet gewijzigd door de langere verblijftijd in de bodemkolom, dit wijst op een evenwicht bij het heersende percolatiedebiet.

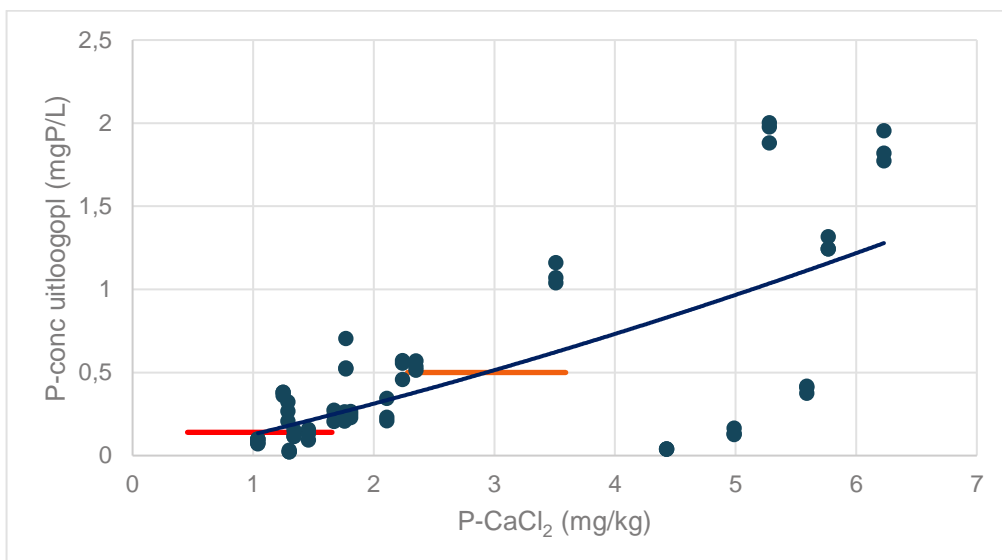
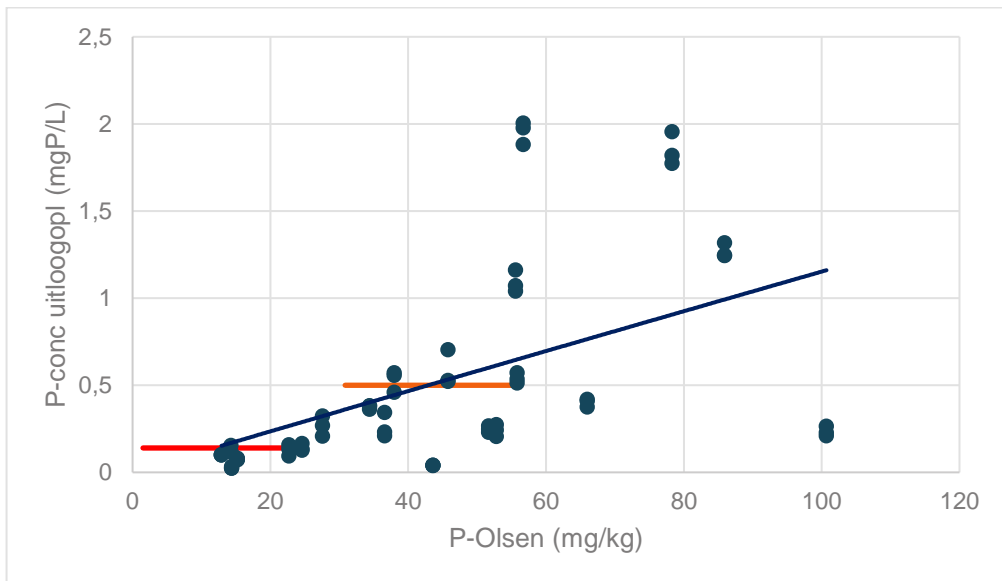
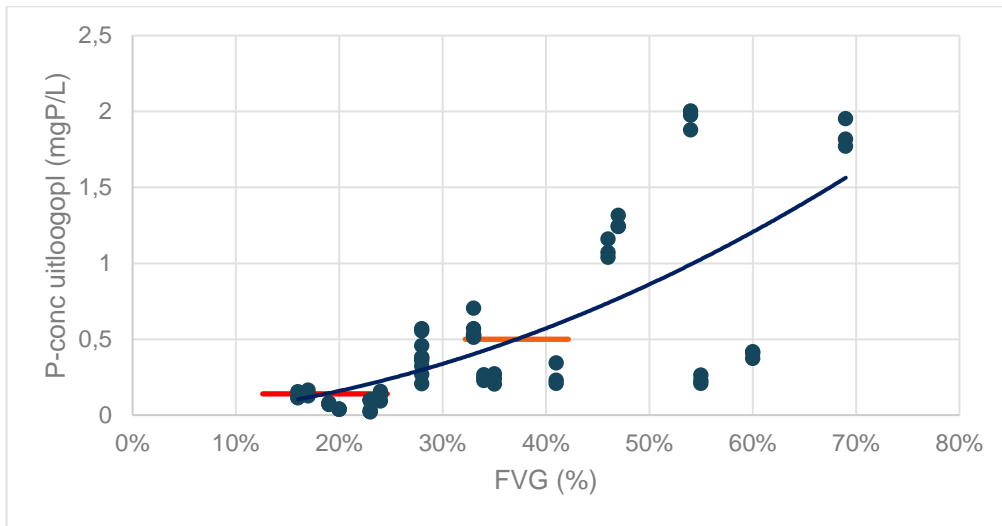
### 7.3.3 Uitlopende fosforconcentratie versus fosforbeschikbaarheid

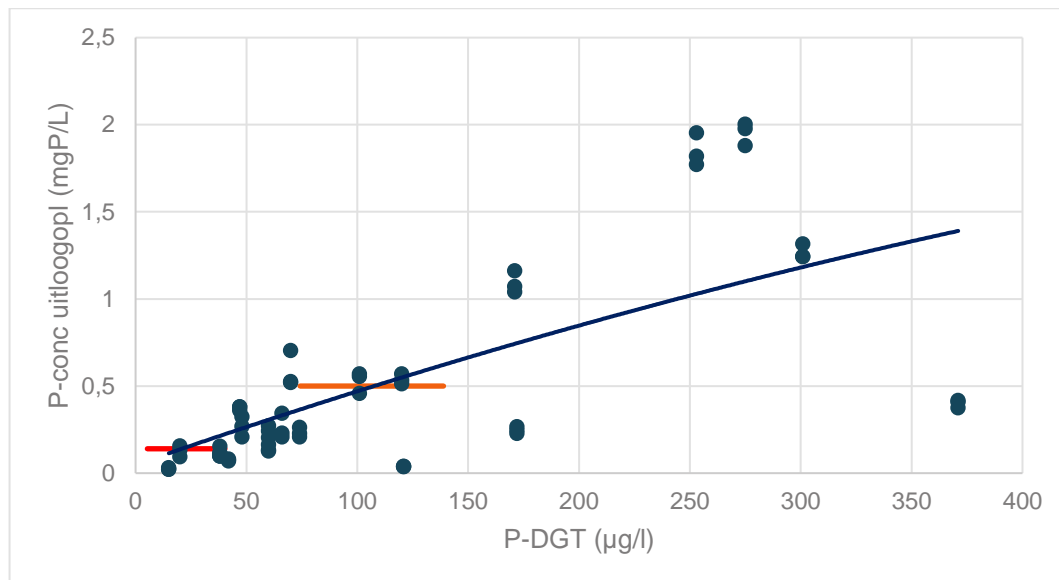
Per fosforbeschikbaarheidstest wordt de fosforconcentratie in het percolerend bodemvocht (gewogen gemiddelde, zie 7.3.2) uitgezet in functie van de fosforbeschikbaarheid (Figuur 31). Om na te gaan welke fosforbeschikbaarheidstest het best kan gebruikt worden voor het voorspellen van het uitloegriscico wordt een model gefit op de gemeten data. Daarvoor wordt het Freundlich-sorptiemodel gebruikt:

$$\text{Fosforbeschikbaarheid} = k * (\text{uitloogconcentratie})^n$$

met k en n modelparameters. Dit model kan zowel gefit worden op alle data, of voor de 3 texturen afzonderlijk.







Figuur 31. Uitloegende fosforconcentratie (niet gefilterd, mg P/L) van de bodemkolommen in functie van de fosforbeschikbaarheid gemeten door 6 bodemfosfortesten (van boven naar onder: P-AL, P-ox, FVG, P-Olsen, P-CaCl<sub>2</sub> en P-DGT). Datapunten: •, modelfit (Freundlich): ononderbroken lijn. Het 95% betrouwbaarheidsinterval van de gefitte kritische fosforbeschikbaarheid wordt weergegeven in rood (kritische fosforuitloegconcentratie van 0,14 mg P/L) en in oranje (kritische fosforuitloegconcentratie van 0,5 mg P/L).

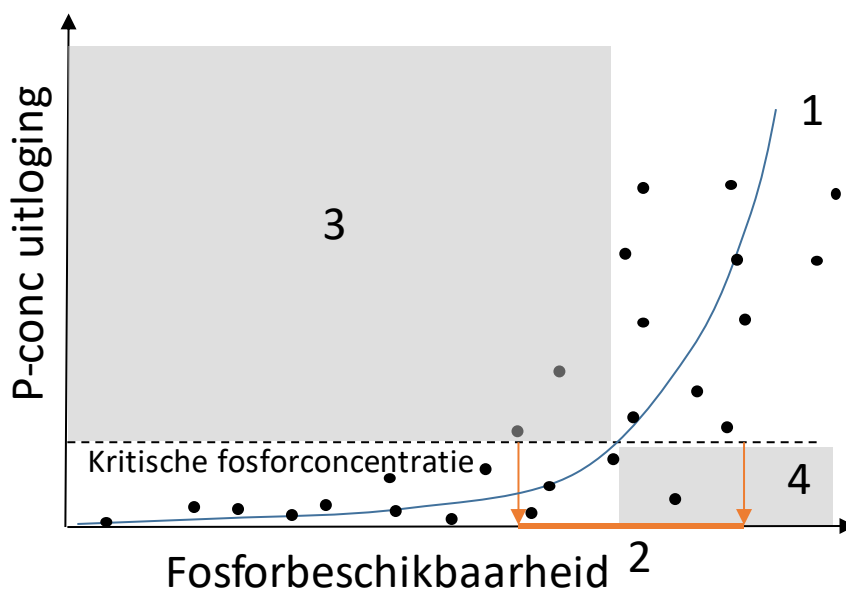
### 7.3.4 Evaluatie van de bodemfosfortesten

#### 7.3.4.1 Criteria voor evaluatie

De geschiktheid van een fosforbeschikbaarheidstest voor het voorspellen van fosforuitloging kan op verschillende manieren nagegaan worden, zoals ook uitgevoerd voor de geschiktheid voor het voorspellen van de relatieve gewasopbrengst (zie Figuur 32).

1. Hoe goed is de fit van het model, is de restvariatie beperkt? Een test scoort hoger naargelang de root mean square error (RMSE) lager is (punt 1 in Figuur 32)
2. Hoe klein is de variatie van de fosforbeschikbaarheid rond de kritische waarde voor fosforuitloging? Hoe kleiner het betrouwbaarheidsinterval of de standaardfout relatief ten opzichte van de kritische fosforbeschikbaarheid (=gefitte fosforbeschikbaarheid bij de opgegeven kritische fosforconcentratie in het uitloegwater), hoe beter de test scoort (punt 2 in Figuur 32). Als kritische fosforconcentratie werd gekozen voor 0,14 mg P/l, de norm voor totaal fosfor in Vlaams oppervlaktewater. Deze waarde is echter vrij laag in vergelijking met de waargenomen uitloegende fosforconcentraties (Figuur 31). Uitloegend bodemwater dat na het verlaten van de bovenste 8 cm bodem richting oppervlaktewater migreert, passeert in de diepere bodemlagen nog verschillende vastlegingsmogelijkheden. Daardoor zal de fosforconcentratie in het uitloegend kolomwater steeds hoger zijn dan in het water dat uiteindelijk in het oppervlaktewater terecht komt. Hoeveel de concentratiedaling bedraagt, hangt sterk af van de afgelegde weg en de fosforbeschikbaarheid in de onderliggende bodemlagen. Er werd daarom, naast de oppervlaktewaternorm, gekozen voor een algemene alternatieve kritische waarde van 0,5 mg P/l. Deze waarde is niet gerelateerd aan een milieunorm en is louter bedoeld om de fosfortesten te kunnen evalueren, niet om kritische waarden voor bodemfosfor af te leiden.
3. Aantal vals positieve waarnemingen: percentage van de bodems dat volgens het model als veilig beschouwd wordt (= fosforbeschikbaarheid beneden de gefitte kritische waarde) maar in werkelijkheid wel een milieurisico vormen (= fosforconcentratie in het uitloegwater boven de kritische waarde). Hoe kleiner dit percentage, hoe beter de test scoort (punt 3 in Figuur 32).

4. Aantal vals negatieve waarnemingen: percentage van de bodems dat volgens het model als een risico voor het milieu worden beschouwd (= fosforbeschikbaarheid boven de gefitte kritische waarde) maar in werkelijkheid een fosforconcentratie in het uitloogwater beneden de kritische waarde vertonen. Hoe kleiner dit percentage, hoe beter de test scoort (punt 4 in Figuur 32).



Figuur 32. Vier criteria om de geschiktheid van de fosforbeschikbaarheidstest te evalueren. 1. Hoe goed is de fit van het model (RMSE). 2. Breedte van het betrouwbaarheidsinterval van de gefitte kritische fosforbeschikbaarheid. 3. Percentage vals positieve bodems. 4. Percentage vals negatieve bodems.

#### 7.3.4.2 Kritische fosforbeschikbaarheid

De kritische fosforbeschikbaarheid in de bodem wordt voor de verschillende testen weergegeven in Tabel 42 en in Figuur 31, en dit zowel voor een kritische fosforconcentratie in het uitloogwater van 0,14 mg/L als voor 0,50 mg/L (inclusief betrouwbaarheidsinterval). Deze kunnen in de tabel ook vergeleken worden met de kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstderiving (95% relatieve opbrengst, zie DWP 1.3). Voor alle testen is de kritische fosforbeschikbaarheid voor overschrijding van 0,14 mg/L in het uitloogwater lager dan de kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstderiving (Tabel 42). De fosforconcentratie in het bodemvocht zal echter nog sterk dalen vanaf de diepte van 8 cm onder het oppervlak (hoogte kolommen) tot aan het oppervlaktewater. Daarom zal voor het afleiden van de kritische fosforbeschikbaarheid (en bij uitbreiding de streefzone voor fosforbeschikbaarheid) voor het milieu in luik 2 op een andere manier te werk gegaan worden (zie luik 2).



Tabel 42. Kritische fosforbeschikbaarheid voor risico op fosforuitloging (0,14 mg/L en 0,5 mg/L) en op opbrengstderving (95% relatieve opbrengst, zie DWP 1.3) met hun betrouwbaarheidsinterval tussen haakjes, bepaald voor de zes bodemfosfortesten op basis van modelfit met JMP (zie tekst).

Fosfor-beschikbaarheid	P-AL (mg/kg)	P-ox (mg/kg)	FVG <sup>§</sup> (%)	P-Olsen (mg/kg)	P-CaCl <sub>2</sub> (mg/kg)	P-DGT (µg/L)
Kritische waarde voor 0,14 mg/L	57 (24-89)	119 (-59-296)	19 (13-25)	12 (2-22)	1,1 (0,5-1,7)	23 (5-40)
Kritische waarde voor 0,5 mg/L	154 (121-186)	449 (314-584)	37 (32-42)	43 (31-55)	2,9 (2,3-3,6)	107 (74-139)
Kritische waarde voor 95% relatieve opbrengst	73 (64-81)	310 (260-360)	24 (21-36)	19 (17-22)	1,7 (1,5-1,9)	33 (27-38)

<sup>§</sup> Bepaald voor alle bodems (niet alleen voor kalkarme zandbodems)

### 7.3.4.3 Algemene evaluatie van de bodemfosfortesten

In Tabel 43 wordt de geschiktheid van de verschillende fosforbeschikbaarheidstesten weergegeven op basis van de verschillende criteria. Hierbij werd voor FVG gebruik gemaakt van de data van alle bodems, niet alleen van kalkarme zandbodems. Preliminair resultaten uit het doctoraat van Ruben Warrinnier (KU Leuven) wijzen op gelijkaardige relaties tussen FVG en uitlogende fosforconcentraties voor zowel kalkarme zandbodems als voor andere bodems. De analyses per textuur worden verder besproken (7.3.5).

Tabel 43. Geschiktheid van de verschillende fosforbeschikbaarheidstesten voor het voorspellen van fosforuitloging met behulp van kolomproeven op 21 bodems. De geschiktheid kan beoordeeld worden op basis van verschillende criteria (zie tekst en Figuur 32). (RMSE: root mean square error)

	kritische P (mg/l)	P-AL (mg/kg)	P-ox (mg/kg)	FVG* (%)	P-Olsen (mg/kg)	P-CaCl <sub>2</sub> (mg/kg)	P-DGT (µg/l)	P-AL/Fe-AL (%)
<b>RMSE</b>		0,43	0,54	0,39	0,47	0,42	0,40	0,37
<b>st.fout/pred</b>	0,14	29%	75%	16%	44%	28%	38%	23%
<b>kritische P-beschikbaarheid</b>	0,5	11%	15%	7%	14%	11%	15%	10%
<b>vals positief</b>	0,14	2%	0%	3%	0%	0%	2%	5%
	0,5	8%	13%	13%	3%	13%	8%	5%
<b>vals negatief</b>	0,14	16%	29%	22%	29%	19%	21%	5%
	0,5	19%	33%	14%	24%	14%	14%	16%

\* Bepaald voor alle bodems (niet alleen voor kalkarme zandbodems)

#### RMSE

De RMSE neemt toe, en de geschiktheid van de test neemt af volgens

FVG < P-DGT < P-CaCl<sub>2</sub> < P-AL < P-Olsen < P-ox.

*Relatieve breedte van het betrouwbaarheidsinterval van de predictie van kritische fosforbeschikbaarheid*

De standaardfout op de predictie van de kritische fosforbeschikbaarheid, relatief ten opzichte van de predictie neemt toe, en de geschiktheid van de test neemt af volgens

$FVG < P-CaCl_2 \approx P-AL < P-DGT \approx P-Olsen < P-ox$ ,

min of meer gelijkaardig voor beide kritische fosforconcentratie in uitloging. De relatieve breedte van het betrouwbaarheidsinterval is beduidend groter voor 0,14 mg P/L dan voor 0,5 mg P/L.

#### *Relatief aantal vals positieve waarnemingen*

Bij 0,14 mg P/L als kritische fosforconcentratie zijn er enkel bij P-AL (2%), FVG (3%) en P-DGT (2%) vals positieve waarnemingen. Bij 0,5 mg P/L als kritische fosforconcentratie neemt het relatief aantal vals positieve waarnemingen toe en de geschiktheid van de test af volgens

$P-Olsen < P-AL \approx P-DGT < FVG \approx P-CaCl_2 \approx P-ox$ .

#### *Relatief aantal vals negatieve waarnemingen*

Bij 0,14 mg P/L als kritische fosforconcentratie neemt het relatief aantal vals negatieve waarnemingen toe en de geschiktheid van de test af volgens

$P-AL < P-CaCl_2 < P-DGT < FVG < P-Olsen \approx P-ox$ .

Bij 0,5 mg P/L als kritische fosforconcentratie neemt het relatief aantal vals negatieve waarnemingen toe en de geschiktheid van de test af volgens

$FVG \approx P-CaCl_2 \approx P-DGT < P-AL < P-Olsen < P-ox$ .

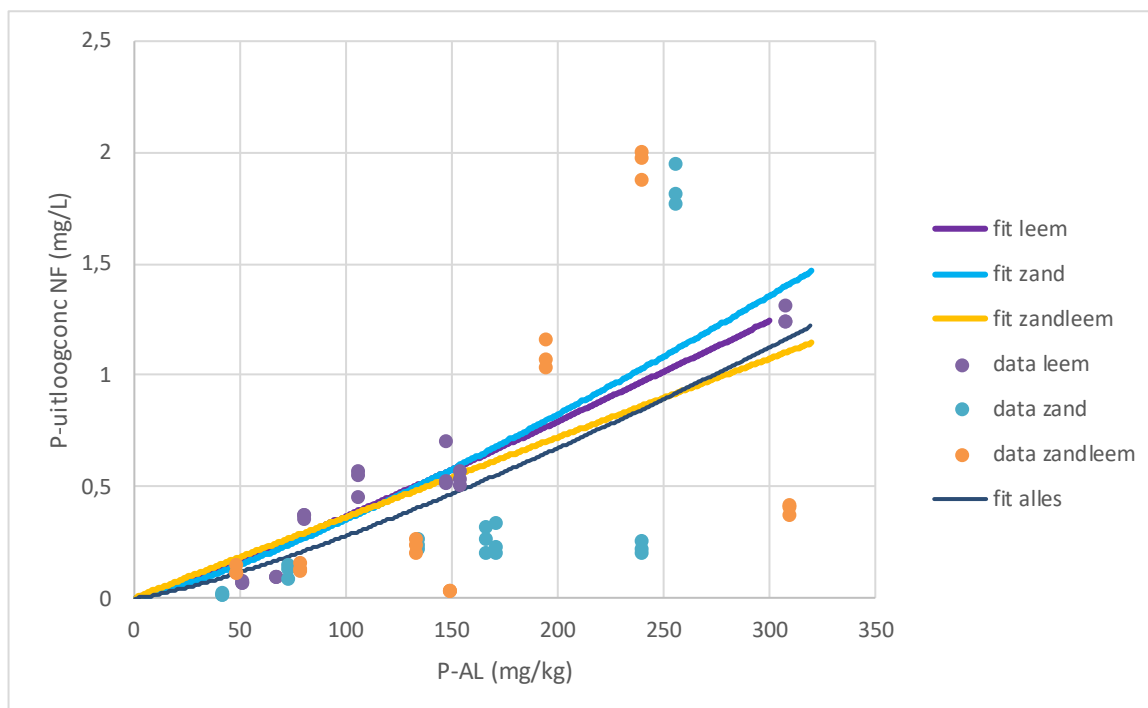
#### *Algemene evaluatie*

Er zijn geen uitgesproken verschillen in de geschiktheid van de bodemtesten. De FVG scoort vaak goed, maar komt niet voor alle criteria als winnaar uit de bus. P-DGT, P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL scoren algemeen gezien gelijkaardig, maar de score hangt af van het gekozen belangrijkste criterium. P-Olsen scoort minder goed (met uitzondering van het aantal vals positieve waarnemingen), en P-ox presteert het minst goed van alle fosfortesten.

### **7.3.5 Invloed van bodemtextuur**

De bodemkolomproeven werden op een gelijk aantal zand-, zandleem- en leembodems uitgevoerd. De analyse kan per test ook nog eens opgesplitst worden per textuur. Het aantal datapunten wordt dan wel beperkt (7 bodems, 21 kolommen per textuur), wat de standaardfout soms sterk doet toenemen.

In Figuur 33 worden de waarnemingen en de fit van de drie bodemtexturen voor bodemtest P-AL weergegeven. In Tabel 44 wordt eveneens voor P-AL de predictie van de kritische fosforbeschikbaarheid bij 0,14 en 0,5 mg P/L uitloging voorgesteld voor de drie bodemtexturen apart en samen. Uit deze tabel is duidelijk dat de betrouwbaarheidsintervallen voor de predicties van de verschillende texturen ruim overlappen en dat het vastleggen van een kritische fosforbeschikbaarheid per textuur weinig zinvol is. Voor de andere bodemfosfortesten werden gelijkaardige waarnemingen gedaan (geen details weergegeven).



Figuur 33. Fosforconcentratie in de uitloogoplossing in functie van P-AL waargenomen in de kolomproeven (•) en gefit met het Freundlich-model met behulp van JMP, voor de 3 bodemtexturen apart en samen uitgevoerd.

Tabel 44. Predictie van de kritische fosforbeschikbaarheid (P-AL) voor uitloging bij 0,14 mg P/L en 0,5 mg P/L (niet gefilterd) en het betrouwbaarheidsinterval, (BI; 95%) gefit met JMP voor de 3 bodemtexturen apart en samen

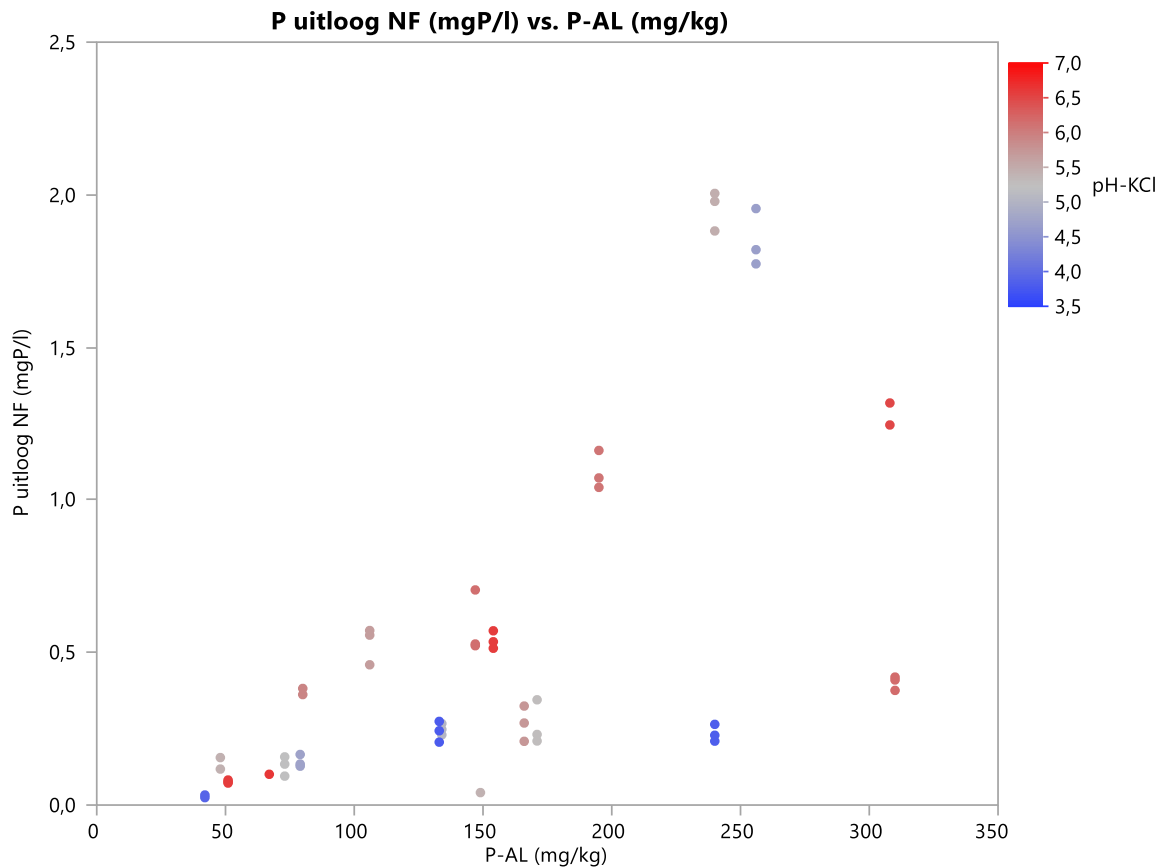
Kritische fosforuitloging	Bodemtextuur	Predictie	Onderste grens BI	Bovenste grens BI
0,14 mg P/L	Leem	42	31	53
	Zand	47	-32	116
	Zandleem	38	-39	115
	Alles	57	24	89
0,5 mg P/L	Leem	132	119	146
	Zand	133	62	203
	Zandleem	138	44	232
	Alles	154	121	186

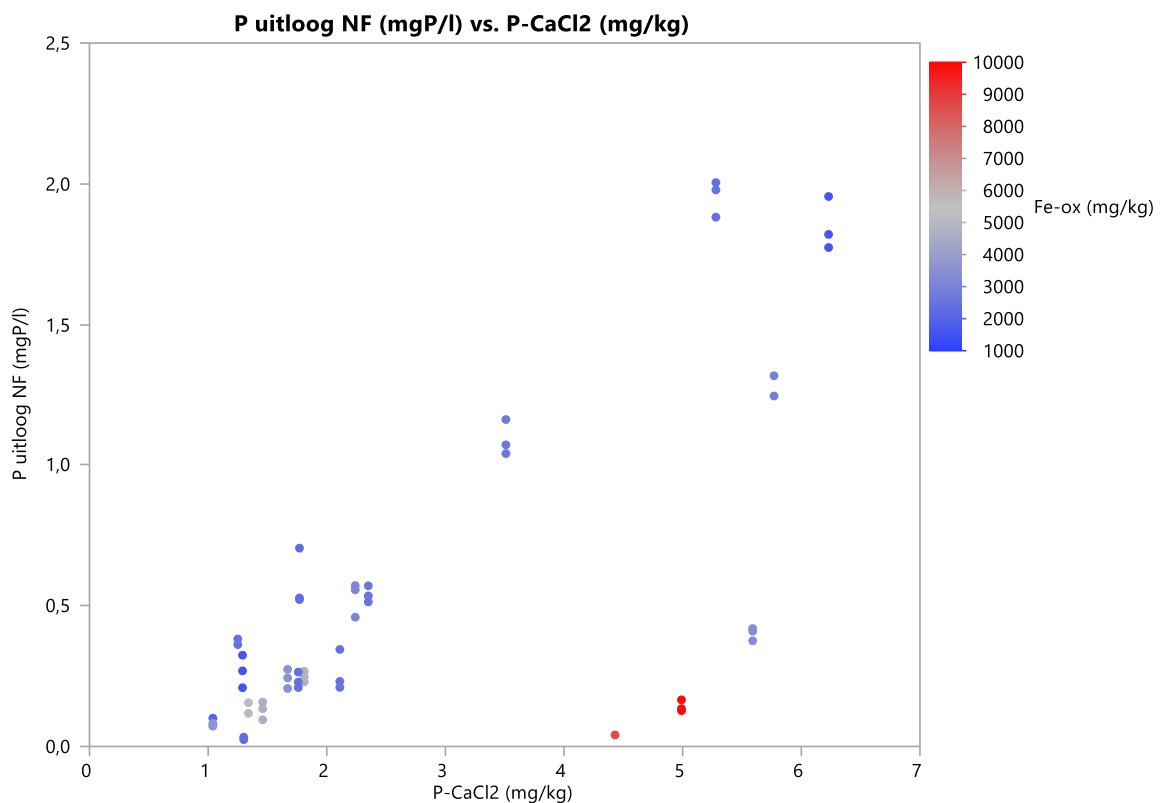
### 7.3.6 Invloed van bodemeigenschappen

Naast bodemtextuur kunnen ook andere bodemeigenschappen de uitloging van fosfor bepalen. Dit is reeds duidelijk uit het feit dat FVG als bodemtest beter scoort dan P-ox voor het modelleren van de fosforconcentratie in de uitloogoplossing. Bij FVG wordt P-ox gecorrigeerd voor het Fe- en Al-gehalte in de bodem. Ijzer en aluminium zijn belangrijke componenten voor de vastlegging van fosfor in de bodem. Mogelijk kan het inzetten van (andere) bodemeigenschappen die fosforuitloging bepalen, het modelleren van de uitloogconcentratie nauwkeuriger maken. Om dit te testen, werd eerst met behulp van de Graph Builder van JMP de uitloogconcentratie ten opzichte van de verschillende bodemfosfortesten uitgezet, en werden de bodemeigenschappen (pH-KCl, %OC, Al-, Ca- en Fe-gehalte) met behulp van een kleurencode ingebracht. Op de voorbeelden in Figuur 34 is zo te zien dat de invloed van pH-KCl variabel is, maar dat Fe-ox meer bepalend is voor de fosforuitloging. Zo werden Ca-AL, Fe-AL, Fe-ox en Al-ox geselecteerd als mogelijk bepalende

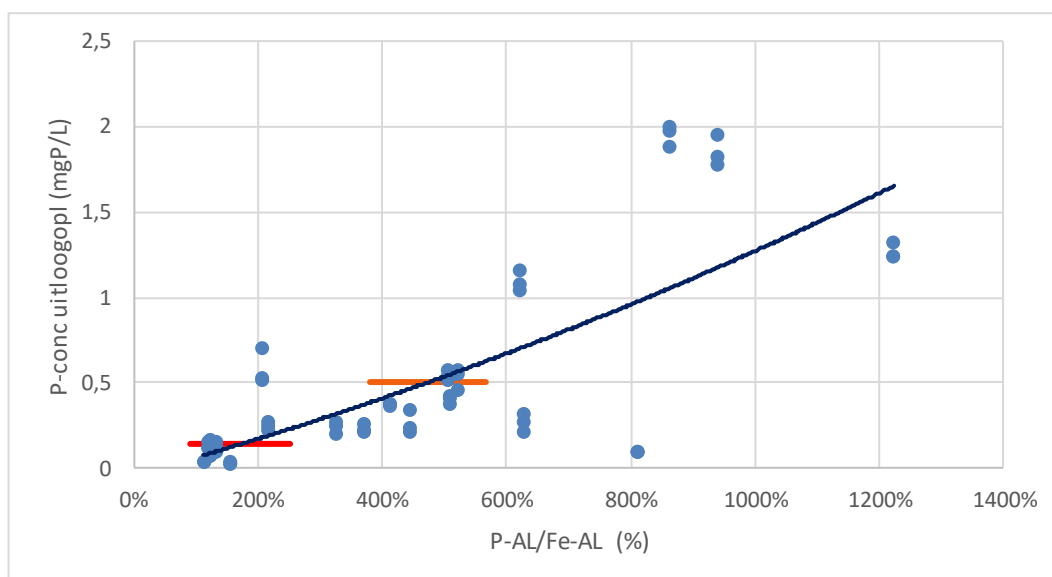
bodemeigenschappen om de modelfit van de uitloogconcentratie in functie van de fosforbeschikbaarheid verder te verbeteren.

Om het nut van het meenemen van additionele bodemeigenschappen verder te evalueren, werd de modellering in functie van de fosforbeschikbaarheid opnieuw gedaan, maar nu werden de bodems vooraf opgesplitst volgens lage en hoge waarden van de te evalueren bodemeigenschap. Daarbij werd nagegaan of de betrouwbaarheidsintervallen voor de kritische fosforbeschikbaarheid bij 0,14 en 0,5 mg P/L elkaar overlaptten bij de twee bodemgroepen, naar analogie van de analyse voor verschillende bodemtexturen. Deze aanpak bleek echter niet te werken: door de relatief lage fosforconcentratie in de uitloogoplossing van de bodemgroep met hoog Ca-, Fe- en Al-gehalte werd telkens een vrij 'platte' curve gemodelleerd waardoor de onzekerheid op de predicties van kritische fosforbeschikbaarheid telkens zeer groot was. Er is echter een andere optie om de bodemeigenschappen in rekening te brengen: naar analogie met de berekening van FVG kan ook een andere bodemfosfortest uitgedrukt worden ten opzichte van het Ca-, Al- of Fe-gehalte. Dit bleek het meest zinvol voor P-AL relatief uitgedrukt ten opzichte van Fe-AL (beiden in mol uitgedrukt). Wanneer deze nieuwe bodemfosfortest gefit en geëvalueerd wordt zoals de andere bodemfosfortesten (Figuur 35), blijkt deze beter te scoren dan P-AL en gelijkaardig als FVG (afhankelijk van het gekozen belangrijkste evaluatiecriterium) (Tabel 43).





Figuur 34. Test om de invloed van bodemeigenschappen op de uitloogconcentratie (niet gefilterd (NF), mg P/L) in functie van de fosforbeschikbaarheid visueel na te gaan. Boven: invloed van pH-KCl bij P-AL, onder: invloed van Fe-ox (mg/kg) bij P-CaCl<sub>2</sub>

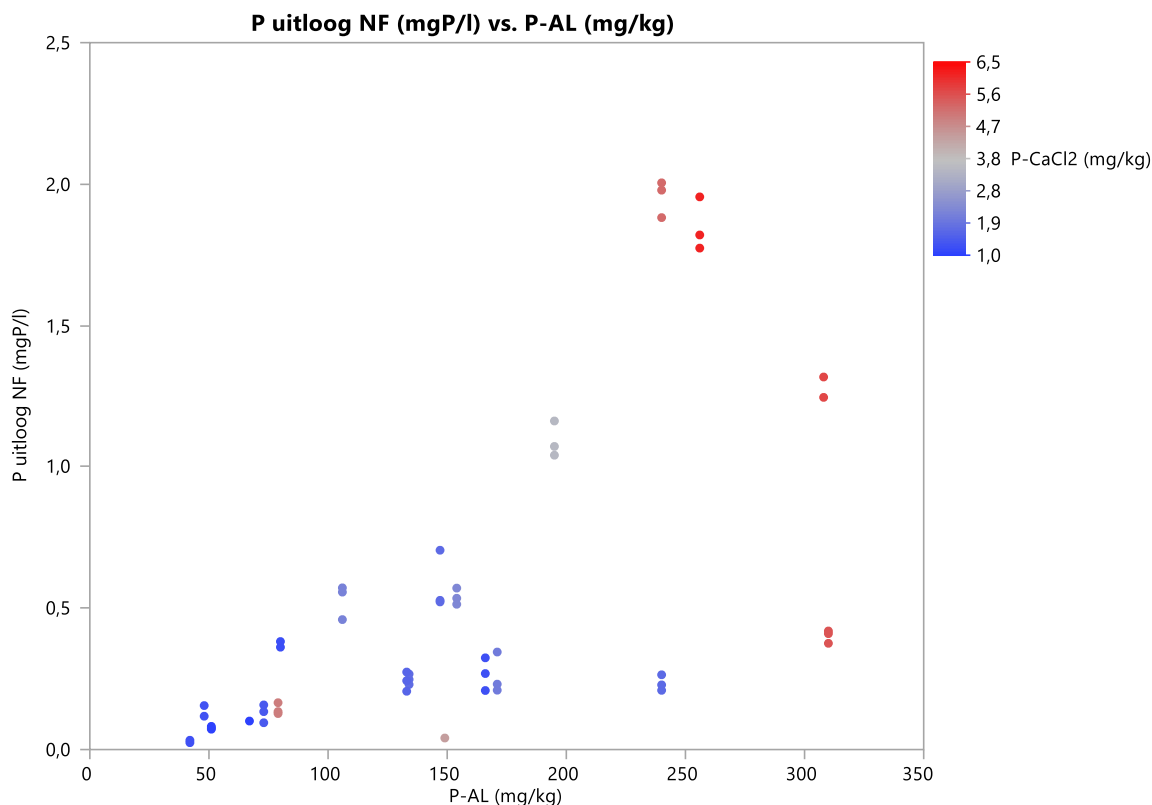


Figuur 35. Uitloogende fosforconcentratie (niet gefilterd, mg P/L) van de bodemkolommen in functie van de fosforbeschikbaarheid uitgedrukt als P-AL/Fe-AL. Datapunten: •, modelfit (Freundlich): ononderbroken lijn. Het 95% betrouwbaarheidsinterval van de gefitte kritische fosforbeschikbaarheid wordt weergegeven in rood (kritische fosforuitloogconcentratie van 0,14 mg P/L) en in oranje (kritische fosforuitloogconcentratie van 0,5 mg P/L).

### 7.3.7 Meerdere bodemfosfortesten

In Nederland wordt soms gebruik gemaakt van twee bodemfosfortesten tegelijk, namelijk P-AL en P-CaCl<sub>2</sub>, om de fosforbeschikbaarheid in de bodem beter in te schatten. Op basis van de resultaten van dit onderzoek (grafieken en evaluatiecriteria modelfit) wordt niet verwacht dat het meenemen van een extra bodemfosfortest belangrijke voordelen zal bieden voor het inschatten van de fosforuitlooging van bodems. De correlatietabel tussen de verschillende bodemfosfortesten wijst reeds op een belangrijke correlatie tussen de fosforbeschikbaarheid gemeten met verschillende

testen (Tabel 41). Met behulp van de Graph Builder van JMP is dan ook te zien dat toevoegen van de informatie over P-CaCl<sub>2</sub> bij de relatie tussen de fosforuitlogingsconcentratie en P-AL geen duidelijke meerwaarde biedt (Figuur 36). Het hoeft dan ook niet te verwonderen dat indien de modellering van de fosforuitlogconcentratie in functie van P-AL opgesplitst wordt in hoge waarden voor P-CaCl<sub>2</sub> ( $\geq 2,0$  mg/kg) en lage waarden ( $< 2,0$  mg/kg), de betrouwbaarheidsintervallen voor de kritische P-AL zeer ruim overlappen en niet minder breed zijn dan voor alle waarden van P-CaCl<sub>2</sub> samen (Tabel 45). Indien een Freundlichmodel wordt gefit met twee bodemfosfortesten, is de RMSE uiteraard lager (0,39) dan voor de afzonderlijke testen (0,43 en 0,42), maar de vermindering is beperkt en RMSE is nog steeds lager voor FVG en P-AL/Fe-AL dan voor P-AL + P-CaCl<sub>2</sub>.



Figuur 36. De informatie van P-CaCl<sub>2</sub> toegevoegd aan de relatie tussen de fosforuitlogingsconcentratie (niet gefilterd, mg P/L) en P-AL (mg/kg).

Tabel 45. Predictie van de kritische fosforbeschikbaarheid (P-AL) voor uitloging bij 0,14 mg P/L en 0,5 mg P/L (niet gefilterd) en het betrouwbaarheidsinterval, (BI; 95%) gefit met JMP voor hoge en lage waarden van P-CaCl<sub>2</sub>

Kritische fosforuitloging	P-CaCl <sub>2</sub> (mg/kg)	Predictie	Onderste grens BI	Bovenste grens BI
0,14 mg P/L	< 2,0	51	22	79
	$\geq 2,0$	42	-8	91
	Alle waarden	57	24	89
0,5 mg P/L	< 2,0	154	126	183
	$\geq 2,0$	124	63	184
	Alle waarden	154	121	186

## 7.4 ALGEMENE CONCLUSIE KOLOMPROEVEN

- Weinig meerwaarde om de bodems op te splitsen per textuur voor de bepaling van de kritische fosforbeschikbaarheid
- Weinig meerwaarde bij meenemen van combinaties van meerdere bodemfosfortesten
- Beperkte verschillen tussen prestaties van de bodemfosfortesten, met FVG en de intensiteitstesten algemeen als best scorend
- Van de capaciteitstesten scoort P-AL best (en gelijkaardig met P-CaCl<sub>2</sub> en P-DGT) en zelfs gelijkaardig met FVG indien genormaliseerd voor Fe-Al

## 8 DWP 1.5: EVALUATIE

De voorgaande deelwerkpakketten dienen om te evalueren welke fosforbeschikbaarheidstesten het meest waardevol zijn voor het inschatten van de fosforbeschikbaarheid in Vlaanderen. Een fosforbeschikbaarheidsindex (test of combinatie van testen) scoort hoger als:

- de fosforbeschikbaarheidsindex er in slaagt om onder verschillende omstandigheden de kritische fosforbeschikbaarheid voor opbrengstvermindering te detecteren (zie deelwerkpakket 1.3)
- er een beperkte variatie in fosforbeschikbaarheidsindex is bij een bepaalde gedefinieerde milieurempelwaarde over verschillende bodems (fosforbeschikbaarheid, bodemeigenschappen) heen (deelwerkpakket 1.4)
- er een beperkte variatie van de fosforbeschikbaarheidsindex doorheen het jaar is en een robuustheid tegen mogelijk bepalende factoren als vochtgehalte (zie deelwerkpakket 1.2)
- de kostprijs van de fosforbeschikbaarheidsindex beperkt is (arbeid, tijdsduur, analysekosten, zie hieronder).
- De herhaalbaarheid hoog is. De prestatiekenmerken voor praktijklabo's dienen goed te zijn (zie hieronder)
- Het onderscheidend vermogen van de test groot is (zie DWP 1.2 en DWP 1.3)
- De vertrouwdheid in Vlaanderen, buitenland en wetenschap met de test hoog is (zie DWP 1.1)
- Bruikbaarheid van de test voor bepaling van andere belangrijke bodemeigenschappen (bijvoorbeeld andere elementen in het extract (zie DWP 1.1)

### 8.1 KOSTPRIJS

De kostprijs voor de verschillende methodes werd geëvalueerd op basis van de commerciële prijzen gehanteerd door de Bodemkundige Dienst van België (dec. 2016) (zie Tabel 46). P-DGT wordt niet aangeboden door de Bodemkundige Dienst binnen hun reguliere dienstverlening. Deze methode werd bijgevolg niet opgenomen in de evaluatie.

Voor P-AL is het nog erg belangrijk te vermelden dat in hetzelfde AL-extract ook K, Mg, Ca en Na bepaald worden. Hierdoor krijgt de klant/landbouwer onmiddellijk een globaal beeld van de bodemvruchtbaarheidstoestand van het bemonsterde perceel en daaraan gekoppeld een bemestings- en bekalkingsadvies voor de drie volgende teelten. Voor de andere P-testen is dat niet mogelijk (bv. in CaCl<sub>2</sub>-extract kan geen Ca bepaald worden).

### 8.2 PRESTATIEKENMERKEN

In deelwerkpakket 1.2 werd de analyse van de testen op punt gesteld. Daarbij werd ook gewerkt aan de herhaalbaarheid, in en tussen de labo's. Deze bleek te dalen volgens P-AL > P-ox > P-DGT > FVG ≈ P-CaCl<sub>2</sub> > P-Olsen. Voor P-CaCl<sub>2</sub> is er het bijkomende probleem dat bodems met lage fosforhoeveelheden vaak onder de detectielimiet (0,8-1,0 mg P/kg) zitten.

Voor de P-testen die binnen de BELAC-scope van de Bodemkundige Dienst van België vallen (i.e. geaccrediteerde testen), werden de prestatiekenmerken meetonzekerheid, juistheid en reproduceerbaarheid geëvalueerd.

De procedure voor het bepalen van prestatiekenmerken van analysemethodes wordt beschreven in CMA/6/A van december 2011. Analyseresultaten zijn slechts benaderingen van de ware waarde. De mate waarin analyseresultaten kunnen afwijken wordt gekwantificeerd met prestatiekenmerken. Zij



weerspiegelen de prestatie (performantie) van een analysemethode onder verschillende omstandigheden. De verkregen prestatiekenmerken zijn alleen geldig voor het desbetreffende laboratorium, en de uitvoeringsomstandigheden (analysemethode, ...) dienen hierbij te zijn vastgelegd. De resultaten van het validatieonderzoek worden gerapporteerd in een validatierapport.

Juistheid (of trueness) van een analysemethode is de mate van overeenstemming tussen het gemiddelde van een reeks meetwaarden en de werkelijke waarde of de als werkelijk aangenomen waarde van de te bepalen grootte. De gebruikelijke maat voor de juistheid is de bias  $b$ , die dus overeenkomt met de (positieve of negatieve) systematische fout.

Met reproduceerbaarheid (of reproducibility) wordt bedoeld de precisie verkregen bij uitvoering van alle betreffende metingen onder variabele omstandigheden, dit wil zeggen in verschillende laboratoriumruimten, door verschillende analisten, met verschillende apparaten en batches reagentia/standaarden, op verschillende tijdstippen met grotere tussenpozen. Bij een uitspraak met betrekking tot reproduceerbaarheid dient bijgevolg aangegeven te worden welke condities veranderd werden.

De meetonzekerheid (of expanded uncertainty) wordt gedefinieerd als de halve lengte van een interval waarbinnen de ware waarde wordt verwacht te liggen, en dit bij een bepaald betrouwbaarheidsniveau. In principe dient de meetonzekerheid alle factoren te omvatten die van invloed zijn op het resultaat, gecombineerd volgens gevestigde procedures. De prestatiekenmerken die de meetonzekerheid - of tenminste een gedeelte ervan - bepalen zijn de intra-reproduceerbaarheid van de analysemethode (voor wat de toevallige afwijking betreft) en de juistheid van de analysemethode (voor wat de systematische afwijking betreft).

Op basis van de validatierapporten van de geaccrediteerde P-testen (P-AL, P-ox, P-Olsen en FVG) werd voor de drie bovenvermelde prestatiekenmerken afzonderlijk een rangorde opgesteld:

Meetonzekerheid:  $P-AL < P-ox < FVG < P-Olsen$

Juistheid:  $P-Olsen > P-ox > P-AL > FVG$

Reproduceerbaarheid:  $P-AL > P-ox = FVG > P-Olsen$

Er wordt een rangorde gegeven aan de verschillende testen voor de verschillende prestatiekenmerken, met 1 als rang voor beste presteerder en dan oplopend verder. Deze worden dan opgeteld. De P-test met het laagste cijfer scoort het beste voor de beoordeelde prestatiekenmerken.

P-AL:  $1+3+1 = 5$

P-ox:  $2+2+2 = 6$

P-Olsen:  $4+1+3 = 8$

FVG:  $3+4+2 = 9$

Op basis van hun ranking voor de verschillende prestatiekenmerken wordt volgende globale ranking bekomen voor de verschillende P-testen waarvoor een validatierapport beschikbaar is:

**P-AL > P-ox > P-Olsen > FVG, waarbij P-AL als best presterend beschouwd kan worden.**

### 8.3 ALGEMENE EVALUATIE VAN DE FOSFORBESCHIKBAARHEIDSTESTEN

In Tabel 46 staat een overzicht weergegeven van de geschiktheid van de verschillende (combinaties van) fosforbeschikbaarheidstesten volgens de verschillende criteria, gebaseerd op voorgaande deelwerkpakketten.

Algemeen scoort P-AL op zowat alle criteria goed tot zeer goed. P-ox scoort het slechtst. P-Olsen scoort zeer variabel. Van de intensiteitsparameters scoort P-CaCl<sub>2</sub> het best. P-DGT, de test waarvan een goede score voor inschatten van de fosforbeschikbaarheid verwacht werd gezien het diffusieproces dat in de meting vervat zit, kon de verwachtingen niet inlossen. Een combinatie van een capaciteits- en intensiteitstest wordt niet naar voor geschoven aangezien de bekomen

meerwaarde niet opweegt tegen de hogere kost en complexiteit. Daarom wordt geadviseerd voor het verder gebruik van P-AL voor de meting van fosforbeschikbaarheid in Vlaanderen. In luik 2 en 3 zal daarom de fosforbeschikbaarheid telkens gemeten worden met behulp van deze P-AL-test. Aanvullend wordt ook nog P-CaCl<sub>2</sub> gemeten, als beste intensiteitstest. Dit laat ook toe om de buffercapaciteit in te schatten (als de verhouding van P-AL ten opzichte van P-CaCl<sub>2</sub>) voor luik 3 (DWP 3.2).

Tabel 46. Algemene evaluatie van de fosforbeschikbaarheidsindices voor geschiktheid voor Vlaamse bodems op basis van verschillende criteria. Oplopende geschiktheid volgens + < ++ < +++ < ++++ < +++++ (-: niet gekend)

criterium	P-AL	P-ox	FVG <sup>§</sup>	P-Olsen	P-CaCl <sub>2</sub>	P-DGT	P-AL +P-CaCl <sub>2</sub>	P-AL + P-DGT
Kostprijs	+++++	++	+	++	++++	-	+++	-
Prestatiekenmerken*	+++++	++++	++	+++	-	-	-	-
Robuustheid	+++	+++	++	+	++	-	+++ / ++	+++ / -
Onderscheidend vermogen	+++	+	+	+++	++++	+++++	++++	+++++
Vertrouwdheid Vlaanderen	+++++	+	+++	+	+	+	+++++ / +	+++++ / +
Vertrouwdheid buiten-land en wetenschap	++++	++	++	+++++	++	++	++++ / ++	++++ / ++
Fosforbeschikbaarheid voor het gewas	++++	+	++	+++	+++	+++	++++	++++
Fosforbeschikbaarheid voor uitloging	+++	+	++++	++	+++	+++	+++	+++
Bruikbaarheid van de test voor andere belangrijke bodemeigenschappen	+++++	+++	++	+	+++	+	+++++	+++++

<sup>§</sup> Ook voor bodems die geen kalkarme zandbodems zijn

\* De prestatiekenmerken werden geëvalueerd op basis van de validatierapporten voor methodes die onder de BELAC-scope van de Bodemkundige Dienst van België vallen. P-CaCl<sub>2</sub> en P-DGT vallen niet onder de BELAC-scope van de Bodemkundige Dienst van België. Omwille van een onvolledige validatie worden de prestatiekenmerken voor deze methodes niet meegenomen in de evaluatie.

## 9 PROTOCOL EN CONTROLE

### 9.1 PROTOCOLS

Van P-AL bestaat reeds een goed uitgeschreven protocol in het Compendium bemonsterings- en analysemethoden voor mest, bodem en veevoeder (BAM, <https://emis.vito.be/nl/bam-2010>). Voor P-CaCl<sub>2</sub> werd door het consortium een protocol opgesteld, gebaseerd op de methode voorgesteld door Houba et al. (2000), NEN 5704 en ISO/TS 21268-2 (zie 9.2). Dit protocol zal beschikbaar gesteld worden voor deelnemers van de Vlarisub ringtest die ILVO organiseert (zie 9.3).

### 9.2 PROTOCOL: BEPALING VAN FOSFOR IN GROND EXTRAHEERBAAR MET 0,01 M CaCl<sub>2</sub> (P-CaCl<sub>2</sub>)

#### **Principe**

Dit protocol beschrijft een methode voor de bepaling van het gehalte aan onmiddellijk plantbeschikbare P in grond, extraheerbaar met een oplossing van 0,01 M CaCl<sub>2</sub>. Dit protocol is gebaseerd op de methode voorgesteld door Houba et al. (2000), NEN 5704 en ISO/TS 21268-2. Deze methode kan toegepast worden op voorgedroogde grondmonsters, gezeefd over een zeef van 2 mm.

De voorgedroogde grondmonsters worden geëxtraheerd in een verhouding 1:10 (massa/volume) met een oplossing van 0,01 M CaCl<sub>2</sub>. Een gedeelte van het extract wordt na centrifugatie geanalyseerd op fosfor met ICP.

#### **Bemonstering en monstervoorbehandeling**

De bemonstering van de bodem voor de bepaling van de plantbeschikbare P wordt uitgevoerd volgens BAM/deel 1/01.

De voorbehandeling gebeurt volgens BAM/deel 1/02.

#### **Reagentia en oplossingen**

- Water, gebruik voor alle oplossingen water volgens NEN-EN-ISO 3696
- Calciumdichlorideoplossing c(CaCl<sub>2</sub>) = 0,01 mol/l. Los 1,47 g CaCl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O op in 1 l water.
- HNO<sub>3</sub>

#### **Apparatuur**

- Gebruikelijk laboratoriumglaswerk, zuurgewassen
- Analytische balans
- Schudflessen van 100 of 250 ml, zuurgewassen
- Centrifugebuizen van 50 ml, zuurgewassen
- Schudmachine (180 slagen per minuut)
- Centrifuge met zodanige rotatiefrequentie dat de radiale versnelling 2000 (±100) maal de zwaarteveldsterkte (g) bedraagt

#### **Procedure**

Weeg 4,0 g ± 0,05 g voorgedroogd grondmonster af in een schudfles (of eventueel onmiddellijk in een centrifugebuis) en voeg 40 ml 0,01 M CaCl<sub>2</sub> toe. Alternatief kan meer monster in schudflessen

afgewogen worden, waarbij de verhouding 1:10 (massa/volume) moet gerespecteerd worden. Neem twee blanchomonsters mee. Schud gedurende 2 uur bij een temperatuur van  $20 \pm 2$  °C. Decanteer en centrifugeer het extract gedurende 10 minuten bij een zodanige rotatiefrequentie dat de radiale versnelling 2000 ( $\pm 100$ ) maal de zwaarteveldsterkte (g) bedraagt.

Zuur het extract aan met  $\text{HNO}_3$ .

### Analyse

Bepaal binnen 72 uur na extractie de P-concentratie van het supernatans volgens NBN EN ISO 11885:2009 Waterkwaliteit – Bepaling van geselecteerde elementen met optische emissiespectroscopie met inductief gekoppeld plasma (ICP-OES).

Opmerking: de standaardreeks behoort in hetzelfde medium (0,01 M  $\text{CaCl}_2$  en  $\text{HNO}_3$ ) als de grondextracten te worden gemaakt.

### Berekening

Het gehalte aan extraheerbaar fosfor volgens de P- $\text{CaCl}_2$ -methode wordt uitgedrukt in mg P per kg luchtdroge grond, en wordt berekend met de volgende formule:

$$P - \text{CaCl}_2 = \frac{V \cdot a \cdot f}{m}$$

Waarin

P- $\text{CaCl}_2$	het gehalte aan extraheerbaar fosfor in grondmonsters in mg per kg luchtdroge grond
V	het volume extractiemiddel 0,01 M $\text{CaCl}_2$ in ml
a	de concentratie fosfor in het grondextract in mg P per liter
f	de eventuele verdunningsfactor bij meten van de concentratie in het grondextract (oa door aanzuren met $\text{HNO}_3$ )
m	de massa van het ingewogen luchtdroog grondmonster in g

### Referenties

Houba, V. J. G., Temminghoff, E. J. M., Gaikhorst, G. A. & van Vark, W. 2000. Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **31**, 1299-1396.

NEN 5704. Bodem. Monstervoorbehandeling van grond. Extractie met een calciumchloride-oplossing (0,01 mol/l).

ISO/TS 21268-2. Soil quality – Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials. Part 2: Batch test using a liquid to solid ratio of 10 l/kg dry matter.

## 9.3 CONTROLE MET RINGTESTEN

Beide testen (P-AL en P- $\text{CaCl}_2$ ) zijn opgenomen in de Vlarisub-ringtest, georganiseerd door ILVO Elk jaar worden twee ringtesten georganiseerd. In Tabel 47 worden de voornaamste resultaten gerapporteerd voor P-AL, in Tabel 48 voor P- $\text{CaCl}_2$ . Voor P-AL is het aantal deelnemende labo's, zeker in Vlaanderen, in stijgende lijn. De standaarddeviatie (zonder uitschieters) is sinds 2017 lager dan 10%. Toch zijn er soms enkele deelnemende labo's, ook Vlaamse, met een Z-score (= aantal standaarddeviaties dat een score van het gemiddelde af zit) van meer dan 2 of minder dan -2 (dit zou een oproep voor het laboratorium moeten zijn om op zoek te gaan naar de oorzaken van deze afwijking). Ook voor P- $\text{CaCl}_2$

zijn er sinds 2017, wanneer een specifieke oproep met protocol, ontworpen voor dit project gelanceerd werd, meer deelnemers. Ook de standaard-deviatie is bij de laatste ringtesten beperkt: vooral in 2017 was deze twee keer zeer laag, voor 2018 was die weer iets hoger dan 10%, wellicht door de relatief lage waarde (Tabel 48).

Tabel 47. Resultaten van Vlarisub-ringtesten in 2016, 2017 en 2018 voor P-AL

	mei-16	nov-16	mei-17	nov-17	mei-18
<b>Gemiddelde P-AL zonder uitschieters (mg P/kg)</b>	214	262	455	211	277
<b>Standaarddeviatie zonder uitschieters (mg P/kg)</b>	23	34	37	12	18
<b>aantal deelnemers</b>	8	11	13	13	12
<b>aantal deelnemers Vlaanderen</b>	4	6	8	8	9
<b>aantal deelnemers met <math> z\text{-score}  &gt; 2</math></b>	1	0	2	3	1
<b>aantal Vlaamse deelnemers met <math> z\text{-score}  &gt; 2</math></b>	0	0	2	1	1

Tabel 48. Resultaten van Vlarisub-ringtesten in 2016, 2017 en 2018 voor P-CaCl<sub>2</sub>

	mei-16	nov-16	mei-17	nov-17	mei-18
<b>Gemiddelde P-CaCl<sub>2</sub> zonder uitschieters (mg P/kg)</b>	3,7	6,2	4,0	2,3	1,5
<b>Standaarddeviatie zonder uitschieters (mg P/kg)</b>	0,6	0,6	0,1	0,3	0,2
<b>aantal deelnemers</b>	5	5	6	7	6
<b>aantal deelnemers Vlaanderen</b>	3	3	4	6	4
<b>aantal deelnemers met  z-score  &gt;2</b>	1	0	1	0	1
<b>aantal Vlaamse deelnemers met  z-score  &gt;2</b>	1	0	1	0	0

## 10 REFERENTIES LUIK 1

- Abrams, M.M., Jarrell, W.M., 1992. Bioavailability index for phosphorus using ion exchange resin impregnated membranes. *Soil Science Society of America Journal* 56, 1532-1537.
- Albertsson, B., 2008. New P recommendations in Swedish agriculture. In: Rubaek, G.H. (Ed.), Stockholm.
- Alblas, J., van der Schoot, J.R., 2000. Pw-getal zegt niet alles... Kennisakker.nl.
- Amery, F., Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2013. ILVO-mededeling 137: Vlarisub ringtest mei 2013. Merelbeke.
- Amery, F., Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2014a. ILVO-mededeling 154: Vlarisub ringtest november 2013. Merelbeke.
- Amery, F., Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2014b. ILVO-mededeling 163: Vlarisub ringtest mei 2014. Merelbeke.
- André, F., Jonard, M., Ponette, Q., 2007. Influence of meteorological factors and polluting environment on rain chemistry and wet deposition in a rural area near Chimay, Belgium. *Atmospheric Environment* 41, 1426-1439.
- Anonymous, 2010a. BAM - Bemonsterings- en analysemethodes voor bodem in het kader van het mestdecreet. Bodem - Bepaling van de fosfaatverzadigingsgraad. VLM, Brussel.
- Anonymous, 2010b. Bodem - Bepaling van fosfaat in grond extraheerbaar met een ammoniumlactaat-azijnzuurbuffer (P-AL). VLM, Brussel.
- Anonymous, 2012. Coalla 2012. Ringtest VITO. Mol.
- Anonymous, 2013. Coalla 201. Ringtest VITO. Mol.
- Anonymous, 2014. Coalla 2014. Ringtest VITO. Mol.
- Ashjaei, S., Tiessen, H., Schoenau, J.J., 2010. Correlations between phosphorus fractions and total leachate phosphorus from cattle manure- and swine manure-amended soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41, 1338-1349.
- Aurell, A., 2000. Evaluation of the P-AL method for fertilization of barley (*Hordum vulgare* L.), in relation to soil properties, especially P sorption. Examensarbete - Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap, avd. för växtnäringslära 117.
- Baert, L., Depuydt, S., De Smet, J., Hofman, G., Scheldeman, K., Vanderdeelen, J., Van Meirvenne, M., Lookman, R., Merckx, R., Schoeters, I., Vlassak, K., De Gryse, S., Hartmann, R., Seuntjes, P., Verplancke, H., Verschoore, P., 1997. Fosfaatverzadiging van zandige bodems in Vlaanderen. Meise.
- Bai, Z.H., Li, H.G., Yang, X.Y., Zhou, B.K., Shi, X.J., Wang, B.R., Li, D.C., Shen, J.B., Chen, Q., Qin, W., Oenema, O., Zhang, F.S., 2013. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant and Soil* 372, 27-37.
- Berez, K., Balázs, J., Németh, I., Füleky, G., 2005. Studying the direct and residual effect of long-term fertilization using ammonium lactate and hot water extraction methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36, 203-213.
- Bertilsson, G., Rosenqvist, H., Mattsson, L., 2005. Fosforgödsling och odlingsekonomi med perspektiv på miljömål. Stockholm.
- Bollons, H.M., Barraclough, P.B., 1999. Assessing the phosphorus status of winter wheat crops: inorganic orthophosphate in whole shoots. *Journal of Agricultural Science* 133, 285-295.
- Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59, 39-45.
- Brookes, P.C., Heckrath, G., De Smet, J., Hofman, G., Vanderdeelen, J., 1997. Losses of phosphorus in drainage water. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C., Johnston, A.E. (Eds.), *Phosphorus loss from soil to water*. CAB International, Cambridge, pp. 253-271.
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., van der Draai, H., Temminghoff, E.J.M., 2011a. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 1 snijmaïs. Wageningen.
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., van der Draai, H., Temminghoff, E.J.M., 2011b. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 2 grasland. Wageningen.
- Chardon, W.J., Menon, R.G., Chien, S.H., 1996. Iron oxide impregnated filter paper (P-i test): A review of its development and methodological research. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46, 41-51.
- Chen, C.R., Condon, L.M., Davis, M.R., Sherlock, R.R., 2003. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 177, 539-557.
- Chrysostome, M., Nair, V.D., Harris, W.G., Rhue, R.D., 2007. Minimizing confounding factors in phosphorus leaching assessment for dairy-and poultry-manure-amended soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38, 975-987.
- Colomb, B., Debaeke, P., Jouany, C., Nolot, J.M., 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *European Journal of Agronomy* 26, 154-165.
- Colwell, J.D., 1963. The estimation of the phosphorus requirements of wheat in southern New South Wales by soil analysis. *Aust J Exp Agric Anim Husband* 3, 190-198.



- Cooperband, L.R., Logan, T.J., 1994. Measuring in-situ changes in labile soil-phosphorus with anion-exchange membranes. *Soil Science Society of America Journal* 58, 105-114.
- Corré, W.J., Verloop, J., Hilhorst, G.J., Oenema, J., 2004. Bodemvruchtbaarheid op De Marke; Ontwikkelingen bij aangepast mineralenbeheer en gevolgen voor productiviteit. Wageningen.
- Csathó, P., Magyar, M., Debreczeni, K., Sárdi, K., 2002. Correlation between soil P and corn leaf P contents in a network of Hungarian long-term field trials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33, 3085-3103.
- De Smet, J., Hofman, G., Vanderdeelen, J., Van Meirvenne, M., Baert, L., 1995. Fosfaatuitspoeling onder zandleembodems. *Agricontact*, pp. 1-6.
- Degryse, F., Smolders, E., Zhang, H., Davison, W., 2009. Predicting availability of mineral elements to plants with the DGT technique: a review of experimental data and interpretation by modelling. *Environmental Chemistry* 6, 198-218.
- Dekker, P.H.M., Postma, R., 2008. Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting. Wageningen.
- Delgado, A., Torrent, J., 1997. Phosphate-rich soils in the European union: Estimating total plant-available phosphorus. *European Journal of Agronomy* 6, 205-214.
- Demaria, P., Flisch, R., Frossard, E., Sinaj, S., 2005. Exchangeability of phosphate extracted by four chemical methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 168, 89-93.
- Djordjic, F., Borling, K., Bergstrom, L., 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality* 33, 678-684.
- Dougherty, W.J., Mason, S.D., Burkitt, L.L., Milham, P.J., 2011. Relationship between phosphorus concentration in surface runoff and a novel soil phosphorus test procedure (DGT) under simulated rainfall. *Soil Research* 49, 523-528.
- Edmeades, D.C., Metherell, A.K., Waller, J.E., Roberts, A.H.C., Morton, J.D., 2006. Defining the relationships between pasture production and soil P and the development of a dynamic P model for New Zealand pastures: a review of recent developments. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 49, 207-222.
- Ehlert, P., van der Salm, C., Burgers, S., van Middelkoop, J., van Dijk, W., van der Maas, R., Pronk, A., van Reuler, H., Koopmans, G., Chardon, W., 2014a. Fosfaatklassen voor fosfaatgebruiksnormen van de Meststoffenwet; Landbouwkundige en milieuhygiënische aspecten in samenhang. Wageningen.
- Ehlert, P.A.I., Burgers, S.L.G.E., Bussink, D.W., Temminghoff, E.J.M., van Erp, P.J., van Riemsdijk, W.H., 2007. Deskstudie naar de mogelijkheden voor het aanwijzen van fosfaatarme gronden op basis van P-PAE. Stand van zaken 2006. Wageningen.
- Ehlert, P.A.I., Chardon, W.J., Burgers, S.L.G.E., 2014b. Fosfaattoestand en fosfaatgebruiksnorm; Betekenis van het fosfaatbufferend vermogen van de bodem: ontwerp van een protocol. Wageningen.
- Eriksson, A.K., 2009. Phosphorus in agricultural soils around the Baltic Sea - Comparisons of different laboratory methods as indices for phosphorus leaching to waters. Uppsala.
- Frossard, E., Condon, L.M., Oberson, A., Sinaj, S., Fardeau, J.C., 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality* 29, 15-23.
- Frossard, E., Demaria, P., Sinaj, S., Scharer, M., 2014. A flow-through reactor to assess potential phosphate release from agricultural soils. *Geoderma* 219, 125-135.
- Füleky, G., Czinkota, I., 1993. Hot water percolation (HWP) - A new rapid soil extraction method. *Plant and Soil* 157, 131-135.
- Ghani, A., Dexter, M., Perrott, K.W., 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 1231-1243.
- Godlinski, F., Leinweber, P., Meissner, R., Seeger, J., 2004. Phosphorus status of soil and leaching losses: results from operating and dismantled lysimeters after 15 experimental years. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 68, 47-57.
- Goetelen, L., AN, G., Vanhoof, C., Tirez, K., 2011. Validatie meetmethodiek voor bepaling van plantbeschikbare P in ammoniumlactaat. Mol.
- Guo, F.M., Yost, R.S., 1999. Quantifying the available soil phosphorus pool with the acid ammonium oxalate method. *Soil Science Society of America Journal* 63, 651-656.
- Hahn, C., Prasuhn, V., Stamm, C., Schulin, R., 2012. Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities. *Agriculture Ecosystems & Environment* 153, 65-74.
- Hammond, J.P., White, P.J., 2008. Diagnosing phosphorus deficiency in crop plants. In: White, P.J., Hammond, J.P. (Eds.), *The ecophysiology of plant-phosphorus interactions*. Springer, London, pp. 225-246.
- Hartz, T.K., Johnstone, P.R., 2006. Relationship between soil phosphorus availability and phosphorus loss potential in runoff and drainage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37, 1525-1536.
- Herlihy, M., McCarthy, J., Brennan, D., 2006. Divergent relationships of phosphorus soil tests in temperate grassland soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37, 693-705.
- Holford, I.C.R., 1997. Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research* 35, 227-239.
- Houba, V.J.G., Temminghoff, E.J.M., Gaikhorst, G.A., van Vark, W., 2000. Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31, 1299-1396.
- Humphreys, J., Tunney, H., Duggan, P., 2001. Comparison of extractable soil phosphorus with dry matter production and phosphorus uptake by perennial ryegrass in a pot experiment. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 40, 45-54.
- Johnston, A.E., 2000. *Soil and plant phosphate*. Paris.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Fixen, P.E., Curtin, D., 2014. Phosphorus: Its efficient use in agriculture. *Advances in Agronomy*, Vol 123 123, 177-228.

- Johnston, A.E., Poulton, P.R., White, R.P., 2013. Plant-available soil phosphorus. Part II: the response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam. *Soil Use and Management* 29, 12-21.
- Jordan-Meille, L., Rubaek, G.H., Ehlert, P.A.I., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolo, G., Barraclough, P., 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management* 28, 419-435.
- Kleinman, P.J.A., Needelman, B.A., Sharpley, A.N., McDowell, R.W., 2003. Using soil phosphorus profile data to assess phosphorus leaching potential in manured soils. *Soil Science Society of America Journal* 67, 215-224.
- Kleinman, P.J.A., Sharpley, A.N., Gartley, K., Jarrell, W.M., Kuo, S., Menon, R.G., Myers, R., Reddy, K.R., Skogley, E.O., 2001. Interlaboratory comparison of soil phosphorus extracted by various soil test methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 2325-2345.
- Kleinman, P.J.A., Sharpley, A.N., McDowell, R.W., Flaten, D.N., Buda, A.R., Tao, L., Bergstrom, L., Zhu, Q., 2011. Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles for progress. *Plant and Soil* 349, 169-182.
- Koopmans, G.F., Chardon, W.J., de Willigen, P., van Riemsdijk, W.H., 2004a. Phosphorus desorption dynamics in soil and the link to a dynamic concept of bioavailability. *Journal of Environmental Quality* 33, 1393-1402.
- Koopmans, G.F., Chardon, W.J., Ehlert, P.A.I., Dolfing, J., Suurs, R.A.A., Oenema, O., van Riemsdijk, W.H., 2004b. Phosphorus availability for plant uptake in a phosphorus-enriched noncalcareous sandy soil. *Journal of Environmental Quality* 33, 965-975.
- Koopmans, G.F., Schoumans, O.F., Chardon, W.J., 2003. The use of indicators for the identification of phosphorus transfer from agricultural land to surface waters. Wageningen.
- Koopmans, G.F., Van der Zeeuw, M.E., Römkens, P.F.A.M., Chardon, W.J., Oenema, D.O., 2001. Identification and characterization of phosphorus-rich sandy soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 49, 369-384.
- Krogstad, T., Ogaard, A.F., Kristoffersen, A.O., 2008. New P recommendations for grass and cereals in Norwegian agriculture. In: Rubaek, G.H. (Ed.), Stockholm.
- Kumaragamage, D., Flaten, D., Akinremi, O.O., Sawka, C., Zvomuya, F., 2011. Soil test phosphorus changes and phosphorus runoff losses in incubated soils treated with livestock manures and synthetic fertilizer. *Canadian Journal of Soil Science* 91, 375-384.
- Legrand, G., Roisin, C., Bries, J., Destain, J.-P., 2012. PK bemesting in de biet: Bedenkingen op de lange termijn! , De Bietplanter. vzw CBB, Brussel, pp. 7-8.
- Leinweber, P., Meissner, R., Eckhardt, K.U., Seeger, J., 1999. Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *European Journal of Soil Science* 50, 413-424.
- Liebisch, F., 2011. Plant and soil indicators to assess the phosphorus nutrition status of agricultural grasslands. ETH Zurich, Zurich.
- Lindvall, A., Ulén, B., Etana, A., Bergström, L., Kleinman, P., Mattsson, L., The influence of soil and manure variables on phosphorus leaching from Swedish agricultural soils.
- Lookman, R., 1995. Phosphate chemistry in excessively fertilised soils. K.U.Leuven, Leuven.
- Lookman, R., Freese, D., Merckx, R., Vlassak, K., van Riemsdijk, W.H., 1995. Long-term kinetics of phosphate release from soil. *Environmental Science & Technology* 29, 1569-1575.
- Maguire, R.O., Sims, J.T., 2002. Soil testing to predict phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality* 31, 1601-1609.
- Mallarino, A.P., Atia, A.M., 2005. Correlation of a resin membrane soil phosphorus test with corn yield and routine soil tests. *Soil Science Society of America Journal* 69, 266-272.
- Mason, S., Harnon, R., Zhang, H., Anderson, J., 2008. Investigating chemical constraints to the measurement of phosphorus in soils using diffusive gradients in thin films (DGT) and resin methods. *Talanta* 74, 779-787.
- Mason, S., McNeill, A., McLaughlin, M.J., Zhang, H., 2010. Prediction of wheat response to an application of phosphorus under field conditions using diffusive gradients in thin-films (DGT) and extraction methods. *Plant and Soil* 337, 243-258.
- Mason, S.D., McLaughlin, M.J., Johnston, C., McNeill, A., 2013. Soil test measures of available P (Colwell, resin and DGT) compared with plant P uptake using isotope dilution. *Plant and Soil* 373, 711-722.
- McDowell, R.W., Sharpley, A.N., 2001a. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. *Journal of Environmental Quality* 30, 508-520.
- McDowell, R.W., Sharpley, A.N., 2001b. Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure application to intensively farmed land. *Science of the Total Environment* 278, 113-125.
- Mehlich, A., 1984. Mehlich-3 Soil Test Extractant - A Modification of Mehlich-2 Extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15, 1409-1416.
- Menon, R.G., Chien, S.H., Chardon, W.J., 1997. Iron oxide-impregnated filter paper (Pi test): II. A review of its application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 47, 7-18.
- Menzies, N.W., Kusumo, B., Moody, P.W., 2005. Assessment of P availability in heavily fertilized soils using the diffusive gradient in thin films (DGT) technique. *Plant and Soil* 269, 1-9.
- Moody, P.W., 2007. Interpretation of a single-point P buffering index for adjusting critical levels of the Colwell soil P test. *Australian Journal of Soil Research* 45, 55-62.
- Moody, P.W., Speirs, S.D., Scott, B.J., Mason, S.D., 2013. Soil phosphorus tests I: What soil phosphorus pools and processes do they measure? *Crop & Pasture Science* 64, 461-468.
- Murphy, P.N.C., Sims, T.J., McDowell, R., Wall, D., Lalor, S.T.J., Daly, K., Shortle, G., Managing legacy soil phosphorus in grassland soils for agricultural productivity and environmental quality: a review. SLU Dept of Soil and Environment.

- Neyroud, J.A., Lischer, P., 2003. Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 166, 422-431.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington.
- Otabbong, E., Borling, K., Katterer, T., Mattsson, L., 2009. Compatibility of the ammonium lactate (AL) and sodium bicarbonate (Olsen) methods for determining available phosphorus in Swedish soils. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 59, 373-378.
- Pierzynski, G.M., 2000. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters. In: Pierzynski, G.M. (Ed.), *Southern Cooperative Series*.
- Pierzynski, G.M., Zhang, H., Wolf, A., Kleinman, P., Mallarino, A., Sullivan, D., 2005. Phosphorus determination in waters and extracts of soils and by-products: inductively coupled plasma spectroscopy versus colorimetric procedures. *SERA-17*.
- Pote, D.H., Daniel, T.C., Nichols, D.J., Sharpley, A.N., Moore, P.A., Miller, D.M., Edwards, D.R., 1999. Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *Journal of Environmental Quality* 28, 170-175.
- Pote, D.H., Daniel, T.C., Sharpley, A.N., Moore, P.A., Edwards, D.R., Nichols, D.J., 1996. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Science Society of America Journal* 60, 855-859.
- Poulton, P.R., Johnston, A.E., White, R.P., 2013. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. *Soil Use and Management* 29, 4-11.
- Quintero, C.E., Boschetti, N.G., Benavidez, R.A., 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34, 1435-1450.
- Reijneveld, J.A., 2013. Unravelling changes in soil fertility of agricultural land in The Netherlands. Wageningen University, Wageningen.
- Reijneveld, J.A., Verloop, J., Hilhorst, G.J., 2003. Sanering van zandgrond met een hoge fosfaattoestand. Resultaten van een veldexperiment op proefbedrijf De Marke. Wageningen.
- Renneson, M., Dufey, J., Legrain, X., Genot, V., Bock, L., Colinet, G., 2013. Relationships between the P status of surface and deep horizons of agricultural soils under various cropping systems and for different soil types: a case study in Belgium. *Soil Use and Management* 29, 103-113.
- Reuter, D.J., Robinson, J.B., 1997. *Plant Analysis, an Interpretation Manual*. CSIRO Publishing, Melbourne & Sydney.
- Rubaek, G.H., Kjaergaard, C., Glaesner, N., Heckrath, G., Magid, J., 2010. Adapting agricultural practice to minimize P leaching. *IPW6*.
- Russchen, H.J., Wandar, J., Malda, J.T., 2011. Benutting van fosfaat in landbouwgronden. Dronten.
- Saggar, S., Hedley, M.J., White, R.E., Perrott, K.W., Gregg, P.E.H., Cornforth, I.S., Sinclair, A.G., 1999. Development and evaluation of an improved soil test for phosphorus, 3: field comparison of Olsen, Colwell and Resin soil P tests for New Zealand pasture soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55, 35-50.
- Sanchez-Alcala, I., del Campillo, M.C., Torrent, J., 2015. Critical Olsen P and CaCl<sub>2</sub>-P levels as related to soil properties: results from micropot experiments. *Soil Use and Management* 31, 233-240.
- Sánchez-Alcalá, I., Del Campillo, M.C., Torrent, J., 2014. Extraction with 0.01 M CaCl<sub>2</sub> underestimates the concentration of phosphorus in the soil solution. *Soil Use and Management*.
- Sárdi, K., Osztoics, E., Csathó, P., Balázs, A., 2009. Correlation between soil P test results and P contents of young spring barley studied in long-term experiments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40, 526-537.
- Saunders, W.M.H., Metson, A.J., 1971. Seasonal variation of phosphorus in soil and pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 14, 307-328.
- Schindler, F.V., Guidry, A.R., German, D.R., Gelderman, R.H., Gerwing, J.R., 2009. Assessing extractable soil phosphorus methods in estimating phosphorus concentrations in surface run-off from Calcic Hapludolls. *Soil Use and Management* 25, 11-20.
- Schoumans, O.F., 1997. Relation between phosphate accumulation, soil P levels and P leaching in agricultural land. Wageningen.
- Schroeder, P.D., Radcliffe, D.E., Cabrera, M.L., Belew, C.D., 2004. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus in runoff: Effects of soil series variability. *Journal of Environmental Quality* 33, 1452-1463.
- Schwartz, R.C., Dao, T.H., Bell, J.M., 2011. Manure and mineral fertilizer effects on seasonal dynamics of bioactive soil phosphorus fractions. *Agronomy Journal* 103, 1724-1733.
- Schwertmann, U., 1964. The differentiation of iron oxides in soils by extraction with ammonium oxalate solution. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 105, 194-202.
- Sibbesen, E., 1983. Phosphate soil tests and their suitability to assess the phosphate status of soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 34, 1368-1374.
- Sibbesen, E., Sharpley, A.N., 1997. Setting and justifying upper critical limits for phosphorus in soils. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C., Johnston, A.E. (Eds.), *Phosphorus loss from soil to water*. CAB International, Cambridge, pp. 151-176.
- Six, L., Pypers, P., Degryse, F., Smolders, E., Merckx, R., 2012. The performance of DGT versus conventional soil phosphorus tests in tropical soils - An isotope dilution study. *Plant and Soil* 359, 267-279.
- Six, L., Smolders, E., Merckx, R., 2013. The performance of DGT versus conventional soil phosphorus tests in tropical soils-maize and rice responses to P application. *Plant and Soil* 366, 49-66.

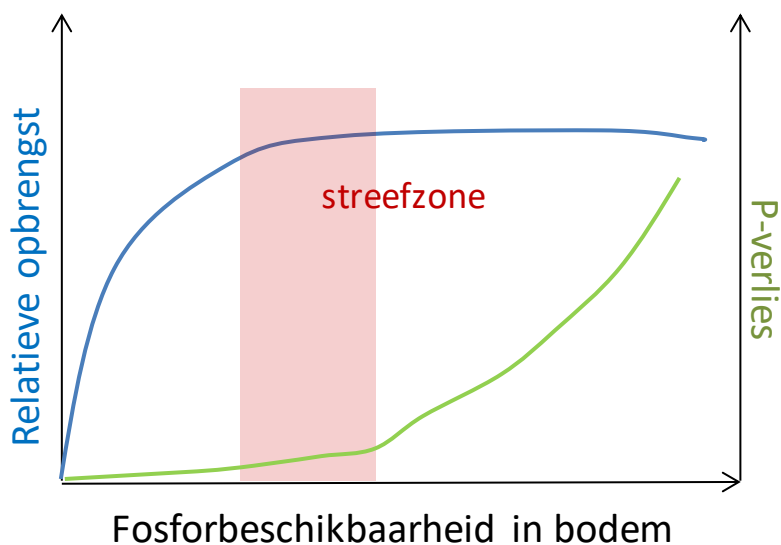
- Skogley, E.O., Dobermann, A., 1996. Synthetic ion-exchange resins: Soil and environmental studies. *Journal of Environmental Quality* 25, 13-24.
- Smith, K.A., Chalmers, A.G., Chambers, B.J., Christie, P., 1998. Organic manure phosphorus accumulation, mobility and management. *Soil Use and Management* 14, 154-159.
- Soinne, H., 2009. Extraction methods in soil phosphorus characterisation - Limitations and applications. University of Helsinki, Helsinki.
- Sousa, J.R., Coutinho, J., 2009. Effect of the extraction period on the routine assessment of soil P status by ion-exchange resin membranes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40, 1995-2008.
- Speirs, S.D., Scott, B.J., Moody, P.W., Mason, S.D., 2013. Soil phosphorus tests II: A comparison of soil test-crop response relationships for different soil tests and wheat. *Crop & Pasture Science* 64, 469-479.
- Styles, D., Coxon, C., 2007. Meteorological and management influences on seasonal variation in phosphorus fractions extracted from soils in western Ireland. *Geoderma* 142, 152-164.
- Svanbäck, A., Ulén, B., Etana, A., Bergström, L., Kleinman, P.J.A., Mattsson, L., 2013. Influence of soil phosphorus and manure on phosphorus leaching in Swedish topsoils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 96, 133-147.
- Syers, J.K., Johnston, A.E., Curtin, D., 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, Rome.
- Tunney, H., 2002. Phosphorus needs of grassland soils and loss to water. In: Steenvoorden, J., Claessen, F., Willems, J. (Eds.), *Agricultural effects on ground and surface waters: research at the edge science and society*. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, pp. 63-69.
- Turner, B.L., Kay, M.A., Westermann, D.T., 2004. Phosphorus in surface runoff from calcareous arable soils of the semiarid Western United States. *Journal of Environmental Quality* 33, 1814-1821.
- Ulén, B., 1999. Leaching and balances of phosphorus and other nutrients in lysimeters after application of organic manures or fertilizers. *Soil Use and Management* 15, 56-61.
- Ulén, B., 2006. A simplified risk assessment for losses of dissolved reactive phosphorus through drainage pipes from agricultural soils. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 56, 307-314.
- Uusitalo, R., Yli-Halla, M., 1999. Estimating errors associated with extracting phosphorus using iron oxide and resin methods. *Journal of Environmental Quality* 28, 1891-1897.
- Van der Pauw, F., 1971. An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus. *Plant and Soil* 34, 467-481.
- van der Zee, S.E.A.T.M., van Riemsdijk, W.H., de Haan, F.A.M., 1990a. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel I: Toelichting. Wageningen.
- van der Zee, S.E.A.T.M., van Riemsdijk, W.H., de Haan, F.A.M., 1990b. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel II: Technische uitwerking. Wageningen.
- van Erp, P.J., Houba, V.J.G., van Beusichem, M.L., 2001. Effect of drying temperature on amount of nutrient elements extracted with 0.01 M CaCl<sub>2</sub> soil extraction procedure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 33-48.
- van Krimpen, M.M., Goselink, R.M.A., Heeres, J., Jongbloed, A.W., 2012. Fosforbehoefte van melkvee, vleesvee, varkens en pluimvee: een literatuurstudie. Lelystad.
- van Middelkoop, J.C., van der Salm, C., Ehlert, P.A.I., André, G., Oudendag, D., Pleijter, M., 2007. Effecten van fosfaat- en stikstofoverschotten op grasland II.
- Van Moorleghem, C., Six, L., Degryse, F., Smolders, E., Merckx, R., 2011. Effect of organic P forms and P present in inorganic colloids on the determination of dissolved P in environmental samples by the diffusive gradient in thin films technique, ion chromatography, and colorimetry. *Analytical Chemistry* 83, 5317-5323.
- van Raij, B., 1998. Bioavailable tests: Alternatives to standard soil extractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29, 1553-1570.
- van Rotterdam-Los, A.M.D., 2010. The potential of soils to supply phosphorus and potassium: processes and predictions. Wageningen University, Wageningen.
- van Rotterdam-Los, A.M.D., Bussink, D.W., 2012. Implementatie van een nauwkeurige bepaling van de fosfaattoestand voor de indeling van gronden in waarderingsklassen. Wageningen.
- van Rotterdam-Los, A.M.D., Reijneveld, J.A., van Oostrum, M., Abbink, G., A more trustworthy P recommendation by implementing the intensity, buffering capacity, quantity concept into agricultural practice. In: D'Haene, K., Vandecasteele, B., De Vis, R., Crappé, S., Callens, D., Mechant, E., Hofman, G., De Neve, S. (Eds.), *Nutrihort*.
- van Rotterdam, A.M.D., Temminghoff, E.J.M., Schenkeveld, W.D.L., Hiemstra, T., van Riemsdijk, W.H., 2009. Phosphorus removal from soil using Fe oxide-impregnated paper: Processes and applications. *Geoderma* 151, 282-289.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2010. ILVO-mededeling 78: Vlarisub ringtest Mei 2010. Merelbeke.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2011a. ILVO-mededeling 87: Vlarisub ringtest november 2010. Merelbeke.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2011b. ILVO-mededeling 100: Vlarisub ringtest mei 2011. Merelbeke.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2012a. ILVO-mededeling 108: Vlarisub ringtest november 2011. Merelbeke.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2012b. ILVO-mededeling 115: Vlarisub ringtest mei 2012. Merelbeke.
- Vandecasteele, B., Van Waes, C., Van Waes, J., 2013. ILVO-mededeling 133: Vlarisub ringtest november 2012. Merelbeke.
- Vanden Nest, T., 2015. PhD dissertation 'Long term use of different organic fertilizer types and impact on phosphorus leaching'. KU Leuven, Leuven.

- Vanden Nest, T., Vandecasteele, B., Ruyschaert, G., Merckx, R., 2014. Incorporation of catch crop residues does not increase phosphorus leaching: a soil column experiment in unsaturated conditions. *Soil Use & Management* 30, 351-360.
- Vandendriessche, H., Geypens, M., Bries, J., 1994. Effecten van de beperking van de P-bemesting op de gewasproductie en de bodemvoorraad. Studie- en vervolmakingsdag 'Gebruik van reststoffen in de land- en tuinbouw'. K.V.I.V., pp. 57-70.
- Vanderdeelen, J., Boon, R., Piot, R., Baert, L., 1985. Phosphorus and potassium balance of long-term fertilizer trials on two Belgian loamy soils. *Pédologie* 35, 191-204.
- Verhaeghe, M., 2014. Startfosfor in de groenteteelt. Een overzicht van 15 jaar onderzoek op het PCG en een blik op de toekomst. *Proeftuinnieuws*, pp. 20-21.
- Ziadi, N., Simard, R.R., Tran, T.S., Allard, G., 2001. Soil-available phosphorus as evaluated by desorption techniques and chemical extractions. *Canadian Journal of Soil Science* 81, 167-174.
- Zorn, W., Krause, O., 1999. Investigations on the characterization of plant available phosphate in Thuringian calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 162, 463-469.

## 11 LUIK 2

In luik 2 worden relaties van P-AL, geselecteerd in luik 1 als beste bodemfosfortest, met gewasopbrengst en fosforverliezen nagegaan. Uiteindelijke doel is om een streefzone voor P-AL af te leiden waarbij de gewasopbrengsten economisch aanvaardbaar zijn maar de fosforverliezen beperkt.

Vaak wordt vanaf een bepaalde **drempelwaarde in het bodemfosforgehalte een sterke toename in de fosforverliezen** waargenomen (Brookes *et al.*, 1997; Smith *et al.*, 1998; McDowell and Sharpley, 2001b, a; Maguire and Sims, 2002; Hartz and Johnstone, 2006; Ashjaei *et al.*, 2010). Dit is duidelijk in Figuur 37: bij lage fosforbeschikbaarheid zijn de fosforverliezen (groene lijn) beperkt, maar ze nemen sterk toe bij hogere fosforgehaltes. De gewasopbrengst neemt eveneens toe bij toenemend bodemfosforgehalte, en vanaf een **bepaald bodemfosforgehalte (drempelwaarde) wordt geen opbrengststijging meer** waargenomen (afvlakking blauwe lijn in Figuur 37). Voor fosforbeschikbaarheidsindices Mehlich 1, Mehlich 3, Olsen, Texas A&M en Bray 1 liggen maximale drempelwaardes vanuit milieukundig standpunt in verschillende VS-staten telkens hoger dan de minimale drempelwaardes voor optimale gewasopbrengst (Sharpley & Tunney, 2000). In Ierland werden gelijkaardige vaststellingen gedaan: het optimale bodemfosforgehalte voor grasgroei, gemeten met het Morgan's extract, lag net onder de drempelwaarde voor fosforverlies zoals vastgesteld op meerder locaties en in meerdere studies (Tunney *et al.*, 2002). Ook voor grasland in Nieuw-Zeeland lag de drempelwaarde voor grasopbrengst, gemeten met behulp van P-Olsen, een stukje onder de drempelwaarde voor sterke toenames in fosforverliezen (McDowell, 2012).



Figuur 37. Veranderingen in opbrengst en fosforverlies bij toenemend beschikbaar bodemfosforgehalte, gemeten door de fosforbeschikbaarheidsindex. De streefzone is zowel vanuit landbouwkundig als milieukundig standpunt optimaal.

Bijgevolg kan een 'streefzone' gedefinieerd worden **tussen beide drempelwaarden**: een optimale zone waarin **milieukundige en landbouwkundige belangen verenigd** worden. In dit luik zullen grafieken zoals in Figuur 37 als **bodem-plant model** opgesteld worden voor de geselecteerde test P-AL. In DWP 2.1 wordt de opbrengstcurve (blauwe lijn in Figuur 37) opgesteld met behulp van veldproeven (nieuwe en uit het verleden), en dit voor verschillende gewassen. Op basis van deze opbrengstcurves kunnen kritische P-AL-waarden (P-krit) voor opbrengstvermindering afgeleid worden. In DWP 2.2 wordt via modellering nagegaan wat er achter verschillen in P-krit bij verschillende gewassen zit. In DWP 2.3 wordt ingegaan op de fosforverliescurve (groene lijn in Figuur 37) en kritische P-AL-waarden voor fosforverliezen. De kritische waarden voor P-AL voor gewasopbrengst en fosforverliezen worden verenigd in een bodem-plant model met streefzone in DWP 2.4.

## 12 DWP 2.1: OPSTELLEN OPBRENGSTCURVE

### 12.1 INITIËLE OPBRENGSTCURVES OPGESTELD OP BASIS VAN VELDPROEVEN BUITEN VLAANDEREN

De opbrengstcurves (relatieve opbrengst versus fosforbeschikbaarheid, blauwe lijn in Figuur 37) werden voor verschillende gewassen opgesteld met behulp van de informatie verzameld in deelwerkpakket 1.3, op basis van veldproeven in omliggende regio's (Nawara *et al.*, 2017). De opbrengstcurves zijn zowel voor de gekozen beste test P-AL (Figuur 38) als voor de intensiteitsparameter P-CaCl<sub>2</sub> (Figuur 39) opgesteld, op basis van de langetermijnproeven. De afgeleide kritische fosforbeschikbaarheid voor 95% relatieve opbrengst is voor beide fosfortesten weergegeven in Tabel 49.

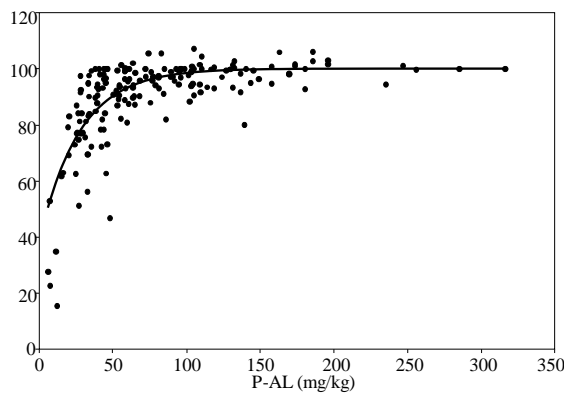
Er werd gekozen voor een relatieve opbrengst van 95% als kritische grens omwille van economische redenen (aanvaardbare opbrengst voor landbouwers in Vlaanderen). Ook in de analyses die volgen, wordt gekozen voor 95% relatieve opbrengst. Behalve enkele uitzonderingen bij de deelanalyses (op een deel van de totale dataset) zijn er voldoende data om bij 95% relatieve opbrengst buiten de ruis te zitten (in tegenstelling tot de uitmijningsproef in DWP 1.3 waar er slechts twee herhalingen zijn per bodem en een andere benadering via de tijd wordt gevolgd, daar wordt gekozen voor 90% relatieve opbrengst).

Deze voorlopige kritische waarden zijn een startpunt voor het afleiden van kritische waarden die geldig zijn voor Vlaanderen. Er zijn extra data nodig aangezien deze proeven niet uitgevoerd zijn in Vlaanderen en voor sommige gewassen maar weinig data beschikbaar zijn (bijvoorbeeld voor aardappelen). Daarvoor worden verder bemestingsproeven door Bodemkundige Dienst van België uitgevoerd in het verleden (12.2), een lopende bemestingsproef van UGent en Vlaco (professor Dirk Reheul, 12.4) en 23 nieuwe bemestingsproeven uitgevoerd in kader van dit project (2016-2018, 12.3), geanalyseerd. In eerste instantie werden ook nog validatieproeven opgezet om de initiële kritische waarden te valideren (12.6). Deze werden echter na 2017 stopgezet omdat de resultaten niet bruikbaar bleken.

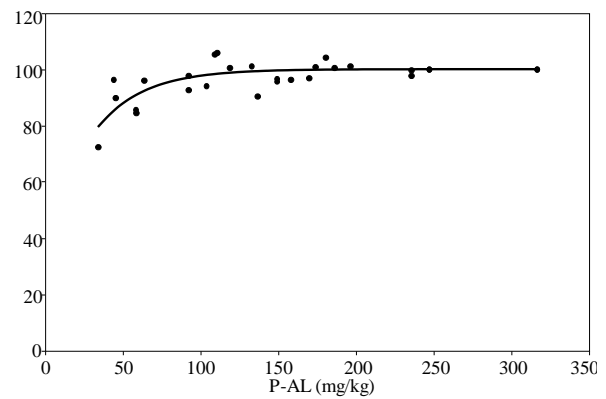
Tabel 49. Kritische fosforbeschikbaarheid (95% relatieve opbrengst) algemeen en specifiek voor wintertarwe, suikerbiet, wintergerst, maïs en aardappel voor zowel P-AL als P-CaCl<sub>2</sub>, op basis van veldproeven van DWP 1.3 buiten Vlaanderen (Nawara *et al.*, 2017). Het 95% betrouwbaarheidsinterval staat tussen haakjes.

Gewas	Kritische P-AL (mg P/kg)	Kritische P-CaCl <sub>2</sub> (mg P/kg)
Algemeen	73 (64-81)	1,7 (1,5-1,9)
Wintertarwe	69 (62-75)	1,7 (1,6-1,9)
Suikerbiet	77 (49-104)	1,2 (0,7-1,8)
Wintergerst	75 (48-102)	1,2 (0,7-1,7)
Maïs	46 (35-57)	1,2 (0,9-1,5)
Aardappel	200 (150-260)	7,8 (5,5-10,2)

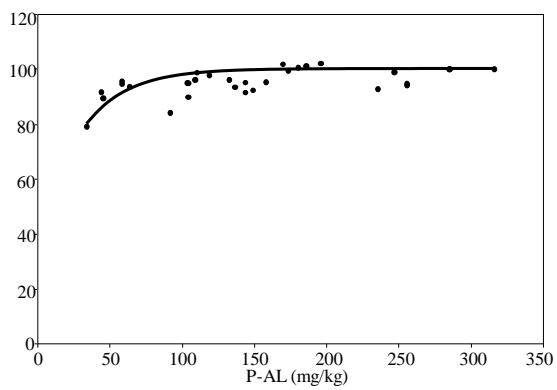
Tarwe



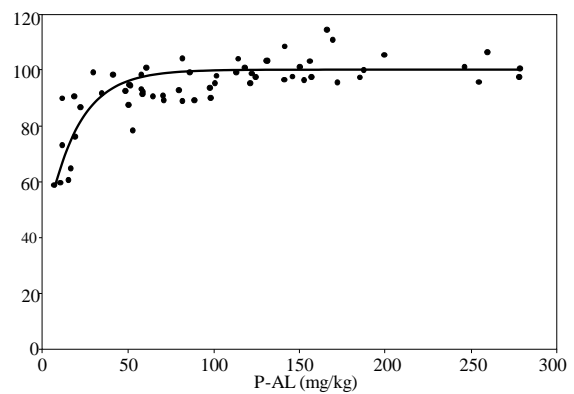
Suikerbiet



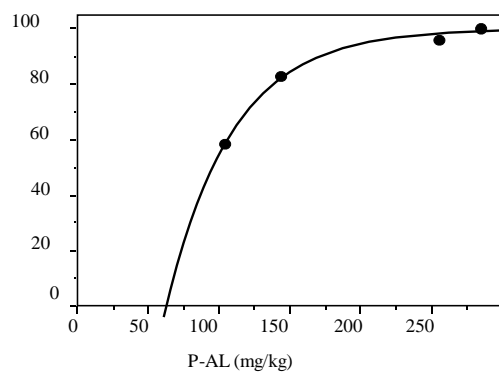
Wintergerst



Maïs



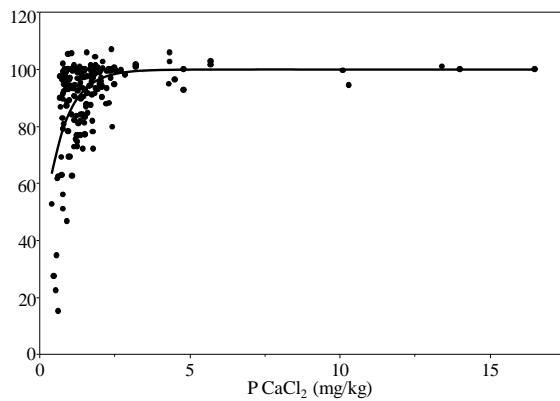
Aardappel



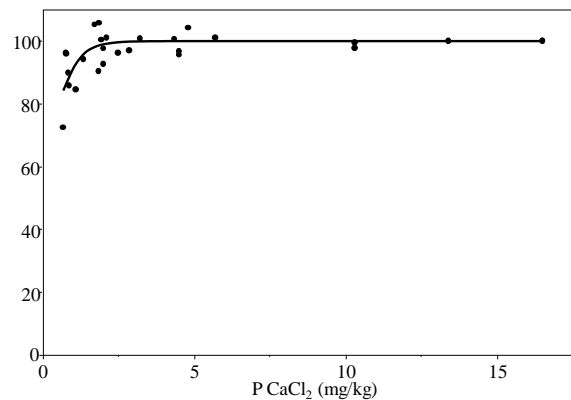
Figuur 38. Opbrengstcurves (relatieve opbrengst ten opzichte van P-AL) voor wintertarwe, suikerbiet, wintergerst, maïs en aardappel, op basis van de veldproeven van DWP 1.3



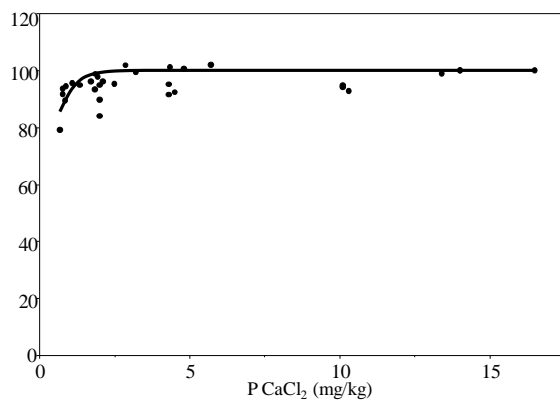
Tarwe



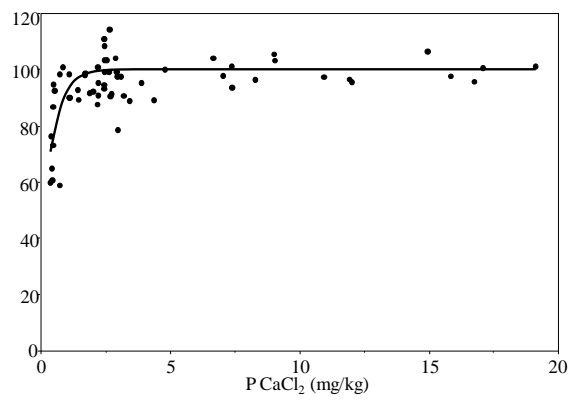
Suikerbiet



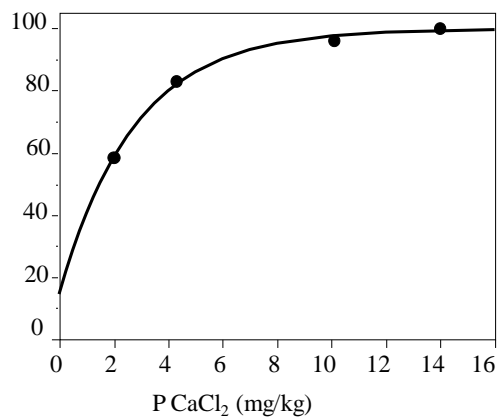
Wintergerst



Maïs



Aardappel



Figuur 39. Opbrengstcurves (relatieve opbrengst ten opzichte van P-CaCl<sub>2</sub> voor wintertarwe, suikerbiet, wintergerst, maïs en aardappel, op basis van de veldproeven van DWP 1.3

## 12.2 BEMESTINGSPROEVEN UIT HET VERLEDEN IN BELGIË

Door de selectie van de capaciteitstest P-AL als beste fosfortest voor bodems in Vlaanderen konden bemestingsproeven die in het verleden uitgevoerd werden door BDB aangewend worden als een bijkomende gegevensbron voor het afleiden van de kritische P-AL.

Zestien proefvelden, aangelegd tussen 1970 en 1988, met minstens twee P-bemestingstrappen, een gekend bodemfosforgehalte en gekende relatieve opbrengsten werden geselecteerd. Op de proefvelden werden uiteenlopende P-AL-waarden gemeten in een range van 50-430 mg P/kg. Een overzicht van de meerjarige proefvelden uit het verleden wordt gegeven in Tabel 50.

Tabel 50. Karakteristieken van voorgaande fosforproefvelden

Nr	Locatie	Periode	Gewassen*	Bodem-type	P-AL (mg P/kg)	pH-KCl	% C
1	Mol	'70-'71	Aardappelen, grasland	Zand	160-190	4,9	3,1
2	Weelde	'70-'72	Aardappelen, grasland, rogge	Zand	140-210	4,6	2,7
3	Reppel	'70-'74	Aardappelen, grasland, rogge, gerst	Zand	90-190	5,0	1,4
4	Houthalen	'70-'74	Aardappelen, grasland, rogge, gerst	Zand	140-290	4,7	2,2
5	Kasterlee	'70-'73	Aardappelen, grasland, maïs	Zand	210-300	4,6	3,3
6	Kaulille	'70-'74	Aardappelen, grasland, maïs	Zand	70-150	4,2	2,4
7	Niel-bij-As	'70-'72	Aardappelen, grasland, gerst	Zand	100-120	4,3	1,5
8	Olmen	'70-'73	Aardappelen, grasland, rogge, maïs	Zand	290-380	4,4	2,5
9	Retie	'70-'72	Aardappelen, grasland, rogge,	Zand	270-330	4,7	3,4
10	Bocholt	'70-'74	Aardappelen, grasland, maïs	Zand	200-315	4,7	2,1
11	Oostmalle	'70-'74	Aardappelen, grasland	Zand	370-430	4,9	2,5
12	Retie	'70-'74	Aardappelen, grasland, gerst	Zand	260-330	5,6	3,8
13	Ath	'73-'87	Aardappelen, wintertarwe, gerst, suikerbieten	Leem	60-330	6,4	0,9
14	Carlsbourg	'72-'81	Grasland, wintertarwe, maïs	Leem	50-390	5,3	2,9
15	Geetbets	'73-'80	Maïs, wintertarwe, gerst, suikerbieten	Zandleem	130-220	6,0	1,3
16	Jezus-Eik	'83-'88	Suikerbieten, wintertarwe, gerst	Leem	95-160	7,1	1,5

\*enkel akkerbouwpercelen werden opgenomen. Grasland is tijdelijk grasland. Permanent grasland werd niet opgenomen.

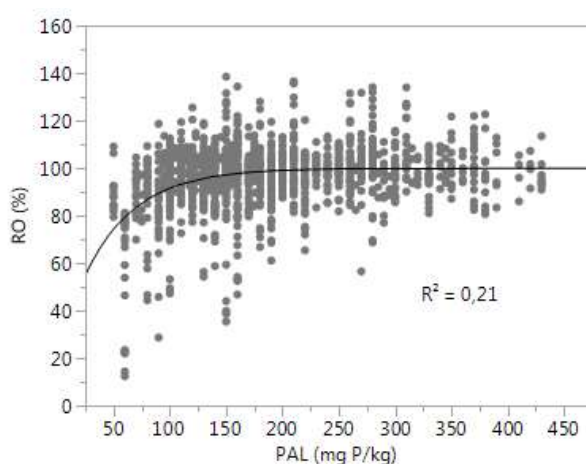
In deze proeven kwamen verscheidene teelten aan bod: aardappelen, tijdelijk grasland, maïs, gerst, rogge, wintertarwe, suikerbieten, spelt, voederbieten, haver en zomertarwe. Voor de teelten spelt, voederbieten, haver en zomertarwe waren te weinig observaties en deze werden niet meegenomen in de verdere analyse.

Op basis van deze proefvelden en voor de 7 teelten (aardappelen, tijdelijk grasland, maïs, gerst, rogge, wintertarwe en suikerbieten) werd een dataset van 1362 observaties (Tabel 51) bekomen. Naar analogie met de analyse van de veldproeven in omliggende regio's in DWP 1.3 (zie rapport luik 1), werden ook op basis van deze dataset de opbrengstcurves opgesteld voor P-AL (Figuur 40). Een algemene en gewasspecifieke kritische fosforbeschikbaarheid voor 95% relatieve opbrengst kon

worden afgeleid door de inverse van het Mitscherlichmodel en het gebruik van dummyvariabelen (Tabel 52).

Tabel 51. Aantal observaties per dataset voor elke teelt

	Aantal observaties							
	Totaal	Aard-appelen	Suiker-biet	Maïs	Tijdelijk grasland	Rogge	Gerst	Winter-tarwe
<b>Totale dataset</b>	1362	281	100	137	267	59	312	206
<b>pH-KCl gunstig</b>	928	205	100	60	132	29	214	188
<b>pH-KCl suboptimaal</b>	434	76	0	77	135	30	98	18



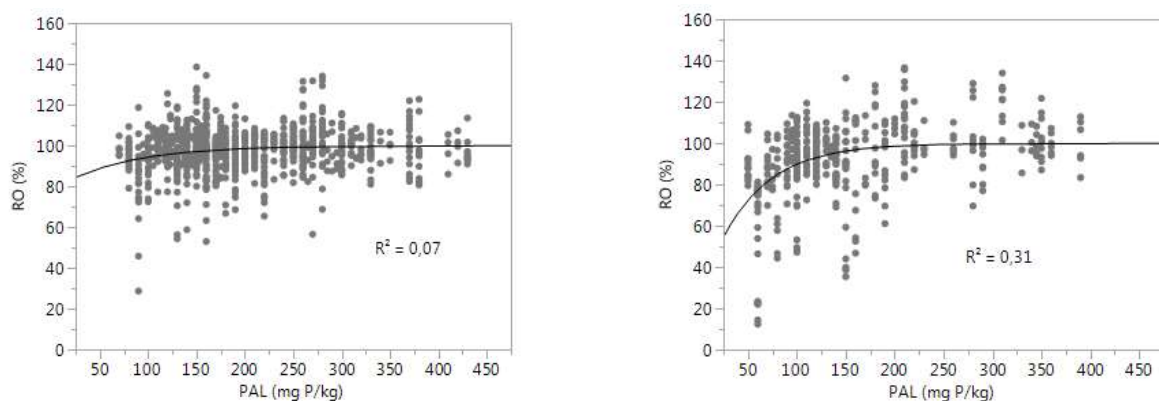
Figuur 40. Opbrengstcurve (relatieve opbrengst ten opzichte van P-AL) op basis van de oudere fosforproefvelden in België (BDB)

Tabel 52. Kritische fosforwaarden voor opbrengstderiving (RO = 95%) (mg P/kg) voor de drie datasets. pH-KCl is verondersteld gunstig te zijn bij bodemvruchtbaarheidsklasse “tamelijk laag”, “streefzone” en “tamelijk hoog”. Standaarddeviatie tussen haakjes

Gewas	Totale dataset		pH-KCl gunstig		pH-KCl suboptimaal	
<b>Algemeen</b>	123	(5)	109	(9)	135	(10)
<b>Aardappelen</b>	129	(8)	117	(17)	126	(14)
<b>Tijdelijk grasland</b>	84	(8)	81	(27)	80	(11)
<b>Maïs</b>	234	(12)	203	(38)	257	(21)
<b>Rogge</b>	162	(25)	/	/	/	/
<b>Suikerbieten</b>	76	(17)	81	(19)	/	/
<b>Gerst</b>	146	(07)	143	(16)	179	(14)
<b>Wintertarwe</b>	73	(14)	55	(19)	83	(28)

In tegenstelling tot de nieuwe bemestingsproeven (12.3) lagen de oudere proefvelden soms ook aan op percelen met een ongunstige pH. De dataset liet bijgevolg toe om onderscheid te maken tussen 2 groepen proeven: proefvelden op percelen met een gunstige pH-KCl (bodemvruchtbaarheidsklasse “tamelijk laag”, “streefzone” en “tamelijk hoog”) en proefvelden op percelen met een suboptimale pH-KCl (Tabel 51). De kritische fosforbeschikbaarheid kan bijgevolg bepaald worden bij gunstige pH-KCl en suboptimale pH-KCl (Tabel 52). Een vergelijking tussen beiden toont de invloed van de pH op de kritische fosforbeschikbaarheid Omwille van het beperkt aantal waarnemingen voor rogge wanneer

onderscheid gemaakt wordt in functie van de pH, wordt geen gewasspecifieke kritische waarde voor rogge bepaald bij gunstige en suboptimale pH.



Figuur 41. Opbrengstcurves (relatieve opbrengst ten opzichte van P-AL) op basis van de oudere fosforproefvelden in België op bodems met een gunstige pH-KCl (links) en bodems met een suboptimale pH-KCl (rechts)

Op basis van de oudere Belgische bemestingsproeven van BDB wordt voor 95% relatieve opbrengst een gemiddelde kritische P-AL van 123 mg P /kg afgeleid. Bij gunstige pH bedraagt de gemiddelde kritische fosforbeschikbaarheid 109 mg P/kg. De gemiddelde kritische fosforbodemwaarde bij suboptimale pH ligt hoger en bedraagt 135 mg P/kg, wat duidt op het belang van de zuurtegraad in het verhaal van fosforbemesting.

## 12.3 NIEUWE BEMESTINGSPROEVEN

### 12.3.1 Materiaal en methoden

Vooropgesteld wordt percelen te selecteren met P-AL in de buurt van de kritische P-AL voor het gewas bepaald op basis van DWP 1.3 en met pH-KCl en %C in de streefzone, net daaronder of daarboven. Omdat deze kritische drempelwaarde nog niet gekend was bij de perceelselectie voor de proeven van 2016, werden de percelen voor 2016 geselecteerd op basis van een P-AL onder de BDB-streefzone.

In de databank van Bodemkundige Dienst van België werd uit de gegevens van de afgelopen drie jaar een eerste selectie van percelen gemaakt op basis van volgende basiscriteria:

- pH-KCl: in streefzone of net buiten streefzone zijnde tamelijk laag of tamelijk hoog
- %C: in streefzone of net buiten streefzone zijnde tamelijk laag of tamelijk hoog
- P-AL: onder BDB-streefzone zijnde tamelijk laag, laag en zeer laag
- Teelt: wintertarwe, aardappelen, maïs
- Bodemtextuur: leem, zandleem en zand (streven naar gelijk aandeel)

Enmaal een lijst met potentieel geschikte percelen per gewas uit de databank van BDB gedestilleerd werd, werden de landbouwers van deze percelen telefonisch gecontacteerd. Er werd gestart met de meest geschikte percelen: bodems in de streefzone voor pH en %OC en P-AL onder de streefzone. Indien geen dergelijke geschikte percelen werden gevonden, werden eventueel percelen in de klasse net boven of net onder de streefzone voor pH en %OC geselecteerd. Bij het eerste contact met de landbouwer werd gepolst naar geschiktheid van het perceel (geschiedenis, homogeniteit,...), of het beoogde gewas inderdaad op het perceel kwam en of de landbouwer wenste deel te nemen. Bij een positief antwoord werd een eerste perceelsbezoek gepland waarbij de geschiktheid van het perceel verder werd nagegaan. Er werd op een geschikt stuk voor de proef een nieuw bodemstaal genomen (0-23 cm) waarop P-AL opnieuw werd bepaald, om na te gaan of deze fosforbeschikbaarheid niet teveel afweek van de gemeten waarde voor het ganse perceel. Indien deze te hoog was, werd een

nieuw perceel gezocht. Zowel in 2016, 2017 als 2018 werden na controle op het terrein verschillende percelen afgekeurd, zodat telkens opnieuw op zoek werd gegaan naar geschikte percelen voor een goede bemestingsproef.

Met behulp van GPS en visueel goed zichtbare paaltjes werd het proefoppervlak uitgezet. Op dit proefoppervlak mag er door de landbouwer niet bemest worden met fosfor (kunstmest noch dierlijke of andere bemesting). Het proefoppervlak bestaat uit 12 of 16 proefveldjes aangelegd tussen de rijsporen, waarvan het oppervlak per veldje varieert tussen 25 en 90 m<sup>2</sup> afhankelijk van het gewas, de specifieke perceelskenmerken en het materiaal van de landbouwer. Op elk proefperceel worden **4 bemestingstrappen** (P1-P4) aangelegd: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4) (Tabel 53). Doordat de dosis op een groter oppervlak dan gepland werd toegepast bij de maïsproef in Bellem (2018), zijn de fosforbemestingsdosisen daar iets lager: 0, 67, 133 en 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha in plaats van 0, 80, 160 en 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. De aanleg gebeurt in een gerandomiseerd blokdesign (drie of vier blokken)<sup>1</sup>. De fosfordosisen worden toegepast met behulp van kunstmest (TSP). Overige nutriënten worden in voldoende mate toegediend uitgaande van het advies op basis van de standaardgrondontleding en de N-index.

Tabel 53. Fosforbemestingsdosisen (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) voor de 4 trappen van de bemestingsproeven: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), tweemaal de gewasexport (P3) en driemaal de gewasexport (P4)

	P1	P2	P3	P4
Wintertarwe	0	80	160	240
Maïs*	0	80	160	240
Aardappel	0	60	120	180

\* Bellem: 0-67-133-200 in plaats van 0-80-160-240

Andere veldwerkzaamheden dan bemesting worden overgelaten aan de landbouwer en zijn gelijk voor alle proefveldjes. Binnen de proefveldjes wordt een kleine strook (10 m<sup>2</sup>) geselecteerd waarbinnen bodemstaalnames en de opbrengstmeting (oogst) worden gedaan. De oogst wordt uitgevoerd met proefveldoogstmachines of met de hand, afhankelijk van het gewas.

Na het wegen van de oogst per proefveld werd een representatief substaal per proefveld gewogen, gedurende 3 dagen gedroogd bij 70°C (of 16 uur bij 105°C) en opnieuw gewogen om het droge-stofgehalte te bepalen. Hiermee kan de opbrengst in droge stof per ha berekend worden. Het gedroogde substaal werd daarna gemalen en het fosforgehalte werd bepaald per proefveldje. Dit fosforgehalte werd gecorrigeerd voor het restvochtgehalte (meting bij 105°C). Voor aardappelen werd als extra bepaling getrieerd in volgende fracties: < 35 mm, 35-50 mm, > 50 mm en uitval (groen en/of misvormd). Daarnaast werd ook het onderwatergewicht van de aardappelooft bepaald.

Er wordt met behulp van het statistische programma JMP (SAS) nagegaan of de verschillen van de opbrengsten (droge stof) tussen de verschillende bemestingsdosisen statistisch significant zijn. Dit wordt op twee verschillende manieren uitgevoerd. Eerst wordt de bemestingsdosis als categorische variabele beschouwd (vier verschillende behandelingen), wat toelaat verschillen tussen verschillende behandelingen met Anova en Tukey na te gaan. Daarnaast wordt de bemestingsdosis ook als continue variabele beschouwd (variërend tussen 0 en 160/240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). De statistische test wordt uitgevoerd met een mixed model waarbij de bemestingsdosis van het proefveldje als continue 'fixed' variabele wordt ingesteld, en het blok waarin het proefveldje gelegen is als 'random' effect.

<sup>1</sup> BDB heeft, conform de interne procedures en werkvoorschriften in het kader van ISO9001, telkens 4 herhalingen aangelegd.

Bij afwezigheid van een blokeffect wordt alternatief naar een mogelijk effect van bemestingsdosis op de droge stofopbrengst gezocht met behulp van de Mitscherlichcurve. De relatieve opbrengsten (RO, procentuele opbrengst ten opzichte van de gemiddelde opbrengst bij de hoogste bemestingsdosis) worden gefit ten opzichte van de bemestingsdosis (P-dosis) met behulp van de Mitscherlich-vergelijking:

$$RO(\%) = b_0 + (100 - b_0) \cdot (1 - \exp(-b_1 \cdot P - dosis)) \quad (\text{Vergelijking 1})$$

met  $b_0$  en  $b_1$  fitting parameters. Indien de helling  $b_1$  significant groter is dan nul, neemt de opbrengst significant toe met de bemestingsdosis.

### 12.3.2 Geselecteerde percelen

In 2016 werden 6 percelen geselecteerd, in 2017 7 en in 2018 10. Alle drie de jaren waren vrij uitzonderlijk qua weersomstandigheden. Door onder andere de vele neerslag in het late voorjaar zijn de opbrengsten van 2016 laag. In 2017 was er een zeer droog voorjaar, en in 2018 was er een lange droogteperiode tussen mei en augustus. Dit onderstreept nog eens extra het belang van werken met relatieve opbrengsten: alle opbrengsten worden vergeleken binnen één perceel. Alle behandelingen hebben dus dezelfde omstandigheden meegemaakt.

De geselecteerde percelen voor de bemestingsproeven, met hun bodemeigenschappen worden weergegeven in Tabel 54. Twee locaties werden gedurende twee jaar gebruikt: Haasrode (aardappel in 2016, perceel 6, en wintertarwe in 2017, perceel 9) en Schoonaarde (maïs in 2017, perceel 10, en wintertarwe in 2018, perceel 15). Eén locatie werd gedurende drie jaar gebruikt: Lierde (aardappel in 2016, perceel 3, maïs in 2017, perceel 11 en wintertarwe in 2018, perceel 14). De behandelingen werden daarbij telkens op dezelfde subplot uitgevoerd.

Tabel 54. Locaties voor de bemestingsproeven met bodemeigenschappen

Nr	Jaar	Gewas	Gemeente	Grondsoort	P-AL* (mg P/kg)	pH-KCl	%C
1	2016	Wintertarwe	Herfelingen	Leem	80	6,1	1,3
2	2016	Maïs	Zarlardinghe	Leem	60	6,8	1,4
3	2016	Aardappel	Lierde	Leem	90	6,4	1,0
4	2016	Wintertarwe	Korbeek-Lo	Leem	74	6,4	0,9
5	2016	Maïs	Lille	Zand	78	5,2	2,5
6	2016	Aardappel	Haasrode	Leem	100	6,5	1,3
7	2017	Wintertarwe	Diest	zand	80	6,2	1,2
8	2017	Wintertarwe	Bekkevoort	zandleem	79	6,0	0,9
9	2017	Wintertarwe	Haasrode	zandleem	85	5,2	1,4
10	2017	Maïs	Schoonaarde	zandleem	91	5,1	1,5
11	2017	Maïs	Lierde	leem	105	6,1	0,9
12	2017	Aardappelen	Assenede	zand	110	5,9	1,3
13	2017	Aardappelen	Kessel-Lo	zandleem	178	6,7	1,1
14	2018	Wintertarwe	Lierde	leem	111	6,1	0,9
15	2018	Wintertarwe	Schoonaarde	zandleem	96	5,1	1,5
16	2018	Maïs	Bellem	zand	92	5,4	2,0
17	2018	Maïs	Lummen	Zandleem	65	6,0	1,8
18	2018	Maïs	Dilsen-Stokkem	Leem	64	5,8	2,6
19	2018	Aardappel	Kruishoutem	Lemig zand	74	5,8	1,3
20	2018	Aardappel	Wachtebeke	Zand	90	5,9	3,5
21	2018	Aardappel	Lubbeek	Leem	141	6,7	1,2
22	2018	Aardappel	Zoutleeuw	Leem	115	6,6	1,0
23	2018	Aardappel	Bekkevoort	Zandleem	62	6,7	1,4

\* Specifiek gemeten in het proefoppervlak.

### 12.3.3 Resultaten

#### 12.3.3.1 Perceel 1: wintertarwe

Op het perceel in Herfelingen werden in maart 2016 de verschillende fosforbemestingstrappen aangelegd. De wintertarwe was dan reeds in ontwikkeling, waardoor minder geschikte plekken (gewas minder goed ontwikkeld) ontweken konden worden voor de selectie van het proefvlak. De individuele veldjes zijn elk 15 meter lang en 2,5 meter breed.

Op 20 mei waren er visueel geen verschillen te merken tussen de verschillende bemestingstrappen (Figuur 42). Ook op 6 juli werden met het oog geen verschillen waargenomen.



Figuur 42. Visuele waarnemingen van wintergerst op perceel 1 op 20 mei 2016 (bovenaan: overzicht, onderaan: P1 (nulbemesting) en P4 (drie maal de gewasexport))

Op 6 augustus werd het perceel geoogst (Figuur 43). De opbrengstcijfers worden weergegeven in Tabel 55. De opbrengst is het laagst bij de nulbemesting en het hoogst bij de hoogste bemestingsdosis. Bij beschouwen van de bemestingsdosis als categorische variabele worden statistisch geen verschillen tussen de bemestingsbehandelingen vastgesteld ( $p=0,0836$ , Tabel 55). Zonder randomisatie van de blokfactor werd een significant blokeffect vastgesteld ( $p < 0,001$ ). In het mixed model met een gerandomiseerde blokfactor bleek het effect van de bemestingsdosis significant ( $p= 0,0114$ ) (Figuur 44). Er kan besloten worden dat in deze proef de relatief **lage fosforbeschikbaarheid (80 mg P/kg, wel boven de voorlopig vastgestelde kritische waarde (Tabel 49)) limiterend was voor de opbrengst van wintergerst.**

Voor het hectolitergewicht werden geen verschillen waargenomen tussen de behandelingen (Tabel 55). Het fosforgehalte van het graan, gemiddeld 0,38% (Tabel 55) was hoger dan het gemiddeld kritisch fosforgehalte in graan bij oogst, zijnde 0,30-0,35% (Tabel 81). Hier waren ook geen significante verschillen tussen de behandelingen waarneembaar ( $p= 0,6267$  in het mixed model). De verschillen door bemestingsdosis waren dus in tegenstelling tot de verwachtingen duidelijker (en significant verschillend) voor de opbrengstcijfers dan voor het fosforgehalte in het graan. Vaak worden bij lage fosforbeschikbaarheid eerst verschillen in fosforgehalte en pas bij verder dalen van de fosforbeschikbaarheid, ook verschillen in opbrengst waargenomen (Amery and Vandecasteele, 2015).

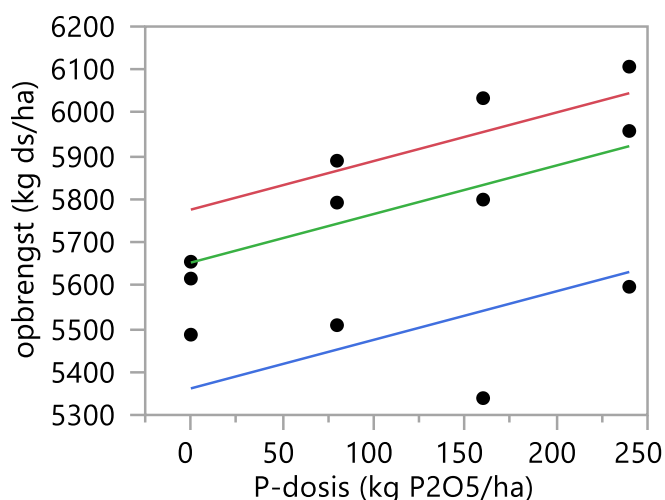




Figuur 43. Oogst van wintertarwe op perceel 1 op 6 augustus 2016 met de proefvelddorser

Tabel 55. Opbrengstcijfers en fosforgehalte van het graan van de bemestingsproef van wintertarwe in 2016 (perceel 1) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof,, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Opbrengst vers (kg vers/ha)	Opbrengst droog (kg ds/ha)	Hectolitergewicht (kg/hl)	P-gehalte graan (%)
P1	0	6970 (92)	5586 (88) <sup>A</sup>	65,0 (2,0) <sup>A</sup>	0,38 (0,02) <sup>A</sup>
P2	80	7148 (201)	5730 (198) <sup>A</sup>	65,6 (2,3) <sup>A</sup>	0,39 (0,01) <sup>A</sup>
P3	160	7119 (426)	5724 (353) <sup>A</sup>	64,9 (0,8) <sup>A</sup>	0,37 (0,01) <sup>A</sup>
P4	240	7321 (309)	5887 (262) <sup>A</sup>	64,7 (2,5) <sup>A</sup>	0,38 (0,01) <sup>A</sup>



Figuur 44. Opbrengst (kg droge stof per ha) van de wintertarwe op perceel 1 (2016) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect is duidelijk (verschillende kleur per blok), alsook het effect van de P-bemestingsdosis (significant positief, p= 0,0114).

### 12.3.3.2 Perceel 2: maïs

Op 22 april 2016 werd maïs gezaaid op het perceel in Zarlardinge (P-AL van 60 mg P/kg). Twee dagen later werden de bemestingstrappen aangelegd in veldjes parallel met de zaailijnen. De individuele proefveldjes waren elk 2,5 m breed en 10 meter lang.

Op 20 mei, kort na de opkomst, waren er visueel geen verschillen te merken tussen de verschillende bemestingstrappen (Figuur 45). Op 10 juni waren er wel duidelijke verschillen zichtbaar tussen de behandelingen (Figuur 46), evenals op 6 juli (Figuur 47). Hoe lager de fosforbemesting, hoe kleiner de maïsplanten ontwikkeld en hoe paarser de bladeren waren. Bij bezoek van het proefveld op 1 september waren deze verschillen visueel weggewerkt. Voor alle behandelingen waren de maïsplanten gemiddeld meer dan 2 meter hoog.



Figuur 45. Visuele waarnemingen van maïs op perceel 2 op 20 mei 2016 (links: overzicht, rechts: P1 (nultbemesting) en P4 (drie maal de gewasexport))



Figuur 46. Visuele waarnemingen van maïs op perceel 2 op 10 juni 2016 (links: maïs bij P1 (nulbemesting) is kleiner en paarser dan bij P4 (drie maal de gewasexport), rechts)



Figuur 47. Visuele waarnemingen van maïs op perceel 2 op 6 juli 2016 (links: overzicht, rechts staat een P4-behandeling (drie maal de gewasexport) vooraan op de foto, P1 (= nulbemesting) daarachter)

Het perceel werd op 6 oktober geoogst (Figuur 48). Van elk proefveldje werd 5 meter van de middelste twee rijen afgekapt en gewogen. Omwille van de waargenomen variabele zaaiïfstand binnen de rij, werden ook het aantal geoogste maïsplanten geteld en werd de afgewogen maïs massa daarvoor gecorrigeerd (Tabel 56).



Figuur 48. Oogst van de bemestingsproef van maïs op 6 oktober 2016: per proefveldjes telkens 2 rijen van 5 meter lang

Tabel 56. Opbrengstcijfers en fosforgehalte van de bemestingsproef van maïs in 2016 (perceel 2 voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). De opbrengst wordt zowel weergegeven zonder correctie als met correctie volgens het aantal planten (zie tekst). (ds: droge stof,, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst		Droge opbrengst		P-gehalte plant (%)
		(ton vers/ha)	(ton ds/ha)	(ton ds/ha)	(ton ds/ha)	
		Niet-gecorrigeerd	Gecorrigeerd	Niet-gecorrigeerd	Gecorrigeerd	
<b>P1</b>	0	49,8 (5,2)	47,4 (2,7)	16,6 (1,7) <sup>AB</sup>	15,8 (0,8) <sup>A</sup>	0,20 (0,03) <sup>A</sup>
<b>P2</b>	80	49,0 (5,6)	51,0 (8,0)	16,8 (1,8) <sup>AB</sup>	17,5 (2,4) <sup>A</sup>	0,20 (0,04) <sup>A</sup>
<b>P3</b>	160	43,4 (8,2)	43,8 (6,8)	14,8 (3,5) <sup>B</sup>	14,9 (2,5) <sup>A</sup>	0,21 (0,04) <sup>A</sup>
<b>P4</b>	240	55,5 (3,5)	54,2 (1,2)	19,5 (0,5) <sup>A</sup>	19,0 (1,0) <sup>A</sup>	0,19 (0,02) <sup>A</sup>

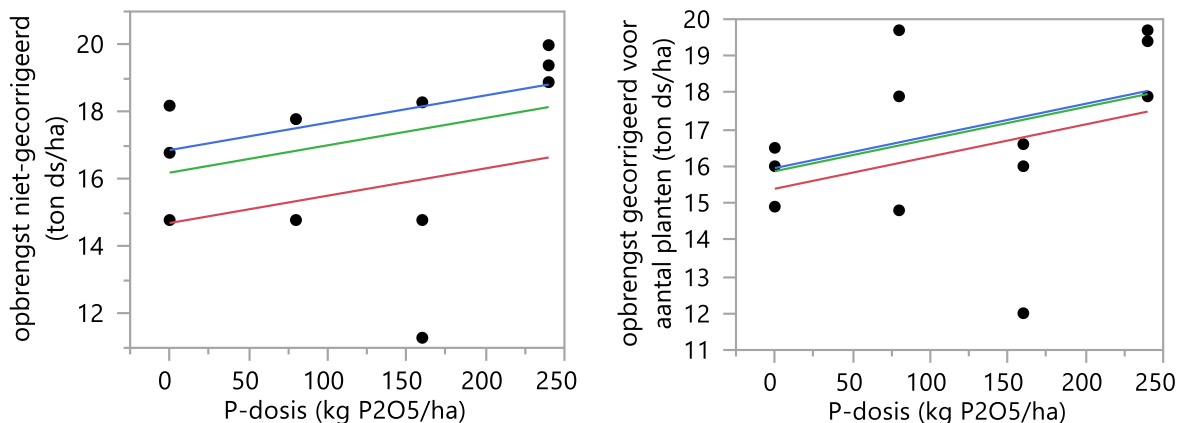
De gemiddelde maïsoopbrengst was het laagst voor de behandeling met 160 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha en het hoogst voor de behandeling met 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (Tabel 56). Indien de bemestingsdosis als categorische variabele werd beschouwd, werd voor de niet-gecorrigeerde droge stofopbrengst zowel een significant bemestings- (p=0,035) als blokeffect (p=0,031) waargenomen. Met de Tukey-test bleek de niet gecorrigeerde opbrengst bij 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha significant hoger dan deze bij 160 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (Tabel 56). Bij de gecorrigeerde opbrengst waren er geen significante verschillen waarneembaar op bemestings- (p=0,074) en blokniveau (p=0,167), ook niet met de Tukey-test.

Er werd zowel voor de niet-gecorrigeerde als voor de gecorrigeerde droge-stofopbrengst geen significant blokeffect (p= 0,21 en = 0,40, respectievelijk) waargenomen in het mixed model met bemestingsdosis als continue variabele. In het mixed model met random blokfactor werd geen significant effect van de P-bemestingsdosis op de droge stofopbrengst zonder correctie voor het aantal planten (p=0,282) of met correctie voor het aantal planten (p=0,249) vastgesteld (Figuur 49).

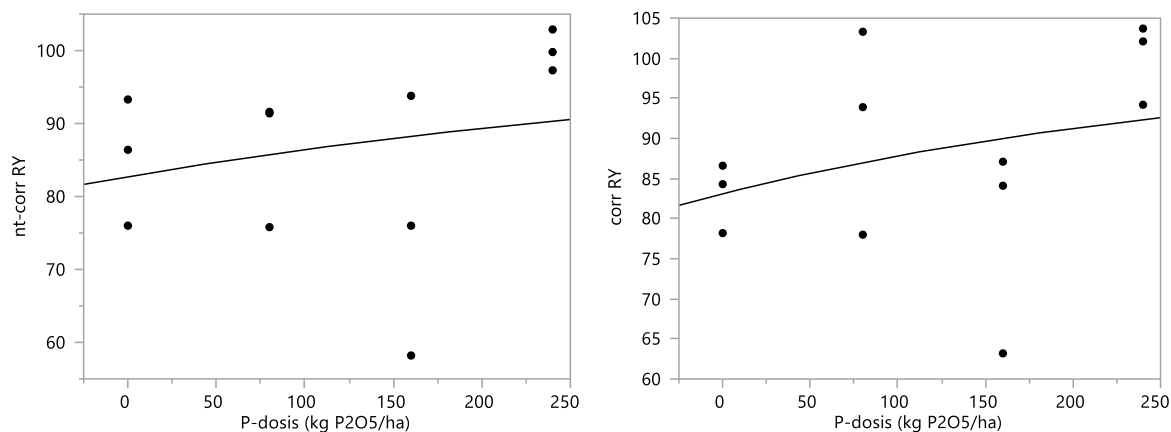
Er werd alternatief naar een mogelijk effect van de bemestingsdosis op de droge stofopbrengst gezocht met behulp van de Mitscherlichcurve. Helling b1 bleek zowel voor de niet-gecorrigeerde relatieve droge stofopbrengst (0,0024 (BI: -0,0044 – 0,0130)) als voor de gecorrigeerde relatieve droge stofopbrengst (0,0033 (BI: -0,0038 – 0,0187)) positief maar niet significant verschillend van nul (Figuur 50).

Ook voor het fosforgehalte (gemeten in de ganse gehakselde plant) werd geen significant effect van de bemestingsdosis vastgesteld (p=0,768 bij categorische bemestingsdosis, p=0,672 bij continue variabele bemestingsdosis). Het gemiddelde fosforgehalte (0,20%) was ook hoger dan het kritische fosforgehalte (0,14-0,15%, Tabel 81).

Algemeen kan geconcludeerd worden dat ondanks de relatief lage fosforbeschikbaarheid op het perceel (60 mg P/kg) de slechte initiële groei van de maïsplantjes zonder fosforbemesting werd uitgevlakt naar de oogst toe. Enkel voor de niet-gecorrigeerde droge stofopbrengst werd een significant verschil gevonden tussen de bemestingsdosis 160 en 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (indien beschouwd als categorische variabele).



Figuur 49. Opbrengst (ton droge stof per ha) van snijmaïs op perceel 2 (2016) (links: niet gecorrigeerd voor aantal planten, rechts: gecorrigeerd voor aantal planten) in functie van de bemestingsdosis (kg  $P_2O_5$ /ha). Zowel het blokeffect (verschillende kleur per blok) als het effect van de P-bemestingsdosis zijn niet-significant (zie tekst).



Figuur 50. Mitscherlichcurve van de relatieve opbrengst van snijmaïs op perceel 2 (2016) (links: niet gecorrigeerd voor aantal planten, rechts: gecorrigeerd voor aantal planten) in functie van de bemestingsdosis (kg  $P_2O_5$ /ha).

### 12.3.3.3 Perceel 3: aardappelen

Op 22 april 2016 werden de bemestingstrappen aangelegd op het perceel in Lierde ( $P-AL = 90$  mg P/kg). De dag daarna werden de aardappelen geplant. De individuele proefveldjes zijn elk 5 meter breed en 10 meter lang.

Er werden geen visuele verschillen tussen de behandelingen waargenomen tijdens de verschillende bezoeken aan het proefveld (Figuur 51). Op 7 september werden de aardappelplanten doodgespoten en op 20 september geoogst. De opbrengstcijfers zijn terug te vinden in Tabel 57. Met de bemestingsdosis als categorische variabele werden zowel voor de totale droge stofopbrengst ( $p=0,464$ ) als voor de opbrengst van de verschillende fracties geen significante verschillen tussen de bemestingsdossissen vastgesteld. Er werd geen significant blokeffect ( $p=0,566$ ) waargenomen bij de totale droge-stofopbrengst. In het mixed model met random blok-factor en opbrengstdosis als continue variabele werd geen significant effect van de P-bemestingsdosis op de totale droge-stofopbrengst ( $p=0,543$ ) waargenomen (Figuur 52). Ook voor de opbrengst van de verschillende fracties werd geen significant effect van de fosforbemestingsdosis vastgesteld, met uitzondering van de fractie 'uitval' (groene en misvormde aardappelen,  $p= 0,021$ ). Deze fractie maakte slechts 4% uit van de totale opbrengst (Tabel 57). Een Mitscherlich-fit van de opbrengstdata bleek niet mogelijk.

Echter, voor het fosforgehalte in de aardappelknol (Tabel 57) is er wel een significante toename met de fosforbemestingsdosis als continue variabele ( $p=0,0083$ , Figuur 53). Het fosforgehalte is voor de

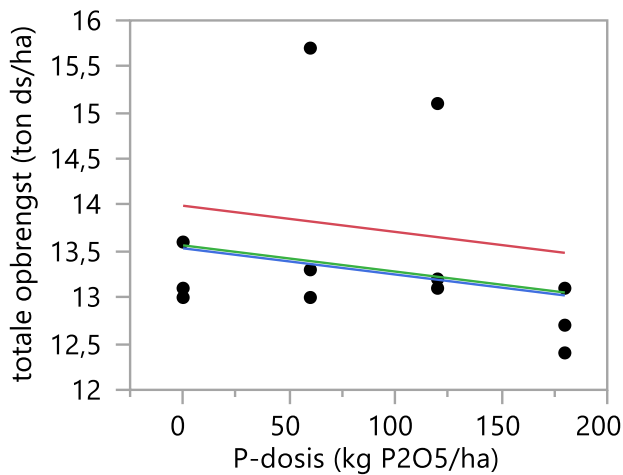
behandeling zonder fosforbemesting (0,14%) ook lager dan het kritisch fosforgehalte (0,16%, Tabel 81). Bij beschouwing van de bemestingsdosis als categorische variabele is er geen significant verschil in fosforgehalte tussen de verschillende fosfortrappen ( $p=0,108$ ). Er kan geconcludeerd worden dat op dit perceel met relatief lage fosforbeschikbaarheid ( $P\text{-AL} = 90 \text{ mg P/kg}$ ) er **een effect van fosforbemesting op het fosforgehalte maar niet op de droge stofopbrengst** van aardappelen kon worden vastgesteld.



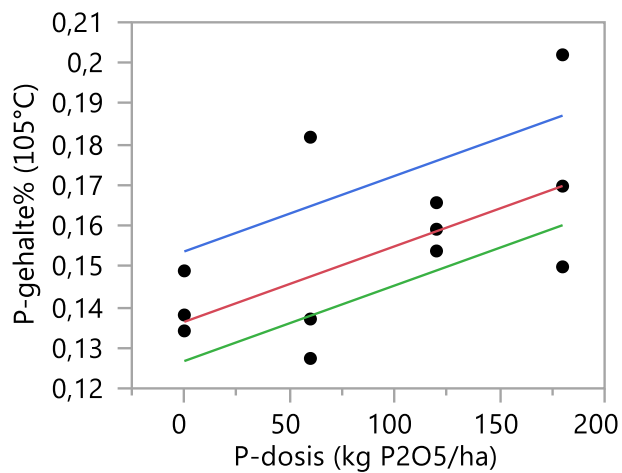
Figuur 51. Overzicht van het proefperceel 3 met aardappelen (geen visuele verschillen tussen de behandelingen waar te nemen).

Tabel 57. Opbrengstcijfers (ton droge stof per ha, totaal en voor de verschillende fracties) en fosforgehalte van de bemestingsproef met aardappelen in 2016 (perceel 3) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof,, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

P-dosis	Verse opbrengst (ton vers/ha)	droge stofopbrengst (ton ds/ha)					P-gehalte (%)	
		totaal	< 35 mm	35-50 mm	>50mm	uitval		
P1	0	52,4 (2,4)	13,2 (0,3) <sup>A</sup>	0,5 (0,1) <sup>A</sup>	4,5 (0,3) <sup>A</sup>	7,5 (0,1) <sup>A</sup>	0,4 (0,1) <sup>A</sup>	0,14 (0,01) <sup>A</sup>
P2	60	55,7 (4,5)	14,0 (1,5) <sup>A</sup>	0,4 (0,1) <sup>A</sup>	4,4 (0,1) <sup>A</sup>	8,4 (1,3) <sup>A</sup>	0,4 (0,2) <sup>A</sup>	0,16 (0,03) <sup>A</sup>
P3	120	55,7 (1,9)	13,8 (1,1) <sup>A</sup>	0,5 (0,1) <sup>A</sup>	4,3 (0,6) <sup>A</sup>	8,0 (0,9) <sup>A</sup>	0,7 (0,2) <sup>A</sup>	0,16 (0,01) <sup>A</sup>
P4	180	51,2 (3,2)	12,7 (0,3) <sup>A</sup>	0,5 (0,1) <sup>A</sup>	4,3 (0,4) <sup>A</sup>	6,9 (0,6) <sup>A</sup>	0,7 (0,2) <sup>A</sup>	0,18 (0,04) <sup>A</sup>



Figuur 52. Totale opbrengst (ton droge stof per ha) van aardappelen op perceel 3 (2016) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Zowel het blokeffect (verschillende kleur per blok) als het effect van de P-bemestingsdosis zijn niet-significant (zie tekst).



Figuur 53. Fosforgehalte (%P) in de aardappelknol gemeten op perceel 3 (2016) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Er werd een positief significant effect van de fosforbemestingsdosis vastgesteld ( $p=0,0083$ ).

#### 12.3.3.4 Perceel 4: Wintertarwe

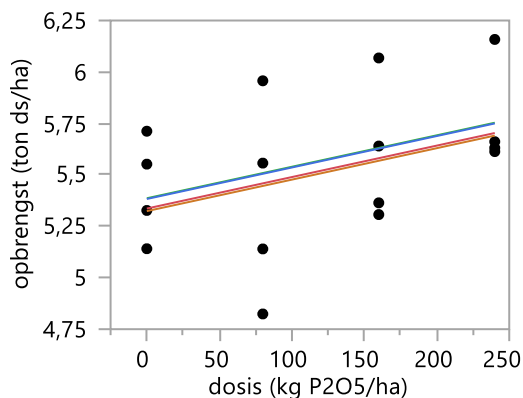
Op het perceel wintertarwe in Korbeek-Lo werden op 16 maart 2016 de verschillende fosforbemestingstrappen aangelegd. De individuele proefveldjes werden 9 meter breed en 10 meter lang. Op 24 mei 2016 waren er geen visueel merkbare verschillen tussen de verschillende bemestingstrappen (Figuur 54).



Figuur 54. Visuele waarnemingen van wintertarwe op perceel 4 op 24 mei 2016-overzicht

De tarwe werd geoogst op 14 augustus. Per plot werd ongeveer 24 m<sup>2</sup> geoogst. Per individueel veldje werd de verse opbrengst van korrel en stro bepaald. Van beiden werd een staal genomen waarop het droge stofgehalte en het N- en P-gehalte bepaald werden. Van de korreloogst werd tevens het hectolitergewicht bepaald.

De korrelopbrengsten (vers- bij 15 % vocht en gedroogd) worden weergegeven in Tabel 58. Wanneer de P-bemestingsdosis als categorische variabele beschouwd wordt, blijken geen statistische verschillen tussen de bemestingsstrappen ( $p=0.54$ ). Op dit proefveld bleek ook zonder randomisatie van de blok-factor geen significant blokeffect ( $p=0.99$ ).



Figuur 55. Opbrengst (ton droge stof per ha) van de wintertarwe op perceel 4 (2016) in functie van de P-bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) Zowel het blokeffect (verschillende kleur per blok) als het effect van de P-bemestingsdosis zijn niet-significant (zie tekst).

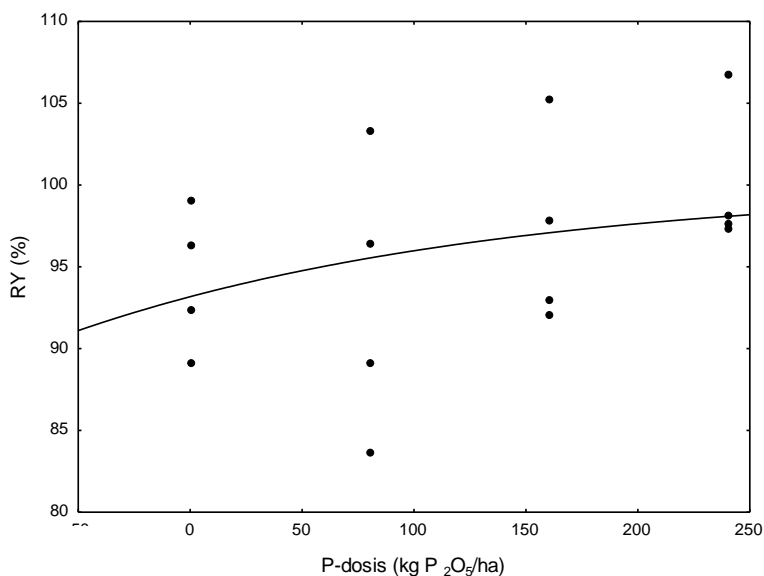
In het mixed-model met randomisatie van de blok-factor bleek de **P-bemestingsdosis geen significant effect** te hebben ( $p=0,17$ ) op de **droge-stofopbrengst van het graan**. Noch het hectolitergewicht, noch het fosforgehalte van het graan werden significant beïnvloed door de P-bemestingsdosis (respectievelijk  $p=0,27$  en  $p=0,79$ ). Het gemiddelde fosforgehalte van het graan bedroeg 0,33 % en schommelde dus rond het het gemiddeld kritisch fosforgehalte in graan bij oogst, zijnde 0,30-0,35%.

Er werd alternatief naar een mogelijk effect van de bemestingsdosis op de droge-stofopbrengst gezocht met behulp van de Mitscherlichcurve (Figuur 56). Helling b1 bleek positief (0,005) maar niet significant verschillend van nul ( $p=0,29$ ; BI: -0,005-0,015).



Tabel 58. Opbrengstcijfers en fosforgehalte van het graan van de bemestingsproef wintertarwe in 2016 (perceel 4) voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof,, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele)

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Opbrengst vers-15% vocht (kg /ha)	Opbrengst droog (kg ds/ha)	Hectoliter- gewicht (kg/hl)	P-gehalte graan (%)
P1	0	6291 (283)	5433 (251) <sup>A</sup>	71,3 (1,2) <sup>A</sup>	0,34 (0,01) <sup>A</sup>
P2	80	6222 (585)	5369 (494) <sup>A</sup>	71,3 (1,5) <sup>A</sup>	0,33 (0,01) <sup>A</sup>
P3	160	6482 (417)	5595 (348) <sup>A</sup>	70,5 (0,5) <sup>A</sup>	0,33 (0,02) <sup>A</sup>
P4	240	6669 (286)	5766 (262) <sup>A</sup>	70,6 (0,9) <sup>A</sup>	0,33 (0,01) <sup>A</sup>



Figuur 56. Mitscherlichcurve van de relatieve opbrengst (%) van wintertarwe op perceel 4 in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha).

### 12.3.3.5 Perceel 5: Maïs

Op het perceel in Lille werd op 25 april 2016 de fosforbemestingsproef uitgezet en werden de verschillende bemestingstrappen aangelegd. Daags nadien werd de maïs gezaaid. De individuele veldjes waren 6 m breed en 9 m lang.

De behandeling zonder fosfor was steeds duidelijk te onderscheiden. Ook de gewasquoteringen op 21 juni en 5 augustus bevestigden dit onderscheid (Tabel 59).

De proef werd op 30 september geoogst. Van elk proefveldje werden 4 rijen van 4 m lang geoogst. De opbrengstresultaten van de P-bemestingsproef op perceel 5 worden getoond in Tabel 60.

Tabel 59. Gewasbeoordeling\* maïs op proefperceel 5 op 21/06 en 5/08/2016 voor de 4 P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	21/06	5/08
P1	0	5	5
P2	80	7	6
P3	160	8	8
P4	240	8	8

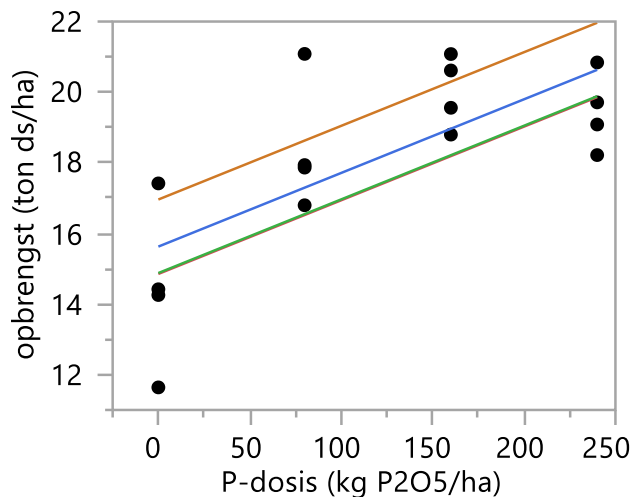
\*5 duidt op een zwakke ontwikkeling en blekere bladstand

\*\* 8 duidt op een sterke ontwikkeling en donkere bladstand

Tabel 60. Opbrengstcijfers en plantfosforgehalte van de bemestingsproef maïs in 2016 (perceel 5) voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton vers/ha)	Droge stofopbrengst (ton ds/ha)	P-gehalte plant (%)
P1	0	35,9 (6,5)	14,43 (2,36) <sup>B</sup>	0,25 (0,02) <sup>A</sup>
P2	80	47,1 (6,2)	18,42 (1,85) <sup>A</sup>	0,26 (0,03) <sup>A</sup>
P3	160	51,1 (4,0)	20,01 (1,03) <sup>A</sup>	0,24 (0,03) <sup>A</sup>
P4	240	50,6 (3,4)	19,46 (1,10) <sup>A</sup>	0,25 (0,02) <sup>A</sup>

De gemiddelde opbrengst was het laagst zonder fosforbemesting. Indien de bemestingsdosis als categorische variabele beschouwd werd, werd zowel een significant bemestings- ( $p=0.005$ ) als blokeffect ( $p=0.000$ ) waargenomen. Volgens de Tukey-test was het niet bemeste object significant verschillend van de bemeste objecten. De blokfactor had zonder en met randomisatie geen significant effect (telkens  $p=0,07$ ) op de droge stofopbrengst. Na het randomiseren van de blok-factor bleek **P-bemestingsdosis een significante invloed te hebben op de DS-opbrengst van de maïs** ( $p=0,0008$ ).



Figuur 57. Opbrengst (ton droge stof per ha) van snijmaïs op perceel 5 (2016) in functie van de P-bemestingsdosis. Er werd een positief significant effect van de fosforbemestingsdosis vastgesteld ( $p=0,0008$ ). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) bleek niet-significant

In het mixed model met random blok-factor werd het **fosforgehalte** van de plant **niet significant** ( $p=0,478$ ) **beïnvloed door de P-bemestingsdosis**. Het gemiddelde fosforgehalte van de plant (0.25%) was ook hoger dan het kritische fosforgehalte (0,14-0,15 %, Tabel 81). Ook wanneer de P-bemestingsdosis als categorische variabele werd geëvalueerd bleek geen verschil in fosforgehalte van de plant tussen de verschillende bemestingstrappen ( $p=0.60$ ).

#### 12.3.3.6 Perceel 6: Aardappelen

Het proefveld op het perceel in Haasrode werd afgepaald op 15 maart 2016. De proefveldjes werden 9 m breed en 8 m lang uitgezet. De dag daarna werden de bemestingstrappen aangelegd en werden de aardappelen gepoot. Op 20 mei werden geen visuele verschillen vastgesteld. Ook bij een latere beoordeling op 21 juni konden geen verschillen worden waargenomen tussen de verschillende fosfortrappen.

Op het vroege ras werd geen loofdoding toegepast. Bij de oogst was het loof niet afgestorven. Ook op dat moment konden geen duidelijke verschillen tussen de bemestingstrappen worden vastgesteld.



Figuur 58. Visuele waarnemingen in aardappelen op perceel 6 op 21 juni 2016-overzicht

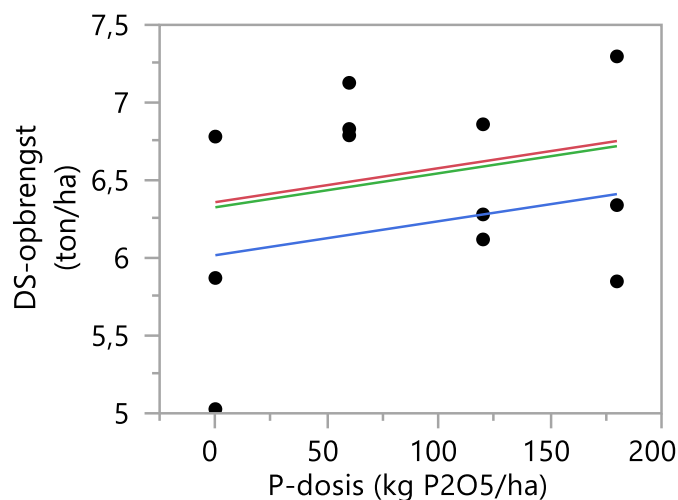
Op 11 juli werden de aardappelen per veldje geoogst. Binnen elk plotje werden 4 rijen van 3 m, hetzij een oppervlakte van 9 m<sup>2</sup> geoogst met de hand. Per plot werd de verse opbrengst en de sortering bepaald. Per veldje werd tevens een gewasstaal van de knollen genomen waarop het drogestofgehalte en het N- en P-gehalte werden bepaald. De opbrengsten en de sortering worden getoond in Tabel 61.

Tabel 61. Opbrengstcijfers (ton droge stof per ha, totaal en voor de verschillende fracties) en fosforgehalte van de bemestingsproef aardappelen in 2016 (perceel 6) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof,, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behan- deling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton vers/ha)	droge stofopbrengst (ton ds/ha)				P-gehalte (%)
			totaal	< 35 mm	35-50 mm	>50mm	
<b>P1</b>	0	28,7 (3,7)	5,9 (0,9) <sup>A</sup>	0,2 (0,1) <sup>B</sup>	1,6 (0,3) <sup>B</sup>	4,1 (1,1) <sup>A</sup>	0,15 (0,00) <sup>A</sup>
<b>P2</b>	60	31,9 (0,7)	6,9 (0,2) <sup>A</sup>	0,2 (0,0) <sup>AB</sup>	1,8 (0,3) <sup>AB</sup>	4,9 (0,5) <sup>A</sup>	0,17 (0,02) <sup>A</sup>
<b>P3</b>	120	30,0 (0,8)	6,4 (0,4) <sup>A</sup>	0,2 (0,0) <sup>AB</sup>	1,8 (0,4) <sup>AB</sup>	4,4 (0,2) <sup>A</sup>	0,19 (0,01) <sup>A</sup>
<b>P4</b>	180	30,0 (2,4)	6,5 (0,7) <sup>A</sup>	0,3 (0,0) <sup>A</sup>	1,9 (0,4) <sup>A</sup>	4,3 (0,5) <sup>A</sup>	0,17 (0,02) <sup>A</sup>

De bemestingsdosis als categorische variabele toonde geen significant verschil tussen de verschillende bemestingstrappen in totale droge-stofopbrengst ( $p=0.22$ ) of in droge-stofopbrengst in de grootste maatsortering ( $p=0.35$ ). Voor de droge-stofopbrengst in de kleinste maatsortering en de maatsortering van 35-50 mm werd met de bemestingsdosis als categorische variabele een significant verschil waargenomen tussen de nulbemesting en de hoogste bemestingstrap ( $p=0.046$  en  $0.02$ ).

Met de bemestingsdosis als continue variabele en zonder randomisatie van de blokfactor, werd geen significant blokeffect vastgesteld op de totale DS-opbrengst ( $p=0,22$ ) of het fosforgehalte in de knol ( $p=0,85$ ). Op de droge-stofopbrengst van de aardappelen in de sortering 35-50 mm werd wel een blokeffect waargenomen ( $p=0,00$ ). Ook na het randomiseren van de blokfactor bleek voor de droge-stofopbrengst in deze maatsortering nog steeds een blokeffect.



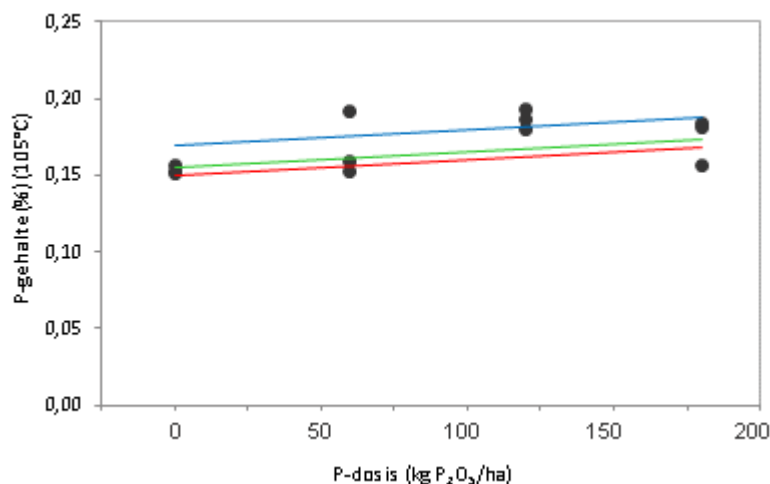
Figuur 59. Totale opbrengst (ton droge stof per ha) van aardappelen op perceel 6 (2016) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Zowel het blokeffect (verschillende kleur per blok) als het effect van de P-bemestingsdosis zijn niet-significant (zie tekst).

De fosforbemestingsdosis had als continue variabele geen significant effect op de totale droge-stofopbrengst ( $p=0,43$ ). Ook voor de droge-stofopbrengst in de grootste maatsortering bleek geen significant effect ( $p=0,97$ ). Voor de droge-stofopbrengst in de andere maatklassen speelde wel een dosiseffect al dan niet in combinatie met een blokeffect. De sortering van de aardappelen wordt relatief getoond in Tabel 62. Het aandeel kleine aardappelen, kleiner dan 35mm, werd significant beïnvloed door de P-bemestingsdosis ( $p=0,008$ ). In de andere maatsorteringen bleek geen significant dosiseffect ( $p=0,37$  en  $0,14$ ) maar een blokeffect, ook na randomisatie van de blokfactor.

Tabel 62. Sortering (%) aardappelen in 2016 (perceel 6) voor de 4 P-bemestingsdossissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (P-bemestingsdossissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4))

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Sortering (%)		
		< 35 mm	35-50 mm	>50mm
P1	0	3 (1)	28 (8)	69 (8)
P2	60	3 (1)	26 (5)	71 (5)
P3	120	3 (1)	28 (5)	69 (5)
P4	180	4 (0)	29 (4)	67 (4)

Een Mitscherlich-fit voor de relatieve droge-stofopbrengst bleek niet mogelijk.



Figuur 60. Fosforgehalte (%P) in de aardappelknol gemeten te Haasrode op perceel 6 (2016) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Zowel het blokeffect (verschillende kleur per blok) als het effect van de P-bemestingsdosis zijn niet-significant (zie tekst).

Het fosforgehalte in de knollen was niet normaal verdeeld, waardoor niet aan de voorwaarden voor een variantie-analyse was voldaan. Daarom werd de statistische vergelijking uitgevoerd met behulp van de niet-parametrische Kruskal-Wallis test. Deze test toonde geen significante verschillen in fosforgehalte tussen de verschillende bemestingstrappen ( $p=0,12$ ). Ook met de fosforbemestingsdosis beschouwd als continue variabele bleek het fosforgehalte in de knol niet significant beïnvloed ( $p=0,10$ ) te zijn door de fosforbemesting (Figuur 60). Het gemiddelde fosforgehalte bedroeg 0,17% en lag dus hoger dan het kritische fosforgehalte. Zonder fosforbemesting (P1) bedroeg het fosforgehalte 0,15%, net lager dan het kritische fosforgehalte.

### 12.3.3.7 Perceel 7: Wintertarwe te Diest

Op het perceel wintertarwe in Diest werden op 21 maart 2017 de verschillende fosforbemestingstrappen aangelegd. De individuele proefveldjes waren 9 m breed en 10 m lang. Op 11 april en 16 mei 2017 waren er geen visueel merkbare verschillen tussen de verschillende bemestingstrappen (Figuur 61).



Figuur 61. Bemestingsproef wintertarwe in Diest op 11/04/2017

De tarwe werd geoogst op 18 juli. Per plot werd ongeveer 34 m<sup>2</sup> geoogst. Per individueel veldje werd de verse korrelopbrengst bepaald. Hiervan werd een staal genomen waarop het droge stofgehalte, het hectolitergewicht en het N- en P-gehalte werd bepaald.

De verse en droge-stofopbrengsten van het graan worden weergegeven in Tabel 63.

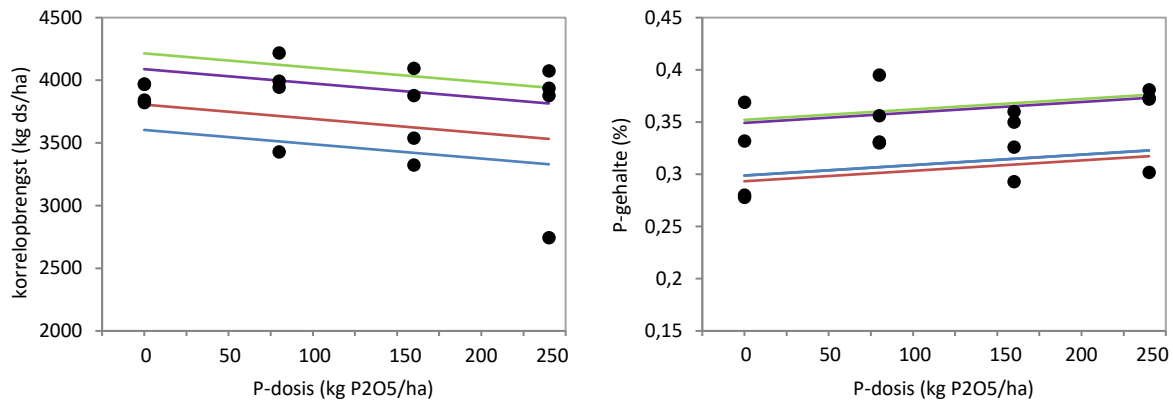
Tabel 63. Opbrengstcijfers, hectolitergewicht en fosforgehalte van het graan van de bemestingsproef wintertarwe in Diest in 2017 (perceel 7) voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele/Kruskal-Wallis test voor korrelopbrengst en DS-opbrengst).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Korrelopbrengst 15% vocht (kg/ha)	DS- opbrengst (kg ds/ha)	Hectolitergewicht (kg/hl)	P-gehalte graan (%)
P1	0	4567 (80) <sup>A</sup>	3901 (80) <sup>A</sup>	64,4 (5,6) <sup>A</sup>	0,31 (0,04) <sup>A</sup>
P2	80	4571 (391) <sup>A</sup>	3897 (333) <sup>A</sup>	63,7 (2,1) <sup>A</sup>	0,35 (0,03) <sup>A</sup>
P3	160	4356 (378) <sup>A</sup>	3709 (344) <sup>A</sup>	65,0 (4,9) <sup>A</sup>	0,33 (0,03) <sup>A</sup>
P4	240	4274 (717) <sup>A</sup>	3659 (615) <sup>A</sup>	65,2 (0,6) <sup>A</sup>	0,36 (0,04) <sup>A</sup>

Op dit proefveld bleek met en zonder randomisatie van de blok-factor geen significant blokeffect. In het mixed model met een gerandomiseerde blokfactor en de bemestingsdosis als continue variabele bleek het effect van de bemestingsdosis op het hectolitergewicht ( $p=0,66$ ) en het fosforgehalte in de tarwekorrel ( $p=0,13$ ) niet significant (Figuur 62).

Het gemiddelde fosforgehalte in de tarwekorrel bedroeg 0,34% in de proef te Diest. In het object zonder fosforbemesting leek het fosforgehalte lager, weliswaar niet significant lager (Figuur 62).

Gemiddeld per object was het fosforgehalte in de korrel hoger dan de gestelde kritische waarde (obv minder recente buitenlandse data) van 0,30%.



Figuur 62. Opbrengst (kg droge stof per ha) en P-gehalte van wintertarwe op perceel 7 in Diest (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg  $P_2O_5$ /ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis doet de opbrengst noch het fosforgehalte significant toenemen.

Door de afwezigheid van een blokeffect werd ook met behulp van de Mitscherlichcurve naar een mogelijk effect van de bemestingsdosis op de relatieve opbrengsten gezocht. Deze curve kon echter niet gefit worden.

#### 12.3.3.8 Perceel 8: Wintertarwe te Bekkevoort

In Bekkevoort werd in de bemestingsproef met wintertarwe de fosforbemesting toegediend op 21 maart 2017. De individuele proefveldjes werden 9 m breed en 10 m lang. Tijdens de gewasbeoordeling op 24 april en 15 mei 2017 bleken er geen visueel merkbare verschillen te zijn tussen de verschillende bemestingsstrappen (Figuur 63).



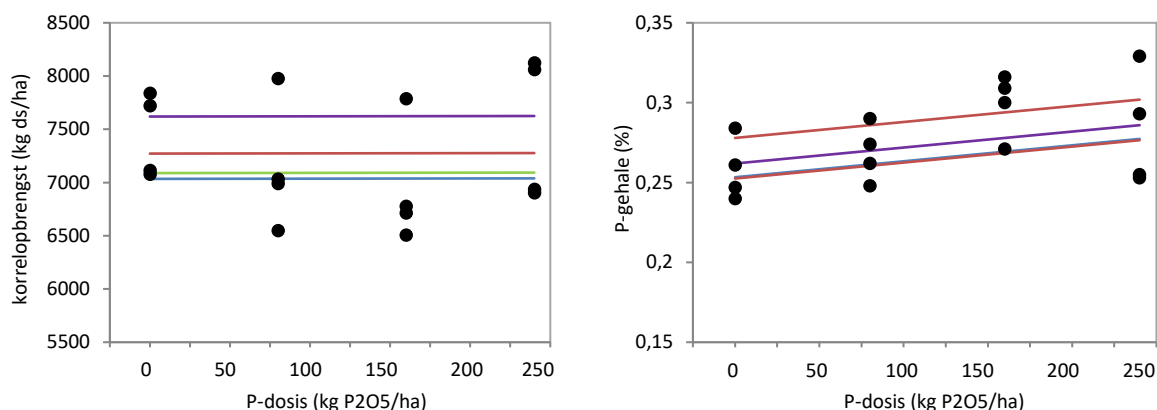
Figuur 63. Bemestingsproef wintertarwe in Bekkevoort op 15/5/2017

Op 19 juli 2017 werd de proef wintertarwe geoogst. Per plot werd ongeveer 25 m<sup>2</sup> geoogst. Per individueel veldje werd de verse korrelopbrengst bepaald en werd een staal genomen. Op dit tarwestaal werd het droge stofgehalte, het hectolitergewicht en het N- en P-gehalte bepaald.

De oogstresultaten en de analyseresultaten worden getoond in Tabel 64. Wanneer de bemestingsdosis als categorische variabele beschouwd werd, bleek de fosforbemestingsdosis op geen van de metingen (Tabel 64) een significant effect te hebben (korrelopbrengst bij 15% vocht:  $p=0,44$ ; DS-opbrengst:  $p=0,42$ ; hectolitergewicht:  $p=0,65$ ; P-gehalte:  $p=0,19$ ). In het mixed-model bleek met en zonder randomisatie van de blokfactor geen blokeffect aanwezig te zijn voor de getoonde elementen. Ook wanneer de bemestingsdosis als continue variabele werd beschouwd, bleek geen significant effect van de fosforbemestingsdosis (korrelopbrengst bij 15% vocht:  $p=0,98$ ; DS-opbrengst:  $p=0,99$ ; hectolitergewicht:  $p=0,95$ ; P-gehalte:  $p=0,10$ ) (Figuur 64).

Tabel 64. Opbrengstcijfers, hectolitergewicht en fosforgehalte van het graan van de bemestingsproef wintertarwe in Bekkevoort in 2017 (perceel 8) voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Korrelopbrengst 15% vocht (kg/ha)	DS- opbrengst (kg ds/ha)	Hectolitergewicht (kg/hl)	P-gehalte graan (%)
P1	0	8679 (463) <sup>A</sup>	7437 (398) <sup>A</sup>	77,8 (3,3) <sup>A</sup>	0,26 (0,02) <sup>A</sup>
P2	80	8322 (708) <sup>A</sup>	7136 (601) <sup>A</sup>	80,0 (0,7) <sup>A</sup>	0,27 (0,02) <sup>A</sup>
P3	160	8128 (635) <sup>A</sup>	6946 (573) <sup>A</sup>	77,7 (3,9) <sup>A</sup>	0,30 (0,02) <sup>A</sup>
P4	240	8755 (791) <sup>A</sup>	7505 (678) <sup>A</sup>	78,7 (1,8) <sup>A</sup>	0,28 (0,04) <sup>A</sup>



Figuur 64. Opbrengst (kg droge stof per ha) en P-gehalte van wintertarwe op perceel 8 in Bekkevoort (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis doet de opbrengst noch het fosforgehalte significant toenemen.

Net als op perceel 7 leek, weliswaar ook zonder statistische significantie, een lager fosforgehalte gemeten te worden in het object zonder fosforbemesting (Figuur 64). De gemiddelde fosforgehaltes van alle objecten lagen onder of op het kritische gehalte (obv minder recente buitenlandse data) van 0,30%.

Door de afwezigheid van een blokeffect werd ook met behulp van de Mitscherlichcurve naar een mogelijk effect van de bemestingsdosis op de relatieve opbrengsten gezocht. Deze curve kon echter niet gefit worden.

### 12.3.3.9 Perceel 9: Meerjarige bemestingsproef: wintertarwe te Haasrode

Op het perceel te Haasrode werd in 2016 eenzelfde bemestingsproef aangelegd met aardappelen (geen significant effect op droge stofopbrengst of P-gehalte, zie eerder perceel 6). De



bemestingstrappen werden in 2017 identiek als het jaar voordien aangelegd, wat betekent dat de plotjes net hetzelfde lagen als in 2016 en dezelfde P-behandeling kregen. Eventuele verschillen waargenomen in 2017 kunnen bijgevolg het resultaat zijn van een verschillende bodemfosforbeschikbaarheid als resultaat van de bemesting van 2016 en/of de verschillende P-bemesting van 2017. De bodemfosforbeschikbaarheid, bepaald op 31 maart per plot, was echter niet significant verschillend in functie van de fosforbemesting van 2016. Dit bleek voor de bodemfosforbeschikbaarheid bepaald in ammoniumlactaat (P-AL,  $p=0,54$ ) en  $\text{CaCl}_2$  (P-CaCl<sub>2</sub>,  $p=0,58$ ). Een residueel effect is dus afwezig en daarom kan deze proef besproken worden enkel in functie van de bemestingstrappen aangelegd in 2017.

Op 31 maart 2017 werden de verschillende bemestingstrappen in de wintertarwe aangelegd. De individuele veldjes waren net als vorig jaar 9 m breed en 8 m lang. In de loop van het groeiseizoen konden geen visuele verschillen worden vastgesteld.

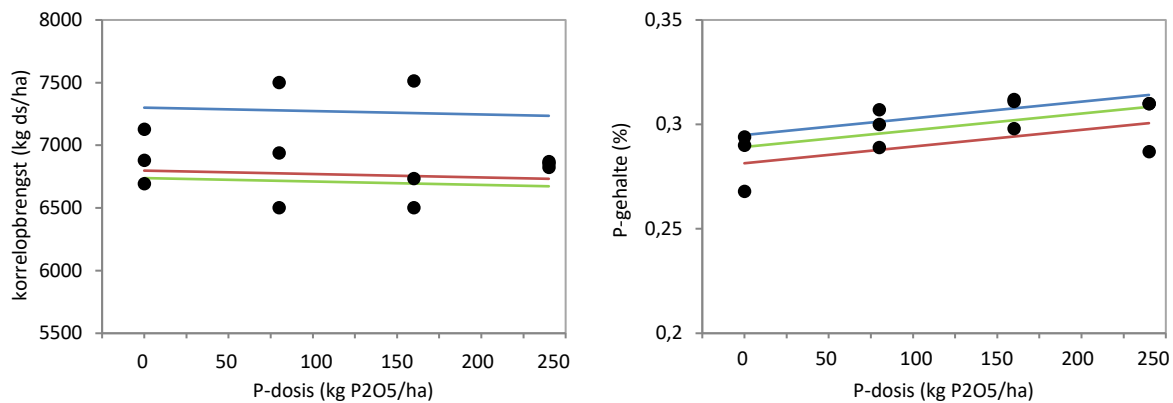
Op 18 juli werd de proef geoogst. Per plot werd ongeveer 26 m<sup>2</sup> geoogst. Per individueel veldje werd de verse korrelopbrengst bepaald en werd een staal van het graan genomen. Op dit tarwestaal werd het droge stofgehalte, het hectolitergewicht en het N- en P-gehalte bepaald.

De oogstresultaten en de analyseresultaten worden getoond in Tabel 65. In de proef bleek geen blokeffect, ongeacht of dosis als continue of categorische variabele werd beschouwd. Wanneer de toegediende dosis als categorische variabele werd beschouwd, bleek de opbrengst niet significant beïnvloed (opbrengst bij 15% vocht:  $p=0,98$ ; DS-opbrengst:  $p=0,98$ ). Ook het hectolitergewicht ( $p=0,46$ ) en het fosforgehalte ( $p=0,15$ ) bleken niet significant beïnvloed (Tabel 65).

Tabel 65. Opbrengstcijfers, hectolitergewicht en fosforgehalte van het graan van de bemestingsproef wintertarwe in Haasrode in 2017 (perceel 9) voor de 4 P-bemestingsdosisen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof, P-bemestingsdosisen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Korrelopbrengst 15% vocht (kg/ha)	DS- opbrengst (kg ds/ha)	Hectolitergewicht (kg/hl)	P-gehalte graan (%)
<b>P1</b>	0	8067 (271) <sup>A</sup>	6901 (218) <sup>A</sup>	72,4 (2,8) <sup>A</sup>	0,28 (0,01) <sup>A</sup>
<b>P2</b>	80	8187 (605) <sup>A</sup>	6982 (501) <sup>A</sup>	74,1 (2,0) <sup>A</sup>	0,30 (0,01) <sup>A</sup>
<b>P3</b>	160	8105 (632) <sup>A</sup>	6918 (530) <sup>A</sup>	76,0 (0,5) <sup>A</sup>	0,31 (0,01) <sup>A</sup>
<b>P4</b>	240	8032 (35) <sup>A</sup>	6850 (24) <sup>A</sup>	73,6 (3,9) <sup>A</sup>	0,30 (0,01) <sup>A</sup>

Ook met het mixed model en dosis als continue variabele beschouwd, kon hetzelfde worden besloten (Figuur 65). Op dit proefveld had de bemestingsdosis geen significant effect op de korrelopbrengst (bij 15% vocht:  $p=0,87$ ; droog:  $p=0,82$ ), noch op het hectolitergewicht ( $p=0,46$ ) noch op het fosforgehalte in de tarwekorrel ( $p=0,06$ , Figuur 65). Het fosforgehalte in het object zonder fosforbemesting bedroeg 0,28%, net onder het kritische fosforgehalte (0,30%, obv minder recente buitenlandse data). Het fosforgehalte in de bemeste objecten lag rond dit kritische gehalte.



Figuur 65. Opbrengst (kg droge stof per ha) en P-gehalte van wintertarwe op perceel 9 in Haasrode (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg  $P_2O_5$ /ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis heeft geen significant effect, noch op de opbrengst noch op het fosforgehalte.

Omwille van de afwezigheid van een blokeffect werd getracht een Mitscherlichcurve te fitten van de relatieve opbrengsten in functie van de bemestingsdosis. Dit bleek niet mogelijk op deze data.

### 12.3.3.10 Perceel 10: Maïs te Schoonaarde

Op een deeltje van het perceel in Schoonaarde stonden vroeger bomen, daarom werd het proefoppervlak zeker niet in dit stuk gelegd. Op het perceel werd op 24 april maïs gezaaid. Diezelfde dag werden de bemestingstrappen aangelegd in veldjes parallel met de zaailijnen. De individuele proefveldjes waren elk 2,5 meter breed en 10 meter lang.

Op 19 juni waren de maïsplanten ongeveer 0,5 meter hoog (Figuur 66). Enkele P1-herhalingen werden visueel kleiner ingeschat dan de P4-behandelingen, maar de verschillen waren niet echt duidelijk. Op 3 juli (planten reeds bijna 2 meter hoog) werden dezelfde waarnemingen gedaan. Op 26 juli was het gewas ongeveer 2,2 meter hoog en waren geen verschillen merkbaar.



Figuur 66. Bemestingsproef maïs in Schoonaarde op 19/06/2017

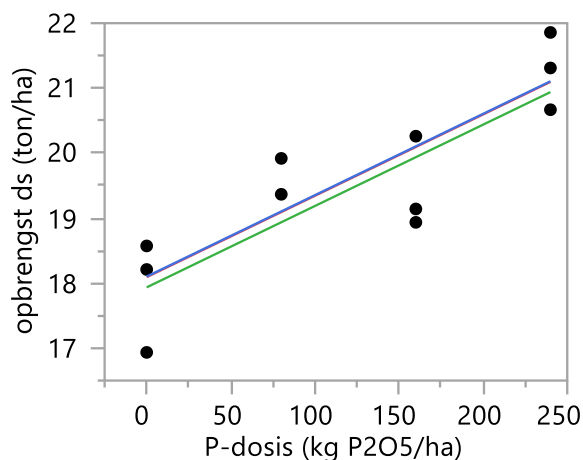
Op 18 september werd de proef geoogst. Van elk proefveldje werd 5 meter van de middelste twee rijen afgekapt en gewogen. De gemiddelde opbrengst was het laagst bij nulbemesting en het hoogst bij de hoogste fosforbemestingsdosis (Tabel 66). Indien de bemestingsdosis als categorische variabele

wordt beschouwd, werd voor de droge stofopbrengst een significant bemestingseffect ( $p=0,0089$ ) en geen blokeffect ( $p=0,94$ ) waargenomen. Met de Tukey-test bleek de droge stofopbrengst bij 0 en 240 kg  $P_2O_5$ /ha significant verschillend.

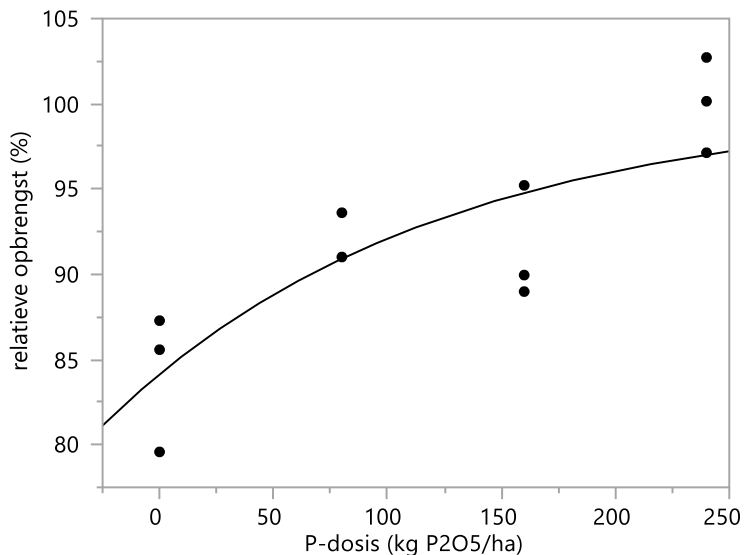
Tabel 66. Opbrengstcijfers en fosforgehalte van de bemestingsproef van maïs in Schoonaarde in 2017 (perceel 10) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes, ds: droge stof). P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg $P_2O_5$ /ha)	Verse opbrengst (ton vers/ha)	Droge stofopbrengst (ton ds/ha)	P-gehalte (%)
P1	0	52,4 (3,2)	17,9 (0,9) <sup>A</sup>	0,16 <sup>A</sup>
P2	80	53,8 (1,0)	19,5 (0,3) <sup>AB</sup>	0,15 <sup>A</sup>
P3	160	55,1 (3,1)	19,4 (0,7) <sup>AB</sup>	0,16 <sup>A</sup>
P4	240	57,1 (3,7)	21,3 (0,6) <sup>B</sup>	0,17 <sup>A</sup>

In het model met bemestingsdosis als continue variabele werd ook geen blokeffect waargenomen ( $p=0,95$ ). In het mixed model met random blokfactor werd ook een significant bemestingseffect ( $p=0,0015$ ) op de droge stofopbrengst waargenomen (Figuur 67). Bij fitten van de Mitscherlichcurve op de data bleek de helling b1 significant verschillend van nul (betrouwbaarheidsinterval: 0,003-0,012) (Figuur 68), wat ook wijst op een significant effect van fosforbemesting.

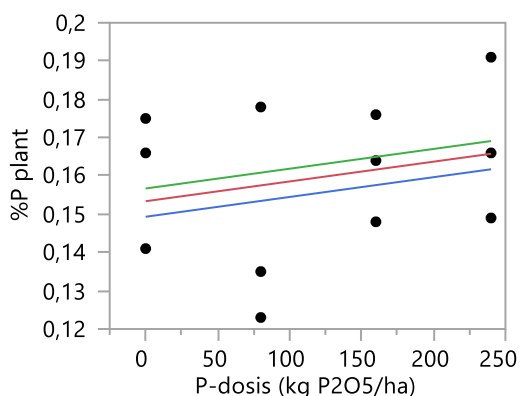


Figuur 67. Opbrengst (ton droge stof per ha) van snijmaïs op perceel 4 in Schoonaarde (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg  $P_2O_5$ /ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis doet de opbrengst wel significant toenemen.



Figuur 68. Mitscherlichcurve van de relatieve opbrengst van snijmaïs op perceel 10 in Schoonaarde (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha).

Voor het fosforgehalte in de gehele plant werden geen verschillen tussen de behandelingen waargenomen ( $p=0,47$ , Tabel 66, Figuur 69). Wel was het gemiddelde P-gehalte iets hoger dan het kritisch fosforgehalte uit de literatuur (0,14%-0,15%, obv minder recente buitenlandse data).



Figuur 69. Fosforgehalte (%P) in de maïsplant gemeten op perceel 10 in Schoonaarde (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Er werd geen significant effect van de fosforbemestingsdosis vastgesteld ( $p=0,47$ ).

### 12.3.3.11 Perceel 11: Meerjarige bemestingsproef: maïs te Lierde

Op het perceel in Lierde werd in 2016 eenzelfde bemestingsproef met aardappelen uitgevoerd (geen significante verschillen in opbrengst, zie perceel 3). De verschillende behandelingen werden in 2017 op dezelfde plotjes uitgevoerd als in 2016. Indien de bemesting in 2016 verschillen in bodemfosforbeschikbaarheid tussen de plotjes induceerde, kan een verschil in opbrengst dus zowel door verschillen in bodemfosforbeschikbaarheid als door verschillen in bemestingsdosis in 2017 veroorzaakt zijn. Er waren echter voor zowel P-AL ( $p=0,52$ ) als voor P-CaCl<sub>2</sub> ( $p=0,59$ ) geen significante verschillen tussen de behandelingen in 2017. Daarom wordt deze proef als een gewone bemestingsproef beschouwd.

Op het perceel werd op 23 april maïs gezaaid. Op 25 april werden de bemestingstrappen aangelegd in veldjes parallel met de zaailijnen. De individuele proefveldjes waren elk 3 meter breed en 10 meter lang.

Op 19 juni waren de maïsplanten ongeveer 0,4 meter hoog (Figuur 70). Enkele P1-herhalingen werden visueel kleiner en paarser ingeschat dan de P4-behandelingen. Op 3 juli waren de planten van de P1-behandelingen ongeveer 1 meter hoog, bij de behandelingen met fosforbemesting was de hoogte zo'n 1,4 meter. Op 26 juli waren geen verschillen merkbaar.



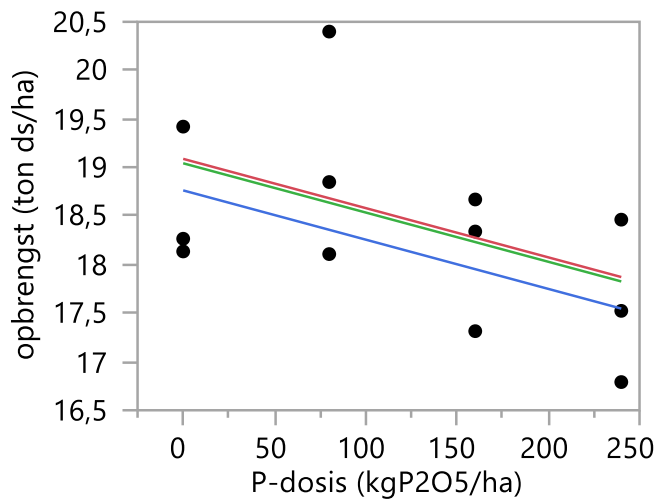
Figuur 70. Bemestingsproef maïs in Lierde op 19/06/2017 (links: P1, rechts: P4)

Op 25 september werd de proef geoogst. Van elk proefveldje werd 5 meter van de middelste twee rijen afgekapst en gewogen. De gemiddelde opbrengst was 18,4 ton droge stof per hectare (Tabel 67). Indien de bemestingsdosis als categorische variabele werd beschouwd, werd voor de droge stofopbrengst geen significant blokeffect ( $p=0,29$ ) noch bemestingseffect ( $p=0,23$ ) waargenomen. Bijgevolg werden met de Tukey-test geen verschillen tussen behandelingen vastgesteld.

Tabel 67. Opbrengstcijfers en fosforgehalte van de bemestingsproef van maïs in Lierde in 2017 (perceel 11) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes, ds: droge stof). P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

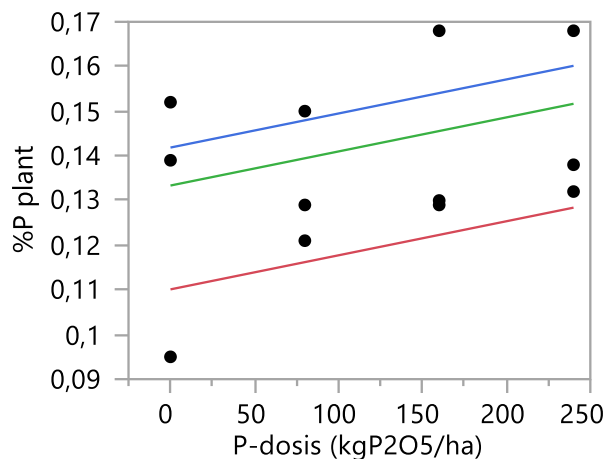
Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton vers/ha)	Droge stofopbrengst (ton ds/ha)	P-gehalte (%)
P1	0	51,0 (2,4)	18,6 (0,7) <sup>A</sup>	0,13 <sup>A</sup>
P2	80	48,7 (1,4)	19,1 (1,2) <sup>A</sup>	0,13 <sup>A</sup>
P3	160	48,3 (1,6)	18,1 (0,7) <sup>A</sup>	0,14 <sup>A</sup>
P4	240	49,1 (4,2)	17,6 (0,8) <sup>A</sup>	0,15 <sup>A</sup>

In het model met bemestingsdosis als continue variabele werd ook geen blokeffect waargenomen ( $p=0,27$ ). In het mixed model met random blokfactor werd geen significant bemestingseffect ( $p=0,09$ ) waargenomen (Figuur 71). Een Mitscherlichcurve fitten bleek niet mogelijk op de data.



Figuur 71. Opbrengst (ton droge stof per ha) van snijmais op perceel 11 in Lierde (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Er is geen blok- noch bemestingseffect.

Voor het fosforgehalte in de gehele plant werden geen verschillen tussen de behandelingen waargenomen ( $p=0,62$ , Tabel 67). Wel lag het P-gehalte rond het kritisch fosforgehalte uit de literatuur (0,14%-0,15%, obv minder recente buitenlandse data). Ook in het mixed model was er geen bemestingseffect op het P-gehalte in de plant ( $p=0,16$ , Figuur 72),



Figuur 72. Fosforgehalte (%P) in de maïsplant gemeten op perceel 11 in Lierde (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Er werd geen significant effect van de fosforbemestingsdosis vastgesteld ( $p=0,16$ ).

### 12.3.3.12 Perceel 12: Aardappelen te Assenede

Op 4 april werd de proef uitgezet en de bemestingstrappen aangelegd op het perceel in Assenede. De dag erna werden aardappelen geplant door de landbouwer. Op 16 juni stonden de aardappelplanten in bloei (Figuur 73). Er werden bij geen van de bezoeken visuele verschillen vastgesteld.

Op 28 september werden de aardappelen geoogst. Noch voor de verse opbrengst, noch voor de droge stofopbrengst, zowel totaal als voor de verschillende fracties, noch voor het onderwatergewicht

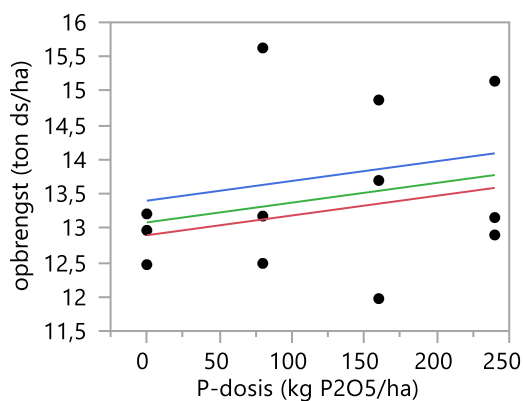
werden verschillen tussen de bemestingsbehandelingen waargenomen (Tabel 68). Er werd ook nooit een significant blokeffect waargenomen.

Met de bemestingsdosis als continue variabele en zonder randomisatie van de blokfactor, werd geen significant blokeffect vastgesteld op de totale DS-opbrengst ( $p=0,89$ ). In het mixed model werd geen significant effect van de bemestingsdosis waargenomen ( $p=0,51$ , Figuur 74). Een fit van de Mitscherlichcurve bleek niet mogelijk.

Het fosforgehalte in de knol was niet significant verschillend tussen de behandelingen ( $p=0,78$  indien bemestingsdosis als categorische variabele), er was wel een blokeffect ( $p=0,008$ ). Het P-gehalte in de knol was wel onder het kritische gehalte in de literatuur (0,16%, obv minder recente buitenlandse data).



Figuur 73. Overzicht van de bloeiende aardappelplanten op het proefperceel in Assenede (perceel 12 2017).



Figuur 74. Totale opbrengst (ton droge stof per ha) van aardappelen op perceel 12 in Assenede (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Zowel het blokeffect (verschillende kleur per blok) als het effect van de P-bemestingsdosis zijn niet-significant (zie tekst).

Tabel 68. Opbrengstcijfers (ton per ha, totaal en voor de verschillende fracties), onderwatergewicht en fosforgehalte van de bemestingsproef aardappelen te Assenede in 2017 (perceel 12) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof,, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). De p-waarde voor ANOVA met bemestingsdosis als categorische variabele is nooit lager dan 0,05.

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton/ha)		droge stofopbrengst (ton/ha)					Onderwater- gewicht (g/5kg)	P-gehalte (%)
		totaal	totaal	< 35 mm	35-50 mm	50-70mm	>70 mm	uitval		
P1	0	59,4 (2,2) <sup>A</sup>	12,9 (0,4) <sup>A</sup>	0,2 (0,1) <sup>A</sup>	2,7 (0,6) <sup>A</sup>	9,4 (0,8) <sup>A</sup>	0,4 (0,3) <sup>A</sup>	0,2 (0,1) <sup>A</sup>	385 (9) <sup>A</sup>	0,14 (0,02) <sup>A</sup>
P2	60	63,3 (5,0) <sup>A</sup>	13,8 (1,7) <sup>A</sup>	0,2 (0,1) <sup>A</sup>	3,4 (0,9) <sup>A</sup>	9,2 (1,6) <sup>A</sup>	0,9 (0,1) <sup>A</sup>	0,1 (0,1) <sup>A</sup>	382 (10) <sup>A</sup>	0,14 (0,03) <sup>A</sup>
P3	120	62,7 (6,0) <sup>A</sup>	13,5 (1,5) <sup>A</sup>	0,2 (0,1) <sup>A</sup>	2,6 (0,5) <sup>A</sup>	9,3 (1,8) <sup>A</sup>	1,1 (0,4) <sup>A</sup>	0,3 (0,1) <sup>A</sup>	372 (13) <sup>A</sup>	0,14 (0,02) <sup>A</sup>
P4	180	63,2 (4,8) <sup>A</sup>	13,7 (1,2) <sup>A</sup>	0,2 (0,1) <sup>A</sup>	2,5 (0,7) <sup>A</sup>	9,2 (0,5) <sup>A</sup>	1,5 (1,1) <sup>A</sup>	0,3 (0,2) <sup>A</sup>	377 (18) <sup>A</sup>	0,14 (0,01) <sup>A</sup>
<b>p-waarde ANOVA</b>		0,78	0,86	0,85	0,56	0,997	0,44	0,17	0,63	0,78

Tabel 69. Opbrengstcijfers (ton per ha, totaal en voor de verschillende fracties), onderwatergewicht en fosforgehalte van de bemestingsproef aardappelen te Kessel-Lo in 2017 (perceel 13) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof,, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4). De p-waarde voor ANOVA met bemestingsdosis als categorische variabele is nooit lager dan 0,05 (\*Kruskal-Wallis voor <35 mm)

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton/ha)		droge stofopbrengst (ton/ha)				Onderwater- gewicht (g/5kg)	P-gehalte (%)
		totaal	totaal	< 35 mm*	35-50 mm	>50mm	uitval		
P1	0	67,7 (3,7) <sup>A</sup>	13,7 (1,1) <sup>A</sup>	0,5 (0,1)	4,0 (0,1) <sup>A</sup>	6,9 (0,6) <sup>A</sup>	2,3 (0,5) <sup>A</sup>	371 (11) <sup>A</sup>	0,16 (0,02) <sup>A</sup>
P2	60	64,4 (1,6) <sup>A</sup>	13,0 (0,4) <sup>A</sup>	0,4 (0,1)	3,9 (0,5) <sup>A</sup>	6,5 (0,2) <sup>A</sup>	2,2 (0,6) <sup>A</sup>	369 (3) <sup>A</sup>	0,16 (0,01) <sup>A</sup>
P3	120	69,9 (4,4) <sup>A</sup>	14,5 (0,9) <sup>A</sup>	0,5 (0,1)	4,1 (0,6) <sup>A</sup>	7,3 (0,3) <sup>A</sup>	2,5 (0,3) <sup>A</sup>	381 (9) <sup>A</sup>	0,17 (0,01) <sup>A</sup>
P4	180	74,7 (3,7) <sup>A</sup>	15,5 (0,7) <sup>A</sup>	0,6 (0,2)	4,3 (0,7) <sup>A</sup>	7,8 (1,2) <sup>A</sup>	2,7 (0,2) <sup>A</sup>	380 (5) <sup>A</sup>	0,17 (0,01) <sup>A</sup>
<b>p-waarde ANOVA</b>		0,09	0,07	0,27	0,72	0,12	0,50	0,12	0,85



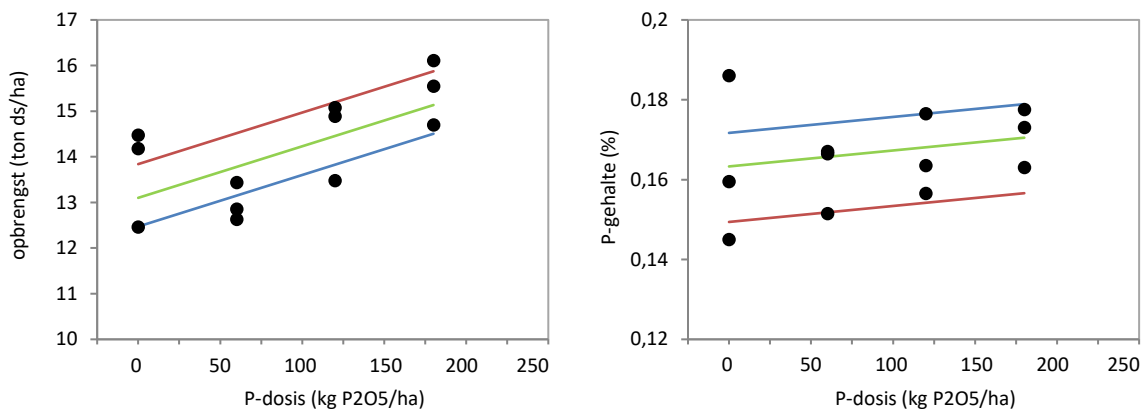
### 12.3.3.13 Perceel 13: Aardappelen te Kessel-Lo

De aardappelen van de bemestingsproef te Kessel-Lo werden gepoot op 15 april 2017. Op 29 maart werd de fosforbemesting toegediend. Op geen enkel moment tijdens het groeiseizoen noch bij opkomst konden visuele verschillen vastgesteld worden.

Op 12 september werden de aardappelen geoogst. De opbrengst en de sortering van de aardappelen in 2017 wordt getoond in Tabel 69.

De droge stofopbrengst in de maatsortering <35 mm toonde geen normale verdeling en voldeed niet aan de voorwaarden voor een variantie-analyse. Mogelijke verschillen tussen de fosfortrappen werden achterhaald met behulp van een niet-parametrische test, de Kruskal-Wallis test. Deze test toonde geen statistisch significante verschillen tussen de verschillende objecten ( $p=0,27$ ).

De overige opbrengstgegevens, het onderwatergewicht en P-gehalte getoond in Tabel 69 voldeden aan de voorwaarden voor een variantie-analyse. Wanneer de bemestingsdosis als categorische variabele werd beschouwd, bleek de p-waarde nooit lager dan 0,05 (Tabel 69).

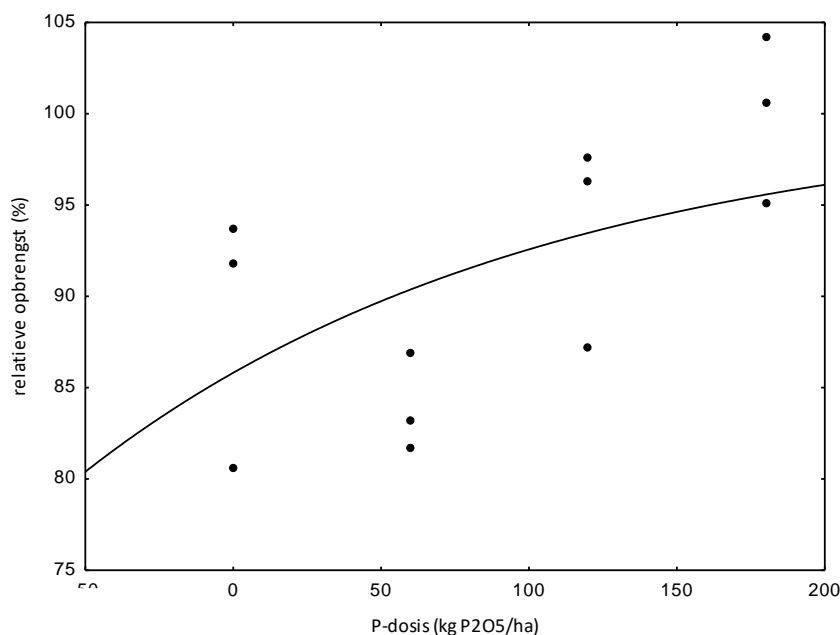


Figuur 75. Opbrengst (ton droge stof per ha) en P-gehalte in de knol op perceel 13 in Kessel-Lo (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg  $P_2O_5$ /ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis heeft een significant effect, op de totale droge stofopbrengst, niet op het fosforgehalte.

Wanneer de bemestingsdosis als een continue variabele werd beschouwd, speelde geen blokeffect, met of zonder randomisatie van de blokfactor. Als continue variabele beschouwd, toonde de bemestingsdosis in het mixed model geen significant effect op de verse opbrengst ( $p=0,05$ ), de droge stofopbrengsten van de drie maatsorteringen en de uitval ( $p= 0,10$ ;  $0,32$ ;  $0,06$ ;  $0,18$ ) en het fosforgehalte in de knollen ( $p=0,42$ ). Op de totale droge stofopbrengst ( $p=0,03$ ) (Figuur 75) en het onderwatergewicht ( $p=0,045$ ) bleek wel een statistisch significante invloed van de bemestingsdosis in het mixed model met de bemestingsdosis als continue variabele.

Het fosforgehalte in de knollen bedroeg gemiddeld 0,17%. In de objecten zonder fosforbemesting en met de laagste P-dosis was het fosforgehalte in de knollen net gelijk aan het kritische gehalte van 0,16% (obv minder recente buitenlandse data).

Bij het fitten van de Mitscherlichcurve op de data bleek de helling  $b_1$  niet significant verschillend van nul ( $p=0,12$ ; betrouwbaarheidsinterval:  $-0,002-0,015$ ) (Figuur 76), wat wijst op de afwezigheid van een significant effect van de fosforbemesting.



Figuur 76. Mitscherlichcurve van de relatieve opbrengst van de aardappelen op perceel 13 in Kessel-Lo (2017) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha).

#### 12.3.3.14 Perceel 14: Meerjarige bemestingsproef: wintertarwe te Lierde

Op het perceel in Lierde (P-AL 111 mg P/kg) werd in 2018 de derde bemestingsproef na elkaar aangelegd. In 2016 werden er aardappelen en in 2017 werd er maïs geteeld. In geen van beide jaren kon een significant verschil in opbrengst waargenomen worden. De verschillende behandelingen werden in 2018 op dezelfde plotjes uitgevoerd als in 2016 en 2017. Indien de bemesting in 2016 en 2017 verschillen in bodemfosforbeschikbaarheid tussen de plotjes induceerde, kan een verschil in opbrengst dus zowel door verschillen in bodemfosforbeschikbaarheid als door verschillen in bemestingsdosis in 2018 veroorzaakt zijn. Voor P-AL waren er zoals de voorbijgaande jaren geen significante verschillen tussen de bemestingsniveaus ( $p=0,24$ ), er was ook geen blokeffect ( $p=0,12$ ). Voor P-CaCl<sub>2</sub> nam P-CaCl<sub>2</sub> van P1 naar P4 toe van 1,1 naar 1,6 mg/kg maar waren de verschillen niet significant ( $p=0,22$ ). Ook was er geen blokeffect ( $p=0,22$ ). Omwille van het ontbreken van significante verschillen wordt deze proef als een gewone bemestingsproef beschouwd. Daarnaast was er ook de mogelijkheid om de verandering in P-beschikbaarheid in de tijd tijdens deze proef eventueel mee te nemen voor luik 3. Er werd echter op de drie jaar tijd, zelfs niet voor de nulbemesting P1 en de hoogste dosis P4, een significante verandering van P-AL en P-CaCl<sub>2</sub> in de tijd waargenomen. In luik 3 zal gefocust worden op duidelijkere veranderingen in P-beschikbaarheid over langere tijdsreeksen.

Op het perceel wintertarwe in Lierde werden op 21 maart 2018 de verschillende fosforbemestingstrappen aangelegd. De individuele proefveldjes waren 2,5 m breed en 10 m lang. Op de verschillende waarnemingsmomenten waren er geen visueel merkbare verschillen tussen de verschillende bemestingstrappen (Figuur 77).

De tarwe werd geoogst op 17 juli, bij een vochtgehalte van 12%. Per plot werd ongeveer 12,5 m<sup>2</sup> geoogst. Per individueel veldje werd de verse korrelopbrengst bepaald. Hiervan werd een staal genomen waarop het droge stofgehalte, het hectolitergewicht en het P-gehalte werd bepaald.

De verse en droge-stofopbrengsten van het graan worden in Tabel 70. Indien de bemestingsdosis als categorische variabele wordt beschouwd, werd voor de droge stofopbrengst geen significant bemestingseffect ( $p=0,40$ ) noch blokeffect ( $p=0,63$ ) waargenomen. Ook voor het hectolitergewicht ( $p=0,47$ ) en het P-gehalte van de korrel ( $p=0,57$ ) werden geen significante verschillen of blokeffecten

waargenomen. Het gemiddelde fosforgehalte in de tarwekorrel bedroeg 0,30%, rond de gestelde kritische waarde (obv minder recente buitenlandse data) van 0,30%.

In het model met bemestingsdosis als continue variabele werd ook geen blokeffect waargenomen ( $p=0,65$ ). In het mixed model met random blokfactor werd geen significant bemestingseffect ( $p=0,48$ ) waargenomen (Figuur 78). Ook voor het hectolitergewicht ( $p=0,09$ ) en voor het fosforgehalte ( $p=0,28$ ) was er geen significant effect van de P-bemestingsdosis ((Figuur 78).

Bij fitten van de Mitscherlichcurve op de data bleek de helling b1 niet significant verschillend van nul.

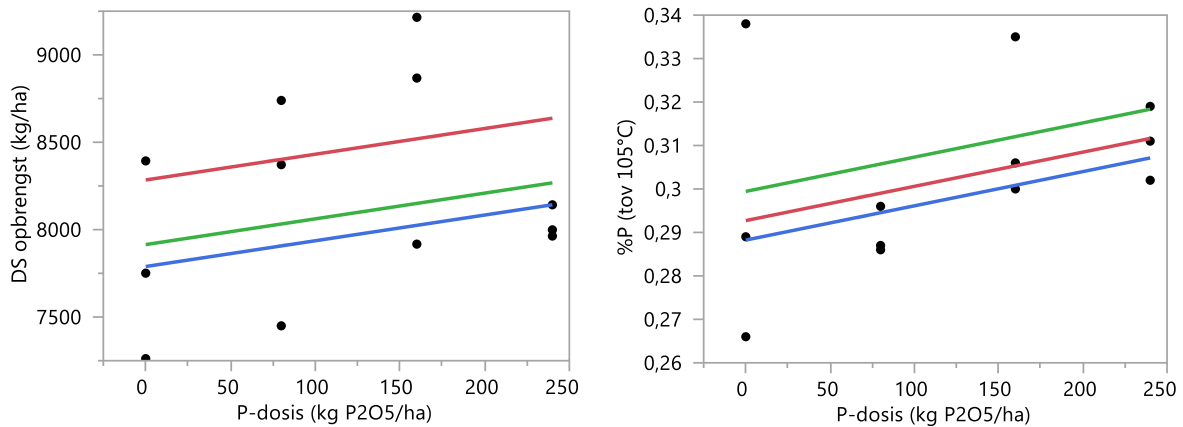
Bij geen enkel proefjaar of gewas (aardappel in 2016, maïs in 2017 en wintertarwe in 2018) bleek de opbrengst toe te nemen met de fosforbemesting op dit perceel in Lierde (P-AL 111 mg P/kg).



Figuur 77. Bemestingsproef wintertarwe in Lierde op 7 juni 2018

Tabel 70. Opbrengstcijfers, hectolitergewicht en fosforgehalte van het graan van de bemestingsproef wintertarwe in Lierde in 2018 (perceel 14) voor de 4 P-bemestingsdosisen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse korrelopbrengst (kg/ha)	DS- opbrengst (kg ds/ha)	Hectolitergewicht (kg/hl)	P-gehalte graan (%)
<b>P1</b>	0	8853 (661)	7802 <sup>A</sup> (567)	80,7 <sup>A</sup> (1,1)	0,30 <sup>A</sup> (0,04)
<b>P2</b>	80	9288 (727)	8187 <sup>A</sup> (664)	81,0 <sup>A</sup> (0,7)	0,29 <sup>A</sup> (0,01)
<b>P3</b>	160	9838 (773)	8666 <sup>A</sup> (672)	81,4 <sup>A</sup> (0,6)	0,31 <sup>A</sup> (0,02)
<b>P4</b>	240	9117 (101)	8035 <sup>A</sup> (95)	81,8 <sup>A</sup> (0,5)	0,31 <sup>A</sup> (0,01)



Figuur 78. Opbrengst (kg droge stof per ha) en P-gehalte van wintertarwe op perceel 14 in Lierde (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis doet de opbrengst noch het fosforgehalte significant toenemen.

### 12.3.3.15 Perceel 15: Meerjarige bemestingsproef: wintertarwe te Schoonaarde

Op het perceel in Schoonaarde (P-AL 96 mg P/kg) werd in 2018 de tweede bemestingsproef na elkaar aangelegd. In 2017 werd er maïs geteeld, en toen werd er een statistisch significante toename in maïsoopbrengst waargenomen bij toenemende bemestingsdosis (zie perceel 10). De verschillende behandelingen werden in 2018 op dezelfde plotjes uitgevoerd als in 2017. Indien de bemesting in 2017 verschillen in bodemfosforbeschikbaarheid tussen de plotjes induceerde, kan een verschil in opbrengst dus zowel door verschillen in bodemfosforbeschikbaarheid als door verschillen in bemestingsdosis in 2018 veroorzaakt zijn. Er waren echter voor zowel P-AL ( $p=0,24$ ) als voor P-CaCl<sub>2</sub> ( $p=0,33$ ) geen significante verschillen tussen de behandelingen in 2018. Ook was er voor beiden geen blokeffect ( $p=0,34$  en  $p=0,52$  respectievelijk). Daarom wordt deze proef als een gewone bemestingsproef beschouwd.

In Schoonaarde werd in de bemestingsproef met wintertarwe de fosforbemesting pas toegediend op 16 april 2018. Vroegere pogingen moesten gestaakt worden wegens te vochtige toestand van het perceel (bemestingsmachine reed zich vast). De individuele proefveldjes waren 3 m breed en 10 m lang. Op de verschillende waarnemingsmomenten waren er geen visueel merkbare verschillen tussen de verschillende bemestingstrappen (Figuur 79). Wel werd op de P4-behandeling van blok III een verminderde groei vastgesteld, reeds voor het toepassen van de fosforbemesting.



Figuur 79. Bemestingsproef wintertarwe in Schoonaarde op 7/6/2018

Op 16 juli 2018 werd de proef wintertarwe geoogst bij 11,5% vochtgehalte. Per plot werd ongeveer 12,5 m<sup>2</sup> geoogst. Per individueel veldje werd de verse korrelopbrengst bepaald en werd een staal genomen. Op dit tarwestaal werd het droge stofgehalte, het hectolitergewicht en het P-gehalte bepaald.

De verse en droge-stofopbrengsten van het graan worden weergegeven in Tabel 71. Indien de bemestingsdosis als categorische variabele wordt beschouwd, werd voor de droge stofopbrengst geen significant bemestingseffect ( $p=0,86$ ) noch blokeffect ( $p=0,94$ ) waargenomen. Ook voor het hectolitergewicht ( $p=0,18$ ) en het P-gehalte van de korrel ( $p=0,25$ ) werden geen significante verschillen of blokeffecten waargenomen. Het gemiddelde fosforgehalte in de tarwekorrel bedroeg 0,30%, rond de gestelde kritische waarde (obv minder recente buitenlandse data) van 0,30%.

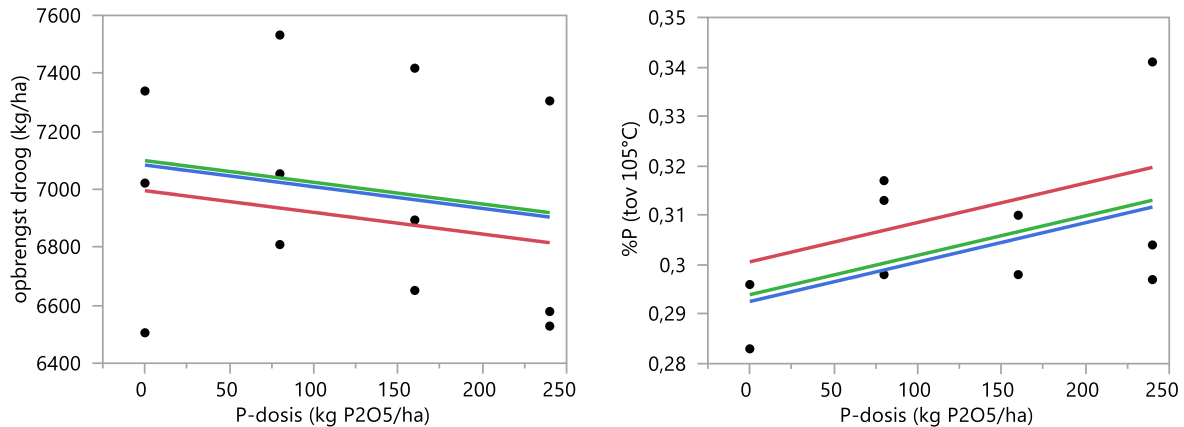
Tabel 71. Opbrengstcijfers, hectolitergewicht en fosforgehalte van het graan van de bemestingsproef wintertarwe in Schoonaarde in 2018 (perceel 15) voor de 4 P-bemestingsdossissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse korrelopbrengst (kg/ha)	DS- opbrengst (kg ds/ha)	Hectolitergewicht (kg/hl)	P-gehalte graan (%)
P1	0	7836 (488)	6955 <sup>A</sup> (421)	80,9 <sup>A</sup> (1,6)	0,29 <sup>A</sup> (0,01)
P2	80	8047 (425)	7132 <sup>A</sup> (368)	82,7 <sup>A</sup> (0,3)	0,31 <sup>A</sup> (0,01)
P3	160	7889 (424)	6988 <sup>A</sup> (392)	82,5 <sup>A</sup> (0,9)	0,31 <sup>A</sup> (0,01)
P4	240	7713 (451)	6804 <sup>A</sup> (435)	81,2 <sup>A</sup> (0,8)	0,31 <sup>A</sup> (0,02)

In het model met bemestingsdosis als continue variabele werd ook geen blokeffect waargenomen ( $p=0,93$ ). In het mixed model met random blokfactor werd geen significant bemestingseffect ( $p=0,59$ ) waargenomen (Figuur 80). Ook voor het hectolitergewicht ( $p=0,88$ ) en voor het fosforgehalte ( $p=0,08$ ) was er geen significant effect van de P-bemestingsdosis (Figuur 80).

Bij fitten van de Mitscherlichcurve op de data bleek de helling b1 niet significant verschillend van nul.

De opbrengst van wintertarwe was op dit perceel, in tegenstelling tot die van maïs in 2017, niet beïnvloed door de fosforbestedingsdosis.



Figuur 80. Opbrengst (kg droge stof per ha) en P-gehalte van wintertarwe op perceel 15 in Schoonaarde (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis doet de opbrengst noch het fosforgehalte significant toenemen.

#### 12.3.3.16 Perceel 16: Maïs te Bellem

Op het perceel werd op 17 mei maïs gezaaid na een snede gras. Op 22 mei werden de bemestingstrappen aangelegd in veldjes parallel met de zaaijnen. De individuele proefveldjes waren elk 3 meter breed en 10 meter lang. Doordat de bemestingsdosissen oorspronkelijk voor een breedte van 2,5 meter werden uitgerekend, waren de werkelijke bemestingsdosissen 0, 67, 133 en 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha in plaats van 0, 80, 160 en 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Ongeveer 60 uur na de bemesting is er bij een onweer ongeveer 50 liter per m<sup>2</sup> gevallen. Er was geen visuele schade, maar het is onduidelijk of de mestkorrels ter plaatse zijn gebleven. Aangezien er kort voor de bemesting ook veel neerslag was gevallen (17 liter per m<sup>2</sup>) en de bodem dus goed vochtig was, is de bemesting vermoedelijk reeds (gedeeltelijk) opgelost en vastgehouden in de bodem. Tijdens de verschillende plaatsbezoeken werden nooit visuele verschillen waargenomen tussen de behandelingen (Figuur 81).



Figuur 81. Bemestingsproef maïs in Bellem op 21/06/2018

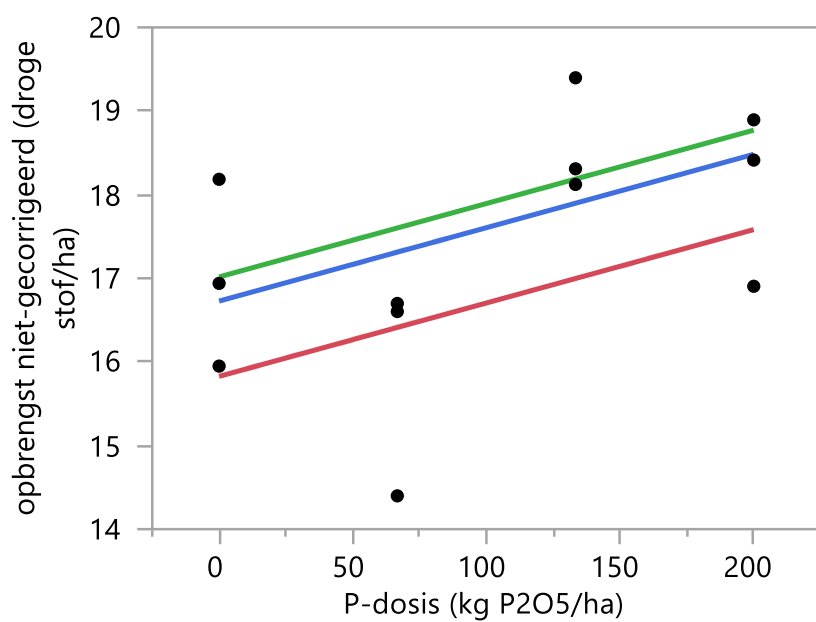
Op 20 september werd de proef geoogst. Van elk proefveldje werd 5 meter van de middelste twee rijen afgekapt en gewogen. De gemiddelde opbrengst was het laagst bij de tweede bemestingstrap en het hoogst bij de derde fosforbemestingsdosis (Tabel 72). Indien de bemestingsdosis als categorische variabele wordt beschouwd, werd voor de droge stofopbrengst een significant bemestingseffect ( $p=0,0044$ ) en blokeffect ( $p=0,0095$ ) waargenomen. Voor P-AL en P-CaCl<sub>2</sub> (gemeten voor de toepassing van de bemesting) waren er wel geen blokeffecten ( $p=0,56$  en  $p=0,38$  respectievelijk). Met de Tukey-test bleek de droge stofopbrengst bij 67 en zowel 133 als 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha significant verschillend. Wat betreft het P-gehalte waren er geen significante verschillen gerelateerd aan het bemestingsniveau ( $p=0,38$ ) of blok ( $p=0,15$ ). Wel was het gemiddelde P-gehalte iets lager dan het kritisch fosforgehalte uit de literatuur (0,14%-0,15%, obv minder recente buitenlandse data).

In het model met bemestingsdosis als continue variabele werd geen blokeffect waargenomen ( $p=0,11$ ). In het mixed model met random blokfactor werd net geen significant bemestingseffect ( $p=0,07$ ) op de droge stofopbrengst waargenomen (Figuur 82). De Mitscherlichcurve kon gefit worden, maar parameter b1 was niet significant verschillend van nul (Figuur 83). Voor het P-gehalte werd geen effect van het fosforbemestingsniveau gevonden (Figuur 84).

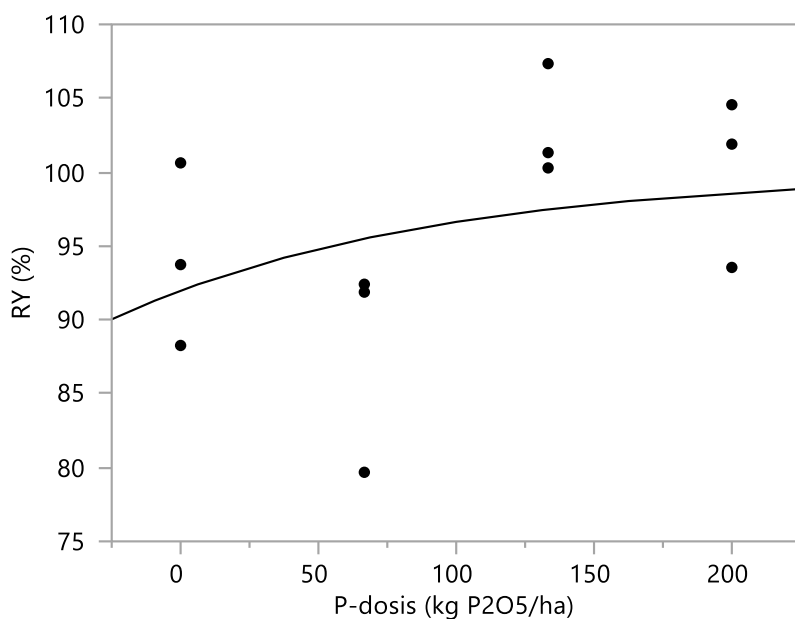
Op dit perceel met P-AL 92 mg P/kg werd dus afhankelijk van de gebruikte test wel of geen significant effect van fosforbemesting op de opbrengst van maïs waargenomen.

Tabel 72. Opbrengstcijfers en fosforgehalte van de bemestingsproef van maïs in Bellem in 2018 (perceel 16) voor de 4 P-bemestingsdossissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes, ds: droge stof). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton vers/ha)	Droge stofopbrengst (ton ds/ha)	P-gehalte (%)
P1	0	44,6 (2,3)	17,0 <sup>AB</sup> (1,1)	0,14 <sup>A</sup> (0,02)
P2	67	43,7 (3,2)	15,9 <sup>B</sup> (1,3)	0,13 <sup>A</sup> (0,00)
P3	133	47,3 (1,3)	18,6 <sup>A</sup> (0,7)	0,13 <sup>A</sup> (0,01)
P4	200	45,0 (0,8)	18,1 <sup>A</sup> (1,0)	0,13 <sup>A</sup> (0,01)

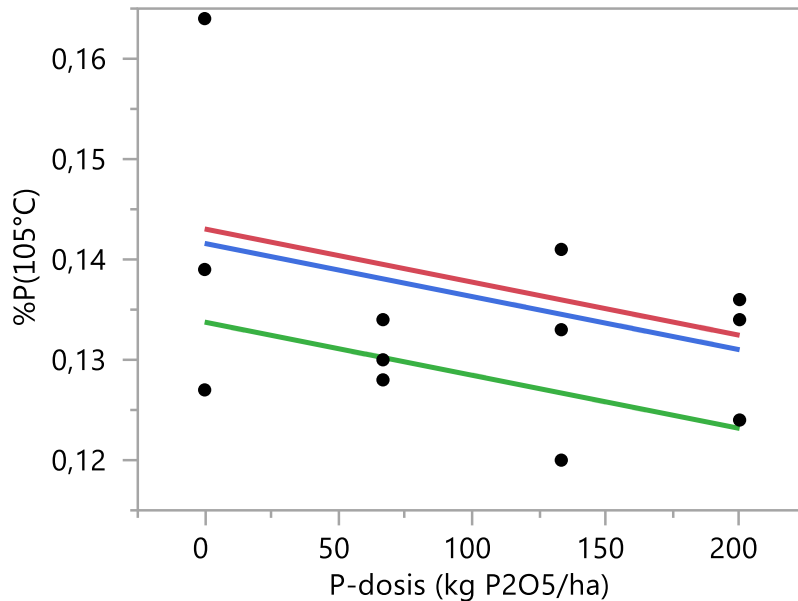


Figuur 82. Opbrengst (ton droge stof per ha) van snijmaïs op perceel 16 in Bellem (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis doet de opbrengst net niet significant toenemen (p=0,07).



Figuur 83. Mitscherlichcurve gefit op de data van de relatieve opbrengst (opbrengst ten opzichte van de gemiddelde opbrengst in de hoogste bemestingstrap) voor de veldproef met maïs in Bellem in 2018





Figuur 84. Fosforgehalte (%P) in de maïsplant gemeten op perceel 16 in Bellem (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Er werd geen significant effect van de fosforbemestingsdosis vastgesteld ( $p=0,12$ ).

### 12.3.3.17 Perceel 17: maïs te Lummen

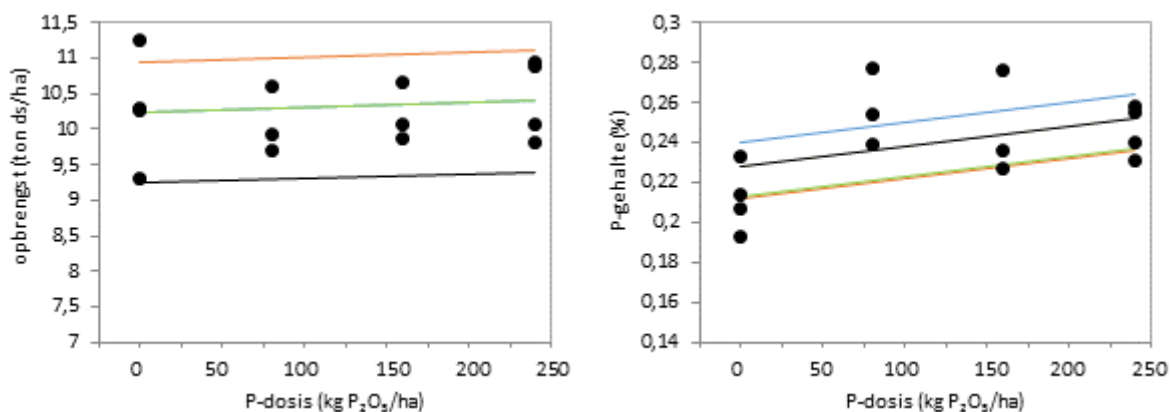
De maïs in Lummen werd gezaaid na een eerste snede gras. Op 12 mei werd het gras ondergeploegd. De fosforbemestingstrappen werden op 13 mei aangelegd op het geploegde perceel. De maïs werd de dag nadien op 14 mei gezaaid. Op 11 juni stond de maïs ongeveer 30 cm hoog en heel uniform.

Door de extreem droge weersomstandigheden werd de maïs bijzonder vroeg geoogst, namelijk op 28 augustus. Van elke proefveldje werden de planten van 4 rijen van 3 m gekapt en gewogen.

De maïs bracht vers gemiddeld 30,0 ton/ha op en 10,3 ton/ha op droge stofbasis. In de proef bleken geen blokeffecten. Wanneer de bemestingsdosis als categorische variabele beschouwd werd, bleek geen significant verschil in opbrengst, noch vers ( $p=0,71$ ) noch droog ( $p=0,77$ ), of fosforgehalte ( $p=0,09$ ) tussen de behandelingen (Tabel 73).

Het gemiddelde P-gehalte in de maïsplant bedroeg 0,24%, hoger dan het kritisch fosforgehalte in de literatuur (0,14%-0,15% o.b.v. minder recente buitenlandse data). In het object zonder fosforbemesting bedroeg het gemiddelde fosforgehalte in de plant 0,21% terwijl dit in de fosforbemeste objecten gemiddeld 0,25 en 0,26% bedroeg. Dit verschil was evenwel niet statistisch significant.

Wanneer de bemestingsdosis als continue variabele in het mixed model werd beschouwd, werd ook geen blokeffect waargenomen (Figuur 85). In het mixed model met random blokfactor bleek eveneens geen significant bemestingseffect op verse opbrengst ( $p=0,24$ ), droge stofopbrengst ( $p=0,65$ ) of fosforgehalte ( $p=0,09$ ).

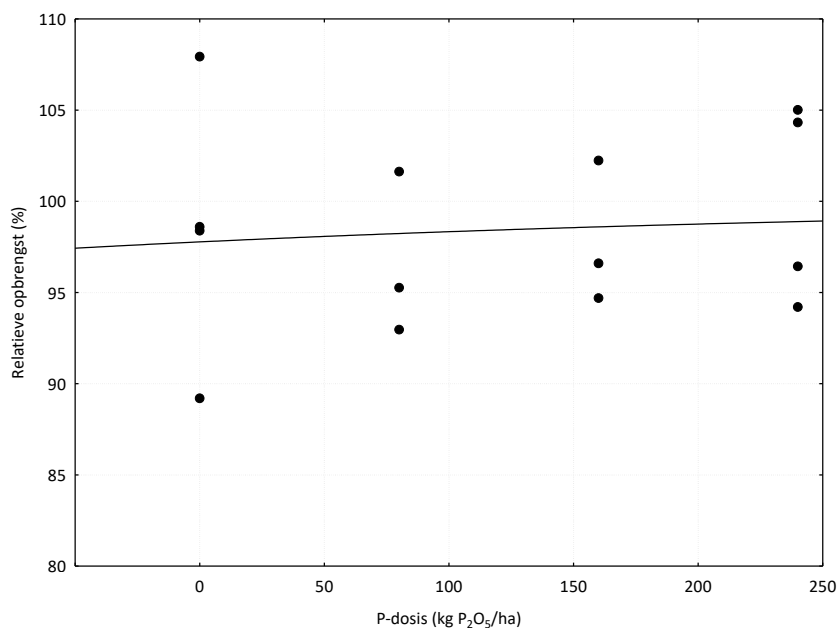


Figuur 85. Opbrengst (ton droge stof per ha) en P-gehalte (%P) in de maïsplant op perceel 17 in Lummen (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis heeft geen significant effect, op de totale droge stofopbrengst, noch op het fosforgehalte.

Tabel 73. Opbrengstcijfers en fosforgehalte van de bemestingsproef van maïs in Lummen in 2018 (perceel 17) voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes, ds: droge stof). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton vers/ha)	Droge stofopbrengst (ton ds/ha)	P-gehalte (%)
P1	0	29,0 (3,0) <sup>A</sup>	10,3 (0,8) <sup>A</sup>	0,21 (0,02) <sup>A</sup>
P2	80	30,0 (1,6) <sup>A</sup>	10,1 (0,5) <sup>A</sup>	0,26 (0,02) <sup>A</sup>
P3	160	30,4 (1,3) <sup>A</sup>	10,2 (0,4) <sup>A</sup>	0,25 (0,03) <sup>A</sup>
P4	240	30,7 (1,0) <sup>A</sup>	10,4 (0,6) <sup>A</sup>	0,25 (0,01) <sup>A</sup>

Bij het fitten van de Mitscherlichcurve op de data bleek de helling b1 niet significant verschillend van nul (betrouwbaarheidsinterval: -0,02-0,02) (Figuur 86), wat ook wijst op geen significant effect van fosforbemesting.



Figuur 86. Mitscherlichcurve gefit op de data van de relatieve opbrengst (opbrengst ten opzichte van de gemiddelde opbrengst in de hoogste bemestingstrap) voor de veldproef met maïs in Lummen in 2018

### 12.3.3.18 Perceel 18: maïs te Dilsen-Stokkem

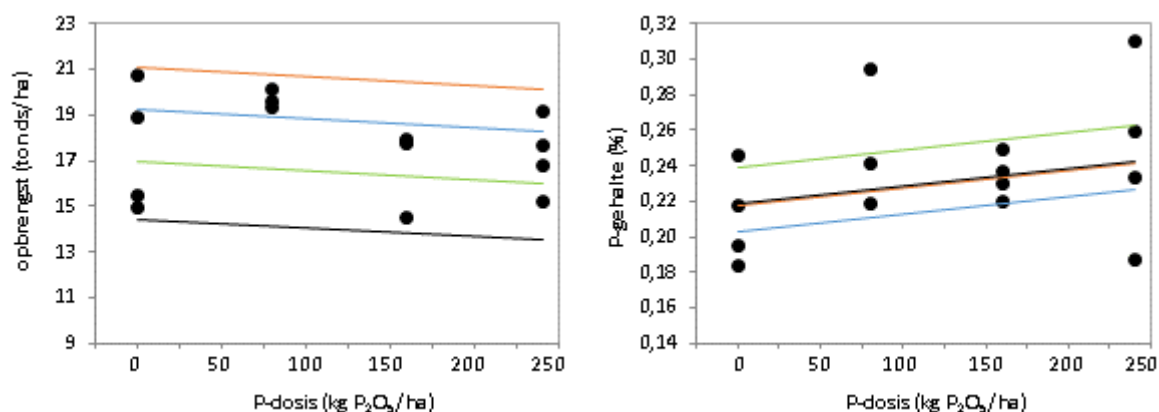
Aan de maïs in Dilsen-Stokkem ging geen snede gras vooraf. De bemestingstrappen werden op het geploegde perceel aangelegd op 25 april. Enkele dagen nadien werd de maïs gezaaid. Binnen de proef werden geen verschillen waargenomen (Figuur 88). Eind augustus moest echter voor de ganse proef en bij uitbreiding het ganse perceel worden vastgesteld dat de maïs duidelijk leed onder de droogte en dat er duidelijk minder kolven gevormd waren. Op 29 augustus werd de proef geoogst.

De opbrengstresultaten worden getoond in Tabel 74. Noch de verse opbrengst ( $p=0,19$ ) noch de droge stofopbrengst ( $p=0,45$ ) verschilden significant tussen de behandelingen (Tabel 74). Er bleek geen blokeffect ( $p=0,24$  respectievelijk  $0,26$ ).

Ook in het mixed model met de bemestingsdosis als continue variabele beschouwd, had de bemestingsdosis geen significante invloed op de opbrengst, noch vers ( $p=0,06$ ) noch droog ( $p=0,54$ ) (Figuur 87). Ook hier bleek geen blokeffect ( $p=0,17$  respectievelijk  $0,16$ ). De Mitscherlichcurve kon niet gefit worden.

Tabel 74. Opbrengstcijfers en fosforgehalte van de bemestingsproef van maïs in Dilsen-Stokkem in 2018 (perceel 18) voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes, ds: droge stof). Resultaten met eenzelfde letter in superscript zijn niet statistisch significant verschillend (Tukey-test, bemestingsdosis als categorische variabele).

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton vers/ha)	Droge stofopbrengst (ton ds/ha)	P-gehalte (%)
P1	0	44,8 (6,4) <sup>A</sup>	17,5 (2,8) <sup>A</sup>	0,21 (0,03) <sup>A</sup>
P2	80	48,2 (4,6) <sup>A</sup>	19,7 (0,4) <sup>A</sup>	0,25 (0,04) <sup>A</sup>
P3	160	40,8 (4,9) <sup>A</sup>	17,0 (1,7) <sup>A</sup>	0,23 (0,01) <sup>A</sup>
P4	240	38,9 (5,5) <sup>A</sup>	17,2 (1,6) <sup>A</sup>	0,25 (0,05) <sup>A</sup>



Figuur 87. Opbrengst (ton droge stof per ha) en P-gehalte (%P) in de maïsplant op perceel 5 in Dilsen-Stokkem (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis heeft geen significant effect, op de totale droge stofopbrengst, noch op het fosforgehalte.

Het gemiddelde fosforgehalte in de maïsplant bedroeg op dit perceel 0,23 %, vergelijkbaar met de proef in Lummen en hoger dan het kritisch fosforgehalte in de literatuur (0,14%-0,15% o.b.v. minder recente buitenlandse data). In het object zonder fosforbemesting was het gemiddelde fosforgehalte 0,21 %. In de bemeste objecten varieerde het fosforgehalte van 0,23 tot 0,25 %. De fosforgehaltes in de plant verschilden echter niet statistisch significant tussen de behandelingen ( $p=0,34$ ; dosis als categorische variabele beschouwd). Ook wanneer de bemestingsdosis als continue variabele beschouwd werd in het mixed model, bleek geen dosiseffect op het fosforgehalte in de maïsplant ( $p=0,17$ ) (Figuur 87).



Figuur 88. Bemestingsproef maïs in Dilsen-Stokkem op 31/05/2018

#### 12.3.3.19 Perceel 19: aardappelen te Kruishoutem (P-AL 74 mg P/kg)

Op 27 april werd de proef uitgezet en de bemestingstrappen aangelegd op het perceel in Kruishoutem. De dag erna werden aardappelen geplant. Op 7 juni leken de P1-behandelingen minder goed ontwikkeld dan de P4-behandelingen (Figuur 89). Op latere waarnemingstijdstippen waren er geen duidelijke visuele verschillen tussen de behandelingen.



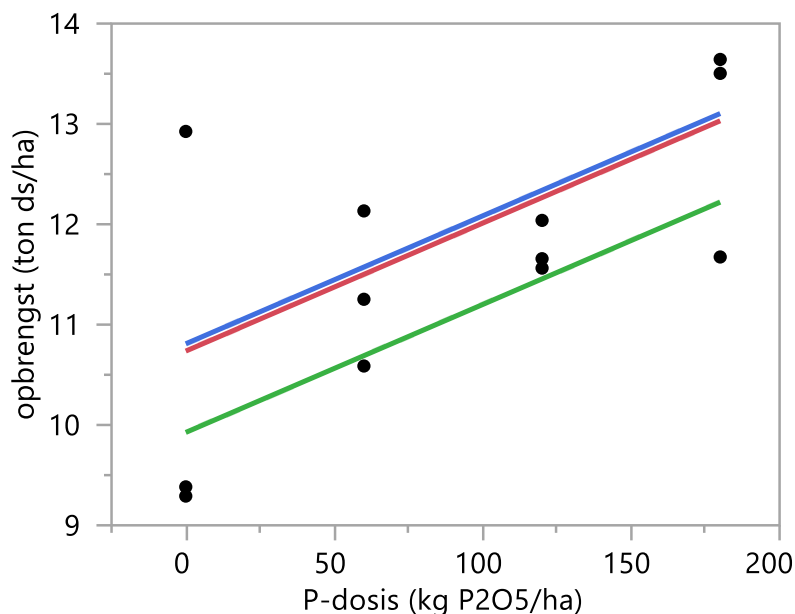
Figuur 89. Aardappelproef in Kruishoutem op 7 juni 2018. De aardappelplanten in behandelingen P1 (vooraan op de foto) werden visueel kleiner ingeschat dan in de P4-behandelingen (achteraan op de foto).

Op 6 september werden de aardappelen geoogst. Noch voor de verse opbrengst, noch voor de droge stofopbrengst, zowel totaal als voor de verschillende fracties, noch voor het onderwatergewicht werden verschillen tussen de bemestingsbehandelingen waargenomen (Tabel 75). Er werd ook nooit een significant blokeffect waargenomen. Nochtans werd in blok III wel een iets hogere P-CaCl<sub>2</sub> gemeten ( $p=0,02$ , 1,5 mg P/kg tegenover 1,3 mg P/kg). Voor P-AL waren er geen significante verschillen tussen de blokken.

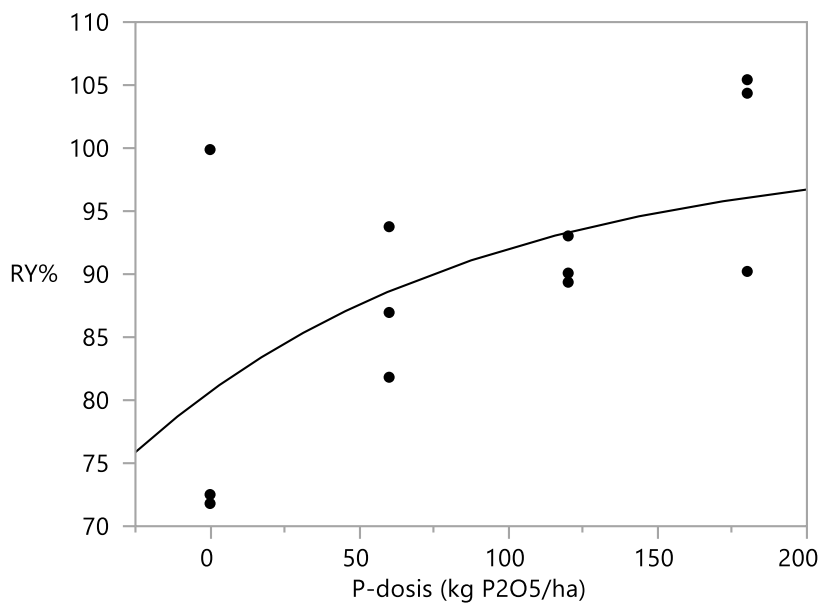
Met de bemestingsdosis als continue variabele en zonder randomisatie van de blokfactor, werd geen significant blokeffect vastgesteld op de totale DS-opbrengst ( $p=0,65$ ). In het mixed model werd een significant effect van de bemestingsdosis waargenomen ( $p=0,04$ , Figuur 90). De Mitscherlichcurve werd succesvol gefit op de data (Figuur 91). De parameter  $b_1$  (0,00886) was significant verschillend van nul (95% betrouwbaarheidsinterval 0,00068 – 0,0293), wat ook wijst op een significant effect van fosforbemesting op de aardappelopbrengst.

Voor het fosforgehalte in de knol werden geen verschillen gevonden tussen de bemestingstrappen indien categorisch beschouwd ( $p=0,47$ , Tabel 75) noch in het mixed model ( $p=0,36$ ). Het fosforgehalte lag wel iets onder het kritische gehalte in de literatuur (0,16%, obv minder recente buitenlandse data).

Op dit perceel met P-AL 74 mg P/kg werd dus een significant effect van de fosforbemestingsdosis op de droge stofopbrengst van aardappelen waargenomen.



Figuur 90. Totale opbrengst (ton droge stof per ha) van aardappelen op perceel 19 in Kruishoutem (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, het effect van de P-bemestingsdosis wel ( $p=0,04$ ).



Figuur 91. Mitscherlichcurve gefit op de data van de relatieve opbrengst (opbrengst ten opzichte van de gemiddelde opbrengst in de hoogste bemestingstrap) voor de veldproef met aardappelen in Kruishoutem in 2018

### 12.3.3.20 Perceel 20: Aardappelen te Wachtebeke

Op 28 april werd de proef uitgezet en de bemestingstrappen aangelegd op het perceel in Wachtebeke. De dag erna werden de aardappelen geplant. Op geen enkele van de waarnemingsmomenten konden visuele verschillen vastgesteld worden (Figuur 92).



Figuur 92. Aardappelproef te Wachtebeke op 21 juni 2018.

Op 31 augustus werden de aardappelen geoogst. De aardappelen vertoonden relatief veel doorwas. De opbrengst en de sortering van de aardappelen wordt getoond in Tabel 76.

Tabel 75. Opbrengstcijfers (ton per ha, totaal en voor de verschillende fracties), onderwatergewicht en fosforgehalte van de bemestingsproef aardappelen te Kruishoutem in 2018 (perceel 19) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)). De p-waarde voor ANOVA met bemestingsdosis als categorische variabele is nooit lager dan 0,05.

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton/ha)		droge stofopbrengst (ton/ha)				Onderwatergewicht (g/5kg)	P-gehalte (%)
		totaal	totaal	< 35 mm	35-50 mm	>50 mm	uitval		
P1	0	48,3 <sup>A</sup> (10,2)	10,5 <sup>A</sup> (2,1)	0,2 <sup>A</sup> (0,0)	1,2 <sup>A</sup> (0,1)	8,8 <sup>A</sup> (2,0)	0,0 <sup>A</sup> (0,0)	388 (5)	0,15 <sup>A</sup> (0,01)
P2	60	51,8 <sup>A</sup> (2,9)	11,3 <sup>A</sup> (0,8)	0,2 <sup>A</sup> (0,1)	1,5 <sup>A</sup> (0,3)	9,3 <sup>A</sup> (0,5)	0,0 <sup>A</sup> (0,0)	386 (11)	0,16 <sup>A</sup> (0,01)
P3	120	54,4 <sup>A</sup> (0,7)	11,8 <sup>A</sup> (0,3)	0,3 <sup>A</sup> (0,1)	1,6 <sup>A</sup> (0,4)	9,5 <sup>A</sup> (0,2)	0,1 <sup>A</sup> (0,1)	381 (3)	0,14 <sup>A</sup> (0,02)
P4	180	57,7 <sup>A</sup> (5,0)	12,9 <sup>A</sup> (1,1)	0,3 <sup>A</sup> (0,1)	1,7 <sup>A</sup> (0,6)	10,2 <sup>A</sup> (0,7)	0,3 <sup>A</sup> (0,3)	384 (6)	0,15 <sup>A</sup> (0,01)
<b>p-waarde ANOVA</b>		0,40	0,28	0,22	0,50	0,45	0,29	0,74	0,47

Tabel 76. Opbrengstcijfers (ton per ha, totaal en voor de verschillende fracties), onderwatergewicht en fosforgehalte van de bemestingsproef aardappelen te Wachtebeke in 2018 (perceel 20) voor de 4 P-bemestingsdosissen (3 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof,, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)). De p-waarde voor ANOVA met bemestingsdosis als categorische variabele is nooit lager dan 0,05.

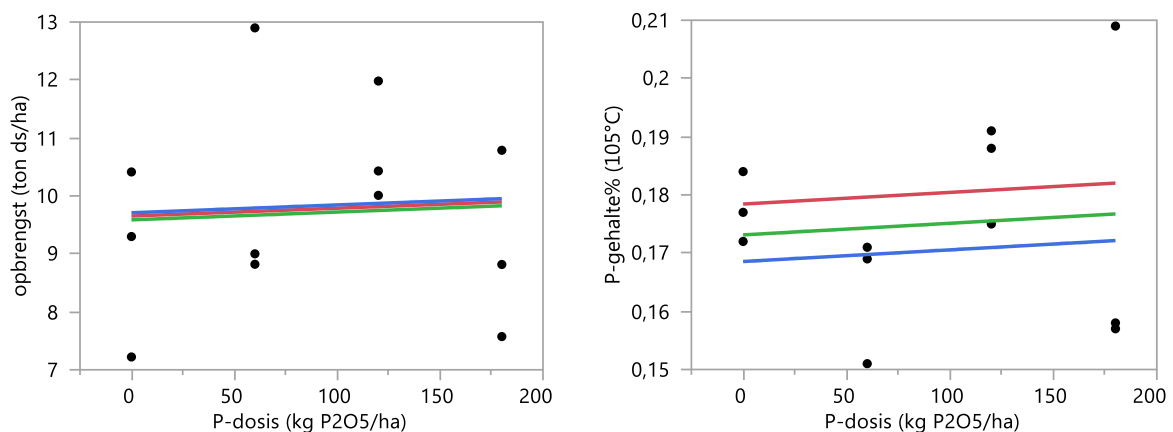
Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton/ha)		droge stofopbrengst (ton/ha)				Onderwatergewicht (g/5kg)	P-gehalte (%)
		totaal	totaal	< 35 mm	35-50 mm	>50 mm	uitval		
P1	0	40,0 (7,0)	9,0 <sup>A</sup> (1,6)	0,7 <sup>A</sup> (0,4)	3,6 <sup>A</sup> (0,4)	4,2 <sup>A</sup> (1,4)	0,01 <sup>A</sup> (0,01)	365 <sup>A</sup> (10)	0,18 <sup>A</sup> (0,01)
P2	60	42,5 (7,0)	10,2 <sup>A</sup> (2,3)	0,8 <sup>A</sup> (0,1)	3,8 <sup>A</sup> (0,9)	4,7 <sup>A</sup> (1,6)	0,01 <sup>A</sup> (0,02)	369 <sup>A</sup> (6)	0,16 <sup>A</sup> (0,01)
P3	120	48,9 (5,0)	10,8 <sup>A</sup> (1,0)	1,1 <sup>A</sup> (0,3)	3,8 <sup>A</sup> (0,7)	5,4 <sup>A</sup> (1,5)	0,01 <sup>A</sup> (0,01)	369 <sup>A</sup> (18)	0,18 <sup>A</sup> (0,01)
P4	180	40,2 (9,4)	9,1 <sup>A</sup> (1,6)	1,1 <sup>A</sup> (0,2)	4,2 <sup>A</sup> (0,7)	3,3 <sup>A</sup> (1,9)	0,02 <sup>A</sup> (0,02)	369 <sup>A</sup> (32)	0,17 <sup>A</sup> (0,03)
<b>p-waarde ANOVA</b>		0,46	0,52	0,31	0,74	0,52	0,92	0,99	0,57



Met de fosforbestedingsdosis als categorische variabele (ANOVA) werd nooit een significant effect van bestedingsdosis of blokeffect waargenomen op opbrengst, vers of droog, alle maatsorteringen, noch op het onderwatergewicht en het fosforgehalte in de knol (Tabel 76). Het fosforgehalte in de knol was ook hoger dan het kritische gehalte van 0,16% (obv minder recente buitenlandse data).

Ook wanneer de fosforbestedingsdosis als continue variabele wordt beschouwd, werd geen blokeffect waargenomen ( $p=0,43$ , Figuur 93). Bij het mixed model werd geen significant effect van de fosforbesteding waargenomen op de droge stofopbrengst ( $p=0,86$ ) en het P-gehalte ( $p=0,80$ ) (Tabel 76). Het fitten van de Mitscherlichcurve bleek niet mogelijk.

Op dit perceel met P-AL 90 mg P/kg werd dus geen effect van de fosforbestedingsdosis op de opbrengst waargenomen.

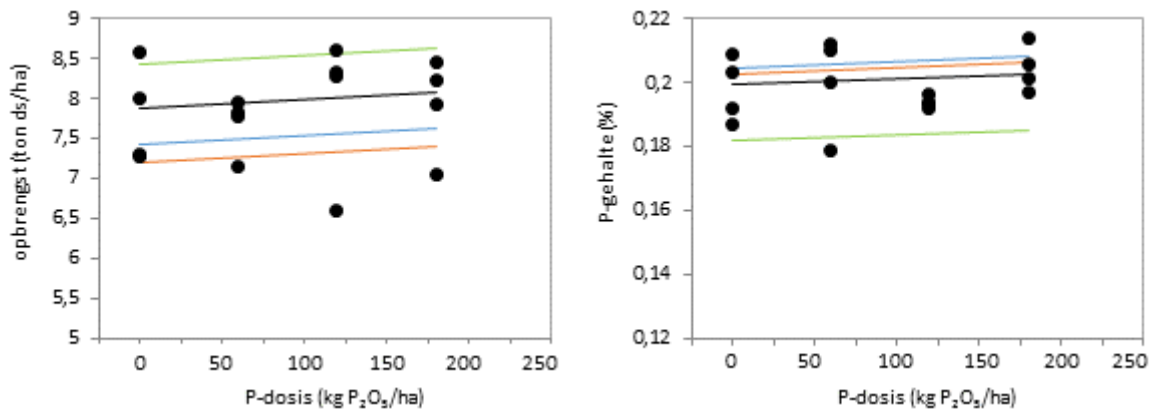


Figuur 93. Opbrengst (ton droge stof per ha) en P-gehalte in de knol op perceel 20 in Wachtebeke (2018) in functie van de bestedingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bestedingsdosis heeft ook geen significant effect op de totale droge stofopbrengst noch op het fosforgehalte.

### 12.3.3.21 Perceel 21: aardappelen te Lubbeek

Op 14 april werden de aardappelen op het proefveld te Lubbeek gepoot. De dag voordien werden de bestedingstrappen aangelegd. Visuele verschillen waren op geen enkel moment merkbaar. Op 30 augustus werden de aardappelen geoogst. De resultaten worden getoond in Tabel 77. Noch de verse opbrengst, de totale droge stofopbrengst of de droge stofopbrengst per kaliber verschilden statistisch significant tussen de bestedingstrappen (Tabel 77). Wel bleek een blokeffect voor de verse opbrengst ( $p=0,005$ ), de totale droge stofopbrengst ( $p=0,01$ ) en de droge stofopbrengst van de kalibers groter dan 50 mm ( $p=0,006$ ).

Ook in het mixed model met de bestedingsdosis als continue variabele bleek voor deze parameters een blokeffect met en zonder randomisatie van de blokfactor (Figuur 94). In het mixed model bleek enkel een significant invloed van de bestedingsdosis op de droge stofopbrengst van de kalibers 35-50 mm ( $p=0,03$ ).

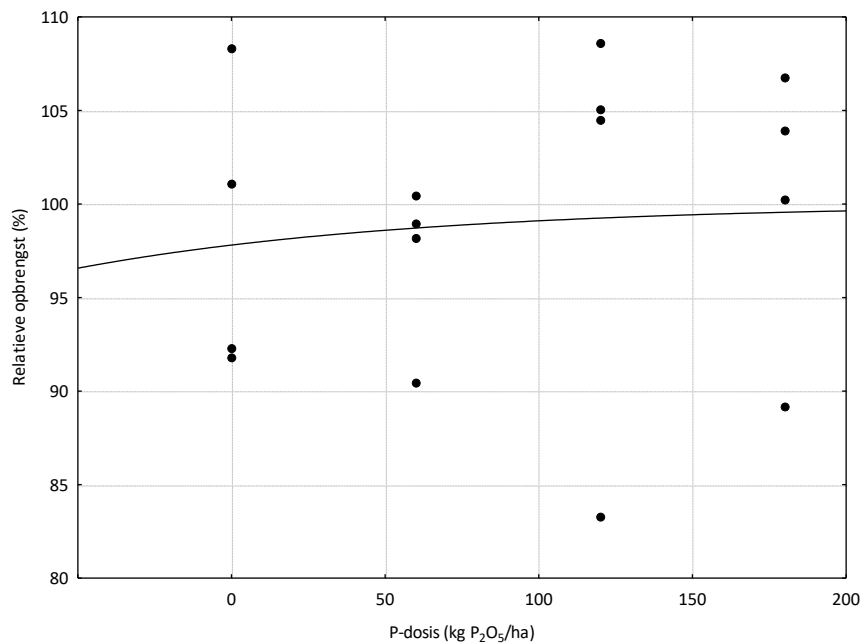


Figuur 94. Opbrengst (ton droge stof per ha) en P-gehalte (%) in de knol op perceel 21 in Lubbeek (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg  $P_2O_5$ /ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is significant voor de droge stofopbrengst, de P-bemestingsdosis heeft geen significant effect op de totale droge stofopbrengst, noch op het fosforgehalte.

Het fosforgehalte in de knol bleek niet significant te verschillen in functie van de bemestingsdosis, noch met de dosis als categorische variabele (Tabel 77;  $p=0,39$ ), noch met de dosis als continue variabele ( $p=0,5$ ). Voor het fosforgehalte in de knol bleek in beide gevallen ook geen blokeffect. Het gemiddelde P-gehalte in de knol bedroeg 0,20 %. Dit lag in alle objecten en herhalingen hoger dan de kritische waarde van 0,16 % uit de literatuur.

De resultaten van de kwaliteitsparameter onderwatergewicht, bleken niet normaal verdeeld te zijn en voldeden niet aan de voorwaarden voor een variantie-analyse. De niet-parametrische Kruskal-Wallis test toonde dat het onderwatergewicht niet significant ( $p=0,88$ ) verschilde tussen de bemestingstrappen.

Bij het fitten van de Mitscherlich-curve (Figuur 95) bleek de helling  $b_1$  niet significant te verschillen van nul. De opbrengst neemt met andere woorden niet significant toe in functie van de bemestingsdosis.



Figuur 95. Mitscherlichcurve gefit op de data van de relatieve opbrengst (opbrengst ten opzichte van de gemiddelde opbrengst in de hoogste bemestingstrap) van de aardappelen in Lubbeek in 2018 in functie van de bemestingsdosis (kg  $P_2O_5$ /ha).

### 12.3.3.22 Perceel 22: aardappelen te Zoutleeuw

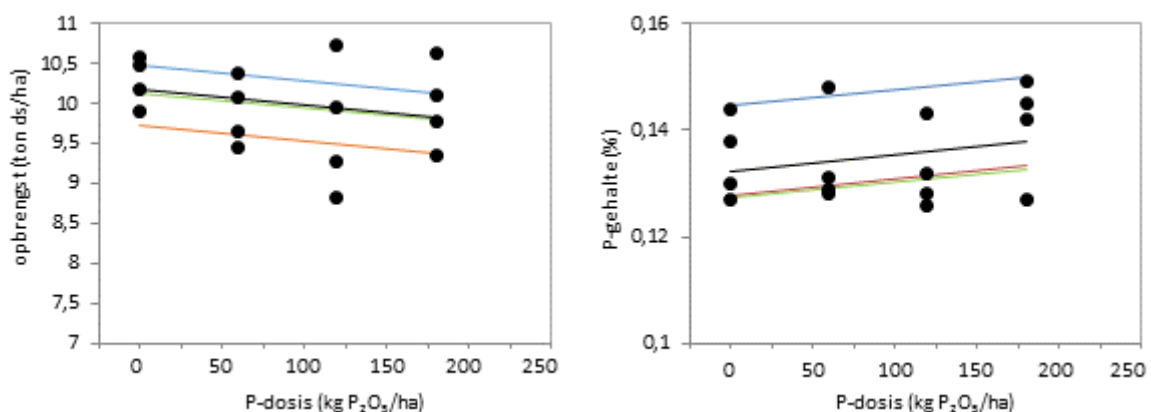
Op het proefperceel te Zoutleeuw werd de proef uitgezet op 12 april en werden de bemestingstrappen aangelegd. Op 28 april werden de aardappelen geplant. Op 24 mei bleek geen verschil in opkomst. Ook bij latere waarnemingen waren er geen duidelijke visuele verschillen tussen de behandelingen. Op 21 september werden de aardappelen geoogst. Op dat moment bleek geen verschil in afrijping tussen de verschillende objecten (Figuur 96).



Figuur 96. Bemestingsproef aardappelen in Zoutleeuw op 14/09/2018

De verse opbrengst bedroeg gemiddeld 40,6 ton/ha. In de variantie-analyse bleek de verse opbrengst niet significant te verschillen tussen de bemestingstrappen (Tabel 78;  $p=0,06$ ). Ook de droge stofopbrengst totaal of per maatsortering verschilde niet significant tussen de behandelingen ( $p=0,07-0,59$ ). Een blokeffect bleek voor de verse opbrengst ( $p=0,02$ ), de totale droge stofopbrengst ( $p=0,01$ ) en de droge stofopbrengst van de kalibers  $>50$  mm ( $0,01$ ).

In het mixed model met de bemestingsdosis als continue variabele, bleef dit blokeffect voor de net vermelde opbrengstparameters (respectievelijk  $p=0,049$ ;  $p=0,01$ ;  $p=0,04$ ), ook na randomisatie van het blokeffect. Ook als continue variabele en bij random blokfactor had de bemestingsdosis geen significant effect op de opbrengst, noch vers ( $p=0,33$ ), noch als totale droge stof ( $p=0,22$ ) of per maatsortering ( $p=0,15-0,50$ ) (Figuur 97).



Figuur 97. Opbrengst (ton droge stof per ha) en P-gehalte (%) in de knol op perceel 22 in Zoutleeuw (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is significant voor de droge stofopbrengst en het P-gehalte. De P-bemestingsdosis heeft geen significant effect op de totale droge stofopbrengst, noch op het fosforgehalte.

Tabel 77. Opbrengstcijfers (ton per ha, totaal en voor de verschillende fracties), onderwatergewicht en fosforgehalte van de bemestingsproef aardappelen te Lubbeek in 2018 voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)). De p-waarde voor ANOVA met bemestingsdosis als categorische variabele is nooit lager dan 0,05. (\*Kruskal-Wallis voor onderwatergewicht)

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton/ha)		droge stofopbrengst (ton/ha)			Onderwatergewicht (g/5kg)	P-gehalte (%)
		totaal	totaal	< 35 mm	35-50 mm	>50 mm		
P1	0	35,3 (2,7)	7,8 (0,6)	0,2 (0,1)	2,0 (0,2)	5,6 (0,5)	394 (12)	0,20 (0,01)
P2	60	35,5 (1,8)	7,7 (0,4)	0,2 (0,0)	1,9 (0,1)	5,6 (0,4)	388 (5)	0,20 (0,02)
P3	120	35,5 (3,9)	7,9 (0,9)	0,2 (0,0)	2,1 (0,3)	5,6 (0,8)	389 (5)	0,19 (0,00)
P4	180	35,8 (2,3)	7,9 (0,6)	0,2 (0,1)	2,3 (0,4)	5,4 (0,6)	387 (3)	0,20 (0,01)
<b>p-waarde ANOVA</b>		0,98	0,77	0,39	0,11	0,74	0,88*	0,39

Tabel 78. Opbrengstcijfers (ton per ha, totaal en voor de verschillende fracties), onderwatergewicht en fosforgehalte van de bemestingsproef aardappelen te Zoutleeuw in 2018 voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)). De p-waarde voor ANOVA met bemestingsdosis als categorische variabele is nooit lager dan 0,05. (\*Kruskal-Wallis voor P-gehalte)

Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton/ha)		droge stofopbrengst (ton/ha)			Onderwatergewicht (g/5kg)	P-gehalte (%)
		totaal	totaal	< 35 mm	35-50 mm	>50 mm		
P1	0	41,8 (0,7)	10,3 (0,3)	0,7 (0,2)	3,3 (0,2)	6,3 (0,4)	453 (11)	0,13 (0,01)
P2	60	40,8 (1,5)	9,9 (0,4)	0,7 (0,1)	3,1 (0,3)	6,1 (0,4)	452 (10)	0,13 (0,01)
P3	120	39,0 (2,9)	9,7 (0,8)	0,8 (0,2)	3,5 (0,4)	5,5 (0,9)	460 (8)	0,13 (0,01)
P4	180	41,2 (1,7)	10,0 (0,5)	0,8 (0,1)	2,9 (0,5)	6,2 (0,8)	457 (9)	0,14 (0,01)
<b>p-waarde ANOVA</b>		0,06	0,23	0,59	0,12	0,07	0,60	0,65*

Het onderwatergewicht verschilde niet significant tussen de behandelingen en werd niet significant beïnvloed door de bemestingsdosis wanneer geëvalueerd als continue variabele. Voor het onderwatergewicht speelde geen blokeffect.

De fosforgehaltes in de knol bleken niet normaal verdeeld te zijn en voldeden niet aan de voorwaarden voor een variantie-analyse. De niet-parametrische Kruskal-Wallis test toonde dat het fosforgehalte in de knol niet significant ( $p=0,65$ ) verschilde tussen de bemestingstrappen. Er bleek wel een blokeffect. Het gemiddelde fosforgehalte in de knol bedroeg op het proefveld te Zoutleeuw 0,14 %, lager dan de kritische waarde van 0,16 % uit de literatuur en dit in alle herhalingen en alle objecten.

De Mitscherlichcurve kon niet gefit worden.

### 12.3.3.23 Perceel 23: aardappelen te Bekkevoort

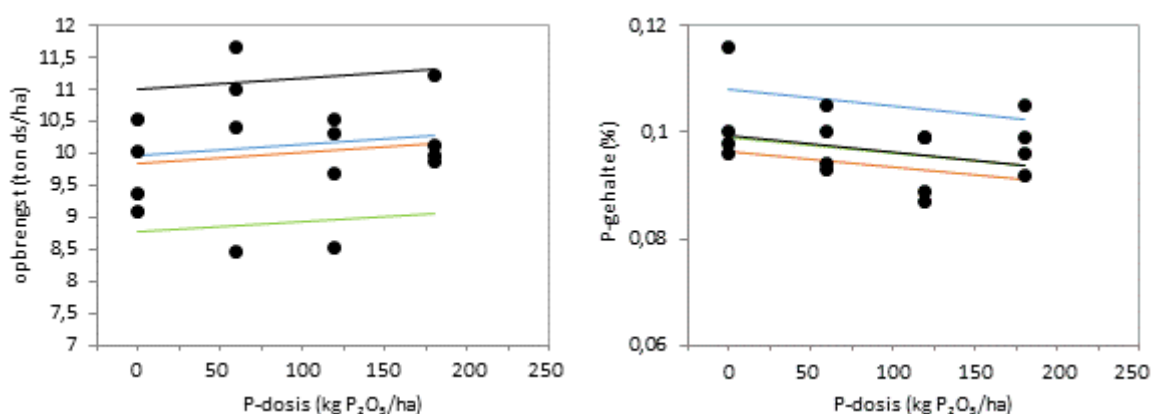
Op 6 april werd de proef op het perceel te Bekkevoort uitgezet en werden de bemestingstrappen aangelegd. Eind april werden de aardappelen geplant. Een maand later, einde mei, stond de proef uniform en was er visueel geen onderscheid tussen de objecten. Ook bij latere waarnemingen bleken geen visueel merkbare verschillen. Op 19 september werden de aardappelen geoogst.

De gemiddelde verse opbrengst te Bekkevoort bedroeg 41,3 ton/ha. De droge stofopbrengst bedroeg gemiddeld 10,1 ton/ha. Wanneer de bemestingsdosis als categorische variabele beschouwd werd, bleken geen significante verschillen tussen de opbrengst van de verschillende behandelingen, noch vers ( $p=0,73$ ), noch als droge stof ( $p=0,66$ ) noch per maatsortering ( $p=0,18-0,92$ ). Er werd voor geen van de opbrengstparameters een significant blokeffect waargenomen.

Ook in het mixed model waar de bemestingsdosis als continue variabele beschouwd wordt, heeft de fosforbemestingsdosis geen significant effect op de opbrengst, noch vers ( $p=0,58$ ), noch als droge stof ( $p=0,62$ ) noch per maatsortering (Figuur 98). Een fit van de Mitscherlichcurve bleek niet mogelijk.

Ook het onderwatergewicht verschilde niet significant tussen de verschillende bemestingstrappen (Tabel 79;  $p = 0,32$ ). Ook met het mixed model en de bemestingsdosis als continue variabele bleek er geen effect van de bemestingsdosis op het onderwatergewicht ( $p = 0,88$ ).

Het gemiddelde fosforgehalte bedroeg 0,10 %, duidelijk lager dan het kritische gehalte in de literatuur (0,16%, obv minder recente buitenlandse data). Het fosforgehalte in de knol bleek niet significant beïnvloed te zijn door de fosforbemestingsdosis ( $p = 0,31$ , bemestingsdosis beschouwd als continue variabele, Figuur 98).



Figuur 98. Opbrengst (ton droge stof per ha) en P-gehalte (%) in de knol op perceel 23 in Bekkevoort (2018) in functie van de bemestingsdosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Het blokeffect (verschillende kleur per blok) is niet significant, de P-bemestingsdosis heeft geen significant effect, op de totale droge stofopbrengst, noch op het fosforgehalte.

Tabel 79. Opbrengstcijfers (ton per ha, totaal en voor de verschillende fracties), onderwatergewicht en fosforgehalte van de bemestingsproef aardappelen te Bekkevoort in 2018 voor de 4 P-bemestingsdosissen (4 herhalingen, standaarddeviatie tussen haakjes). (ds: droge stof, P-bemestingsdosissen: nulbemesting (P1), evenwichtsbemesting (=gewasexport, P2), twee maal de gewasexport (P3) en drie maal de gewasexport (P4)). De p-waarde voor ANOVA met bemestingsdosis als categorische variabele is nooit lager dan 0,05.

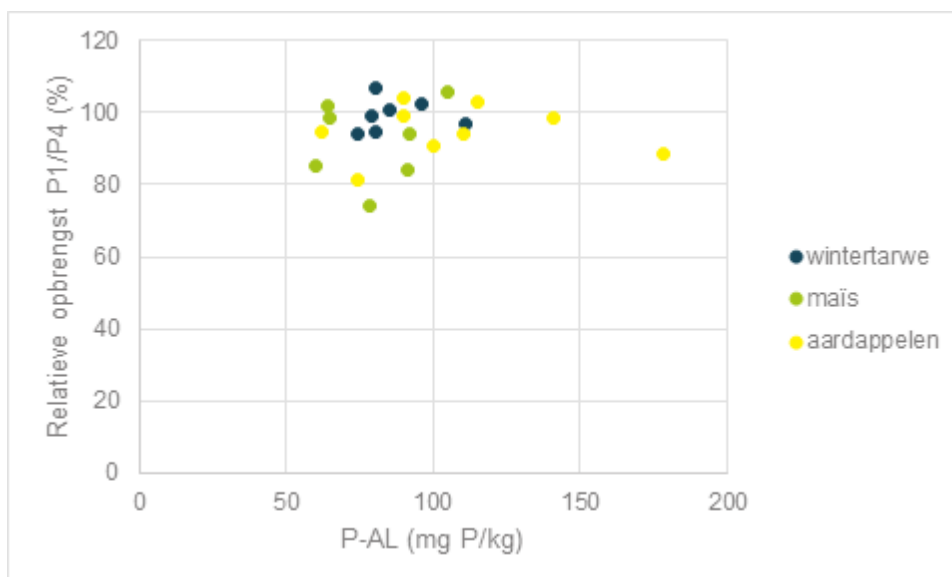
Behandeling	P-dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Verse opbrengst (ton/ha)		droge stofopbrengst (ton/ha)			Onderwatergewicht (g/5kg)	P-gehalte (%)
		totaal	totaal	< 35 mm	35-50 mm	>50 mm		
P1	0	40,4 (2,8)	9,8 (0,7)	0,4 (0,0)	2,4 (0,1)	7,0 (0,7)	408 (9)	0,10 (0,01)
P2	60	42,2 (6,1)	10,4 (1,4)	0,5 (0,0)	2,5 (0,3)	7,4 (1,7)	414 (10)	0,10 (0,01)
P3	120	40,2 (3,7)	9,8 (0,9)	0,4 (0,1)	2,3 (0,2)	7,1 (0,9)	403 (8)	0,09 (0,01)
P4	180	42,6 (3,1)	10,3 (0,6)	0,4 (0,1)	2,5 (0,3)	7,4 (0,9)	410 (4)	0,10 (0,01)
<b>p-waarde ANOVA</b>		0,73	0,66	0,18	0,52	0,92	0,32	0,47

### 12.3.4 Afleiden van de kritische fosforbeschikbaarheid op basis van drie jaar bemestingsproeven

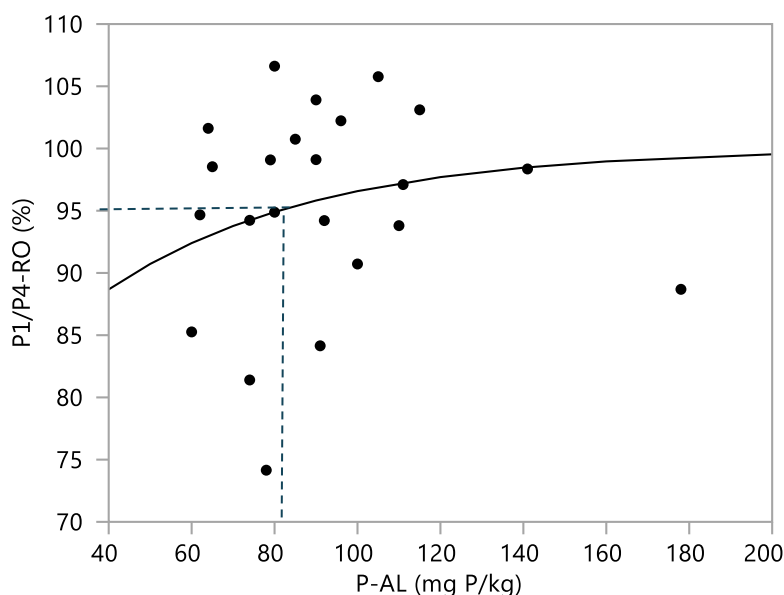
In 2016, 2017 en 2018 werden in totaal 23 nieuwe fosforbemestingsproeven aangelegd op leem, zandleem en zand, voor de gewassen wintertarwe (7), maïs (7) en aardappel (9). De relatieve opbrengst van de behandeling zonder fosforbemesting ten opzichte van deze met de hoogste fosforbemesting (180 tot 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) wordt in Figuur 99 uitgezet ten opzichte van P-AL gemeten in het proefperceel. Het is mogelijk om op deze data een Mitscherlichcurve te fitten (Figuur 83):

$$RO(\%) = b_0 + (100 - b_0) \times (1 - \exp(-b_1 \times P - AL)) \quad (\text{Vergelijking 2})$$

met  $b_0$  en  $b_1$  fitting parameters. Met de gefitte vergelijking kan een inverse predictie uitgevoerd worden om P-AL te vinden die aan een bepaalde relatieve opbrengst gerelateerd is. De kritische P-AL, namelijk deze gelinkt aan een relatieve opbrengst van 95%, is 81 mg P/kg. Gezien het relatief klein aantal datapunten is het 95% betrouwbaarheidsinterval vrij groot in vergelijking met deze bekomen uit de dataset van de veldproeven uit omliggende regio's (12.1) en de BDB-proeven uit het verleden (12.2): 42 – 120 mg P/kg.



Figuur 99. De relatieve opbrengst (van P1 ten opzichte van P4, %) van de bemestingsproeven in 2016, 2017 en 2018 in functie van P-AL (mg P/kg) voor wintertarwe, maïs en aardappelen



Figuur 100. Mitscherlichfit op de relatieve opbrengst (van P1 ten opzichte van P4, %) van de 23 bemestingsproeven in 2016, 2017 en 2018 in functie van P-AL (mg P/kg) voor wintertarwe, maïs en aardappelen. Het afleiden van de kritische P-AL bij 95% relatieve opbrengst is aangeduid met stippellijn.

In elke bemestingsproef werd ook P-CaCl<sub>2</sub> gemeten. Er waren echter te weinig data met P-CaCl<sub>2</sub> boven de detectie- en bepalingsgrens, waardoor er geen betrouwbare afleiding van een kritische P-CaCl<sub>2</sub> mogelijk was.

## 12.4 BEMESTINGSPROEF UGENT

Sinds 2010 loopt een veldproef op een zandleemperceel in Melle met tamelijk hoge P-AL-waarde, onder beheer van UGent (professor Dirk Reheul). Er zijn onder andere 8 P-trappen (van 0 tot 41 kg P/ha) met kunstmest aangelegd. Deze proef wordt besproken in bijlage 1. Bij de opbrengsten van de laatste 4 jaar werd er in drie jaar een significant effect van de fosforbemestingsdosis op de opbrengst waargenomen. De opbrengstdata van deze proef worden niet verder in detail apart geanalyseerd, maar ze worden wel mee opgenomen in de analyse van alle data voor het afleiden van de kritische P-AL voor Vlaanderen (zie 0).

## 12.5 AFLEIDEN VAN KRITISCHE FOSFORBESCHIKBAARHEID VOOR HET GEWAS IN VLAANDEREN

Er zijn in totaal vier mogelijke bronnen voor het afleiden van P-AL<sub>krit</sub> voor gewassen in Vlaanderen: de analyse van de langetermijn veldproeven in omliggende regio's (12.1), de BDB-bemestingsproeven uit het verleden (12.2), de nieuw aangelegde jaarlijkse bemestingsproeven gedurende drie jaar (12.3) en de bemestingsproef van UGent (12.4). De eerste analyse had als belangrijkste objectief de selectie van de beste methode voor het meten van de fosforbeschikbaarheid in de bodem, maar had als belangrijk resultaat ook voorlopige waarden voor P-AL<sub>krit</sub>, algemeen en specifiek voor de gewassen tarwe, gerst, maïs, suikerbiet en aardappelen. Voor dit laatste gewas waren de beschikbare gegevens beperkt. Voordelen van deze bron zijn de vele gegevens, nadelen zijn dat er geen proeven in Vlaanderen en heel wat oudere data (met vaak opbouwscenario's van bodem-P) opgenomen zijn. Ook bij de langdurige bemestingsproeven van BDB zijn er oudere data met rassen uit het verleden, maar hier zijn wel alle proeven in Vlaanderen (of net over de grens in Wallonië) uitgevoerd, en er zijn ook extra gewassen onderzocht. Er zijn proeven uitgevoerd bij gunstige en ongunstige bodem-pH. De bemestingsproeven die nieuw uitgevoerd zijn voor dit project zijn wel met recente, relevante gewassen uitgevoerd, tevens in Vlaanderen, maar enkel voor wintertarwe, maïs en aardappel. Deze proeven zijn ook enkel op percelen met een



gunstige bodem-pH aangelegd. De bemestingsproef van UGent is recent, bij gunstige bodem-pH en met meerdere gewassen. Om voor Vlaanderen relevante waarden te bepalen, is gekozen om de kritische fosforbeschikbaarheid af te leiden uit alle Vlaamse proeven bij gunstige bodem-pH: de BDB-bemestingsproeven uit het verleden bij gunstige bodem-pH, de nieuwe bemestingsproeven en de bemestingsproef van UGent. Daarvoor zijn 1158 datapunten beschikbaar. De afgeleide kritische waarde voor P-AL zal bijgevolg enkel gelden voor gunstige bodem-pH. Dit is een oproep voor landbouwers om bij fosfortekorten zeker ook de bodem-pH aan te pakken.

Het is niet mogelijk om naar analogie van de afleiding van de bovengrens van de streefzone (milieugrens voor P-AL, zie deel 14) te werken met het 80% betrouwbaarheidsinterval voor individuele bodems van de P-AL-waarde die gerelateerd is aan een relatieve opbrengst van 95%. Immers, zelfs bij zeer hoge P-AL-waarden (>300 mg P/kg) is de ondergrens van het 80% individuele betrouwbaarheidsinterval nog flink lager dan 95% relatieve opbrengst. Met andere woorden: zelfs bij zeer hoge P-AL is er voor een individuele bodem telkens meer dan 10% kans om minder dan 95% relatieve opbrengst te halen. Daarom wordt voor het afleiden van de kritische P-AL-waarde voor landbouw de grens van het eenzijdig 95% betrouwbaarheidsinterval voor de gemiddelde P-AL bij 95% relatieve opbrengst als criterium gebruikt. Dit wordt afgeleid met behulp van de Mitscherlichfit (Vergelijking 2). Met andere woorden, de kans is kleiner dan 5% dat de gemiddelde relatieve gewasopbrengst onder de 95% daalt bij deze afgeleide kritische P-AL. Bij deze waarde is er voor individuele bodems evenwel nog veel meer dan 5% kans om een relatieve opbrengst lager dan 95% te halen.

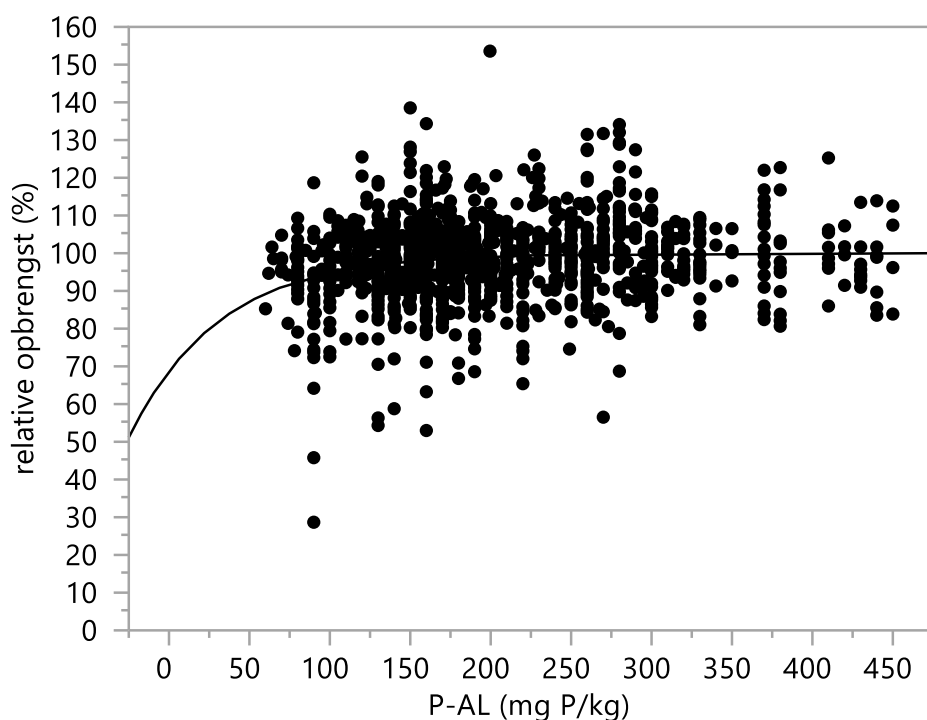
Er werd gekozen voor een algemene analyse voor alle gewassen samen omdat P-AL niet op korte termijn (binnen een rotatie met verschillende gewassen) kan gewijzigd worden. Ter aanvulling worden ook de data voor de verschillende gewassen apart gegeven. Hiervoor wordt de Mitscherlichcurve ook op de volledige dataset van 1158 datapunten gefit, maar met een aangepaste vergelijking met dummy-variabelen voor de verschillende gewassen:

$$RO(\%) = b_0 + (100 - b_0) \times (1 - \exp(-b_{gem} \times P - AL \times (1 + b_{aa} \times d_{aa} + b_{ge} \times d_{ge} + b_{gr} \times d_{gr} + b_{ma} \times d_{ma} + b_{sb} \times d_{sb} + b_{ta} \times d_{ta}))) \quad \text{Vergelijking 3}$$

Met  $b_0$  en  $b_{gem}$  de  $b_0$  en  $b_1$  die algemeen afgeleid werden voor alle gewassen samen (Vergelijking 2),  $b_{aa}$ ,  $b_{ge}$ ,  $b_{gr}$ ,  $b_{ma}$ ,  $b_{sb}$  en  $b_{ta}$  fitting parameters en  $d_{aa}$ ,  $d_{ge}$ ,  $d_{gr}$ ,  $d_{ma}$ ,  $d_{sb}$  en  $d_{ta}$  de dummy-variabelen (0 voor afwezig of 1 voor aanwezig) voor respectievelijk aardappelen, gerst, tijdelijk grasland, maïs, suikerbiet en tarwe. Voor rogge, haver, spelt en voederbieten werden geen gewasspecifieke waarden afgeleid door de beperkte grootte van de dataset.

Tabel 80. Kritische P-AL-waarden gerelateerd aan 95% relatieve opbrengst via de Mitscherlichfit, op basis van de dataset met oude BDB-proeven (enkele gunstige pH), nieuwe bemestingsproeven en bemestingsproef UGent

P-AL (mg P/kg) ganse dataset			
	N	Gemiddeld	Grens eenzijdig 95% BI
<b>Alle gewassen</b>	1158	103	114
<b>Aardappelen</b>	238	111	134
<b>Gerst</b>	214	137	159
<b>Tijdelijk grasland</b>	132	91	131
<b>Maïs</b>	115	154	188
<b>Suikerbiet</b>	131	83	112
<b>Tarwe</b>	243	58	87



Figuur 101. Mitscherlichfit van de relatieve opbrengst ten opzichte van P-AL in 1158 datapunten van oude BDB-proeven (enkele gunstige pH), nieuwe bemestingsproeven en bemestingsproef UGent

In Tabel 80 is te zien dat de gemiddelde P-AL gerelateerd aan 95% relatieve opbrengst 103 mg P/kg is. De grens van het eenzijdig 95% betrouwbaarheidsinterval van P-AL gerelateerd aan 95% relatieve opbrengst voor alle gewassen is 114 mg P/kg. Afgerond is 110 mg P/kg dus de kritische P-AL voor gewasopbrengst. Wel is te zien dat voor de fosforgevoelige gewassen hogere waarden worden afgeleid: voor maïs is dit bijvoorbeeld gemiddeld 154 mg P/kg en 188 mg P/kg als grens van het eenzijdig 95% betrouwbaarheidsinterval. Aangezien in de veldproeven over het algemeen bemonsterd werd tot 23 of 25 cm diep, is de waarde van 110 mg P/kg geldig voor een staalnamediepte van 23-25 cm.

Ter informatie: de dataset voor de afleiding kan uitgebreid worden met de veldproeven van BDB uit het verleden die bij ongunstige bodem-pH zijn uitgevoerd. In dit geval is de afgeleide gemiddelde P-AL gerelateerd aan 95% relatieve opbrengst hoger dan 103 mg P/kg, namelijk 121 mg P/kg, een waarde die relevant is voor de huidige situatie in Vlaanderen. De Mitscherlichfit van de data inclusief ongunstige bodem-pH is beter dan deze met enkel gunstige bodem-pH, waardoor het betrouwbaarheidsinterval minder breed is en de grens van het eenzijdig 95% betrouwbaarheidsinterval maar beperkt hoger dan de gemiddelde waarde, namelijk 130 mg P/kg.

## 12.6 MONITORINGSPROEVEN KRITISCHE P-AL VOOR GEWASSEN IN VLAANDEREN

In 2016 en 2017 werden monitoringsproeven uitgevoerd voor de kritische P-AL voor gewassen in Vlaanderen. Daarbij werd nagegaan of het fosforgehalte gemeten in het gewas onder kritische getabelleerde waarden viel (Tabel 81). Indien dit het geval was, kan gesteld worden dat de P-AL gemeten in het perceel onvoldoende is (onder de kritische waarde voor P-AL). Deze informatie zou bijgevolg kunnen bijdragen om de initiële kritische P-AL, afgeleid uit de veldproeven uit omliggende regio's (12.1), te valideren voor Vlaanderen. Deze monitoringsproeven leverden echter weinig bruikbare informatie op. Soms werden bij zeer hoge P-AL nog lager dan kritische fosforgehaltes in het gewas opgemeten, en omgekeerd. Mogelijk zijn er andere factoren dan P-AL bepalend voor het fosforgehalte in het gewas. Daarom werd na 2017 beslist om deze monitoringsproeven niet verder uit te voeren. De bespreking van deze proeven is terug te vinden in bijlage 2.

Tabel 81. Kritische fosforgehaltes afgeleid uit literatuuronderzoek voor 6 gewassen

Gewas	Kritisch fosforgehalte bij oogst		Kritische fosforgehalte tijdens groeiseizoen		
	Gehalte (%)	Plantdeel	Staalname-moment	Gehalte (%)	Plantdeel
Maïs	0,25	Graan	Bloei	0,25	Blad rond kolf
	0,14-0,15	Ganse plant			
Wintertarwe	0,30-0,35	Graan	Maart	0,28	Volledige scheut
Wintergerst	0,19	Graan	Maart	0,30	Volledige scheut
Aardappelen	0,16	Knol	Vroege bloei	0,30	Jongste volwassen blad
Suikerbieten	<0,13	Wortel	September	0,18	Blad
Gras	0,25	Blad	Kort voor eerste snede	0,25	Blad

## 13 DWP 2.2: KRITISCHE DREMPEL VOOR VERSCHILLENDE GEWASSEN

### 13.1 GEMODELLEERDE VERSUS GEMETEN KRITISCHE DREMPELS

In dit werkpakket gaan we op zoek naar de oorzaak van de verschillende kritische drempels voor verschillende gewassen, zoals vastgesteld in 12.5. Dit wordt hier modelmatig benaderd, m.a.w. we gaan opname en gewasgroeimodellen toepassen voor bodems met variërend P-aanbod (hier P-AL) en berekenen dan de verschillende groeicurves naargelang het type gewas.

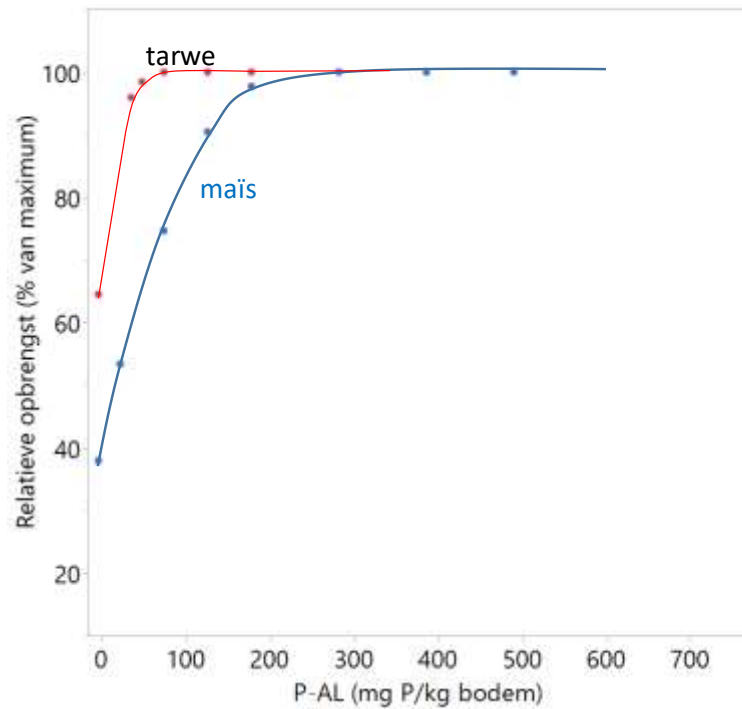
We starten hierbij in een vrij ongebruikelijk manier: we tonen eerst de resultaten van de modellering om erna op zoek te gaan welke parameter van het model de verschillende drempels verklaren.

In Tabel 82 staan de berekende P-AL drempels en in Figuur 102 de responscurve. Het model dat gebruikt werd, is dat van Nawara (2018) (PhD, KU Leuven, hieronder samengevat), een mechanistisch model dat gevalideerd werd op de grasproef in de serre (Nawara *et al.*, 2018) (zie DWP 1.3 in luik 1). Dat model werd aangepast met parameters voor groei, worteldichtheid en gehalte P van de veldgewassen maïs en tarwe. Geen enkele van die parameters werd gefit op de gemeten P-AL responscurve, m.a.w. deze modellering is onafhankelijk van de velddata (*forward modelling*).

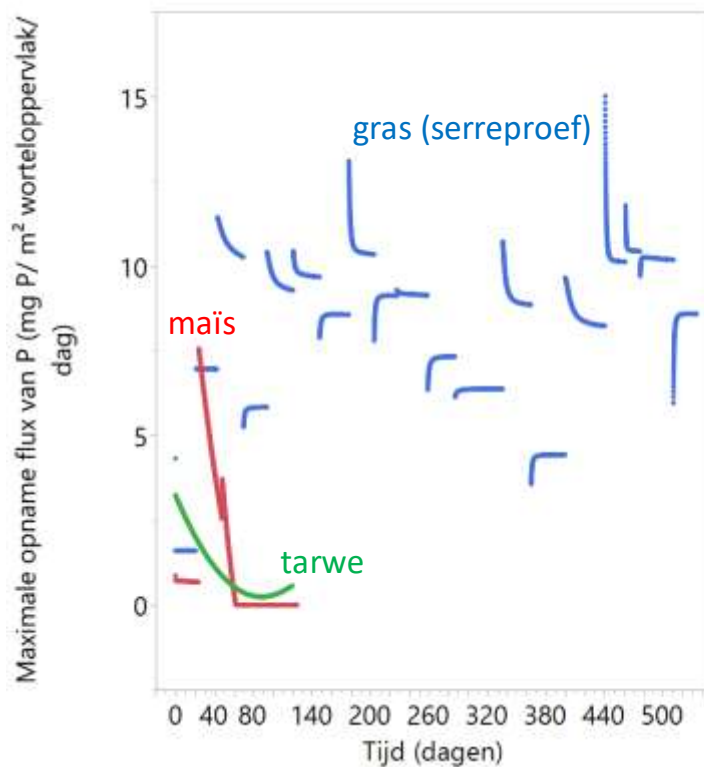
Tabel 82 toont een zeer sterke overeenkomst tussen berekende en gemeten waarden, de laatste zijn de data van dit project (afgeleid uit de BDB-bemestingsproeven uit het verleden bij gunstige bodempH, de nieuwe bemestingsproeven en de bemestingsproef van UGent, zie 12.5).

Tabel 82. Kritische P-AL waarden gerelateerd aan 95% relatieve opbrengst via de Mitscherlichfit, op basis van (1) metingen met de dataset met oude BDB-proeven (enkele gunstige pH), nieuwe bemestingsproeven en bemestingsproef UGent en (2) modellering van de responscurve met een mechanistisch model van Nawara 2018

	P-AL (mg P/kg)	
	Maïs	tarwe
	gemiddelde (95%BI)	gemiddelde (95%BI)
gemeten (BDB, dit project, UGent)	154 (113-195)	58 (24-93)
gemodelleerd model Nawara (2018)	183 (158-207)	36 (30-42)



Figuur 102. Mitscherlichfit van de relatieve opbrengst ten opzichte van P-AL van tarwe en maïs berekend met het model van Nawara (2018)



Figuur 103. De maximale flux van P aan het worteloppervlak voor (a) het gras in de serreproef van dit project, m.a.w. versnelde uitmijning (b) maïs in het veld en (c) tarwe in het veld. Die maximale flux is berekend uit de gemeten P-opname (kg P/ha/dag) bij optimaal aanbod gedeeld door het gemiddelde worteloppervlak per eenheid landbouwooppervlak ( $m^2$  worteloppervlak per ha). Bemerk dat de versnelde uitmijning hogere P-fluxen heeft t.o.v. veldsituatie en dat maïs op korte tijd een hoge flux nodig heeft om aan de behoefte te voldoen.

## 13.2 KORTE BESCHRIJVING VAN HET MODEL EN INTERPRETATIE VAN DE KRITISCHE DREMPELS PER GEWAS

Het model van Nawara (2018) staat beschreven in het doctoraat van Nawara (2018) (PhD KU Leuven) en steunt op het model van Barber (1984), het mechanistisch model dat het aanbod van P beschrijft vanuit diffusie en convectie van opgelost P van de bodem naar de wortel. Dat model werd conceptueel aangepast met twee belangrijke processen:

- de opname van P per eenheid wortel is geen functie van de concentratie in de oplossing maar wordt berekend aan de hand van de maximale vraag naar P, die op zijn beurt afhankelijk is van de actuele groei van de plant bij optimaal P-aanbod en het optimaal P-gehalte in de plant
- de desorptie van P van bodem naar de oplossing is niet berekend op basis van chemisch evenwicht maar op basis van de gemeten snelheid van desorptie. Die neemt af naarmate er minder P in de bodem zit.

In het doctoraat van Nawara (2018) werd het model gevalideerd met de serreproef (uitmijning). In het laatste deel van het doctoraat (p.106-111) werd dit uitgewerkt voor het veld met tarwe als gewas, we verwijzen naar dat doctoraat voor alle details. Voor maïs werden dan voor dit project nog parameters gezocht (Tabel 83), de bron van data voor worteldensiteit (Yamaguchi and Tanaka, 1990) en optimaal P-gehalte (Reuter and Robinson, 1997) komen uit zelfde reviews als gebruikt voor tarwe. De groei van maïs komt uit data van de BDB en van Kerré et al. (2017).

Het model werd berekend voor de eigenschappen van de gemiddelde Vlaamse bodem, d.w.z. vochtgehalte, verhouding snelle/trage P fracties, desorptiesnelheden et cetera (zie ook chemische desorptie in DWP 3.2 in luik 3). De P-Ox werd gevarieerd in trappen tussen 25 en 800 mg P/kg bodem en voor al die situaties werd de groei van beide planten berekend en de finale opbrengst wordt weergegeven in Figuur 102. De omzetting van P-Ox naar P-AL maakte gebruik van de correlaties tussen beide voor Europese bodems namelijk  $P-AL = -30 + 0.52 \times P-Ox$  ( $R^2 = 0.73$ ) (Nawara *et al.*, 2017).

Tabel 83. Optimale groei en P-gehalte in scheut bij niet limiterend P aanbod voor tarwe en maïs die in Vlaanderen groeien. Het groeiseizoen start in het voorjaar (opname van wintertarwe is verwaarloosbaar voor de lente) en duurt iets minder lang voor tarwe dan voor snijmaïs. De P-vraagsnelheid van maïs is wel groter dan van tarwe op de bepaalde duur van het groeiseizoen.

Tarwe			Maïs		
Tijd (dagen)	P in scheut (mg P/kg DS)	Biomassa (ton/ha)	Tijd (dagen)	P in scheut (mg P/kg DS)	Biomassa (ton/ha)
0	9,1	0	0	10	0,0
40	5,5	4,3	24	9,6	0,5
80	4	8,6	48	6	6,1
120	2,7	13	72	3	14,4
			96	2	17,9
			124	1,8	19,6
straal wortels (mm)	0,18			0,28	
oppervlak wortels (m <sup>2</sup> /kg bodem)	0,10			0,092	

Beide gewassen nemen ongeveer 35 kg P/ha op bij optimaal P-aanbod volgens dit model. Toch is er belangrijk verschil in de P-AL "behoefte", deze is merkbaar hoger bij maïs t.o.v. tarwe. De oorzaak ervan vindt men met een parameter gevoeligheidsanalyse en staat in Figuur 103: maïs heeft een hogere groeisnelheid en bijhorend hogere P-vraag per eenheid worteloppervlak dan tarwe. Die zorgt

voor snellere uitputting van P aan het worteloppervlak en dit kan enkel worden vermeden door een aanzienlijke P-AL, m.a.w. met een grote hoeveelheid P in de snel beschikbare fractie.

Samenvattend tonen de simulaties en parameter gevoeligheidsanalyse (Nawara, 2018) (pg 101) aan dat de kritische drempel van een gewas sterk stijgt naarmate

1. de vraag per eenheid worteloppervlak groter wordt m.a.w. genotypische eigenschappen zoals snellere groei en dikkere wortels.
2. het vochtgehalte in de bodem lager is omdat de effectieve diffusiecoëfficiënt sterkt daalt
3. de verhouding snelle P over trage P (kinetische fracties) lager wordt, bijvoorbeeld na een periode van uitmijning

## 14 DWP 2.3: VERLIESCURVE

### 14.1 KADERING EN DOEL

De bovengrens van de streefzone is de P-AL waarboven de fosforverliezen niet meer aanvaardbaar zijn voor het milieu. Er zijn in de literatuur verschillende aanwijzingen terug te vinden dat de milieugrenswaarde hoger is dan de landbouwgrenswaarde (Sharpley and Tunney, 2000; Tunney *et al.*, 2002; McDowell, 2012; Schoumans *et al.*, 2015). Alles hangt uiteraard af van de in te nemen 'veiligheidsmarge', of anders gezegd: met hoeveel kans bepaalde drempels overschreden mogen worden.

Oorspronkelijk werd voorgesteld om de verliescurve (groene lijn in Figuur 37) af te leiden op basis van kolomproeven met 21 Vlaamse bodems met variërende fosforbeschikbaarheid (luik 1, DWP 1.4). De milieugrenswaarde (bovengrens streefzone) is dan de P-AL gerelateerd aan een uitlogende fosforconcentratie gelijk aan de milieunorm. Omwille van verschillende bedenkingen door de stuurgroep werd deze piste verlaten en een alternatieve werkwijze met de fosfaatverzadigingsgraad afgeleid om de kritische milieugrens te berekenen. Gevolg daarvan is wel dat er geen verliescurve beschikbaar is, zodat Figuur 37 niet opgesteld kan worden voor P-AL. Het bodem-plant-model (DWP 2.4) wordt daarom gereduceerd tot het afleiden van de streefzone voor P-AL.

### 14.2 FOSFAATVERZADIGINGSGRAAD

In een eerste stap gaan we op zoek naar een milieugrens voor de fosfaatverzadigingsgraad (FVG). Uit de kolomproeven van DWP 1.4 bleek dat FVG, berekend als

$$FVG = \frac{P-Ox}{0,5*(Fe-Ox+Al-Ox)} \quad \text{Vergelijking 4}$$

de beste van de zes bodemfosfortesten bleek om de fosforbeschikbaarheid voor uitloging te weerspiegelen. Ook in de uitgebreidere analyse van Warrinnier *et al.* (in voorbereiding), waarbij 39 bodems geanalyseerd werden, bleek FVG de fosforconcentratie in de uitloogoplossing het best te voorspellen. Belangrijk hierbij om op te merken is, dat deze formule voor de fosfaatverzadigingsgraad in Vlaanderen momenteel enkel voor kalkarme zandbodems (pH-KCl<6,0) gebruikt wordt. Bij bovenstaande analyses werd Vergelijking 4 echter ook gebruikt voor andere bodems dan kalkarme zandgronden, waarvoor deze vergelijking oorspronkelijk werd opgesteld (van der Zee *et al.*, 1990a, b). Uit DWP 1.4 bleek dat de relatie tussen de fosforconcentratie in de uitloogoplossing en FVG (zoals berekend met Vergelijking 4) niet anders was voor kalkarme zandbodems als voor andere bodemtexturen. Dit is niet verrassend gezien ook in andere bodemtexturen dan kalkarme zandgronden Fe en Al bepalend zijn voor fosforvastlegging. Ook in andere studies met kolommen, lysimeters en runoff-experimenten kwam FVG, niet alleen voor kalkarme zandgronden, als goede voorspeller van P-uitloging en P-verlies naar voor (De Smet *et al.*, 1995; Baert *et al.*, 1997; Brookes *et al.*, 1997; Leinweber *et al.*, 1999; Schroeder *et al.*, 2004; Hartz and Johnstone, 2006).

Schoumans & Chardon (2015) gingen na hoe de FVG en de kritische FVG voor verschillende bodemtexturen in Nederland kon berekend worden. Algemeen werd vertrokken van de Langmuirvergelijking

$$Q = \frac{K.c.Q_m}{1+K.c} \quad \text{Vergelijking 5}$$

Met Q: de hoeveelheid geadsorbeerde fosfaat, K: de Langmuirsorptieconstante,  $Q_m$ : de maximale fosfaatadsorptiecapaciteit en c: de ortho-P concentratie. Deze formule was ook het startpunt voor de berekening van FVG voor kalkarme zandgronden door van der Zee *et al.* (1990a, b). Uiteindelijk wordt tot de nog steeds algemene, voor alle bodemtexturen geldige, formule gekomen



$$FVG = \frac{P_{act,0-L_{ref}}}{FBV_{0-L_{ref}}}$$

Vergelijking 6

met  $P_{act,0-L_{ref}}$  de actuele hoeveelheid geaccumuleerd fosfaat in de bodem tot referentiediepte L en  $FBV_{0-L_{ref}}$  het fosfaatbufferend vermogen van de bodem tot referentiediepte L, dit is de maximale fosfaatsorptiecapaciteit.

De referentiediepte is de diepte waar de kritische ortho-P-concentratie niet mag overschreven worden. In Nederland is als referentiediepte gekozen voor de gemiddelde hoogste grondwaterstand. In de Vlaamse wetgeving is de referentiediepte gesteld op 90 cm, tenzij de gemiddelde hoogste grondwaterstand ondieper voorkomt. In dit laatste geval is de referentiediepte gelijk aan de gemiddelde hoogste grondwaterstand (Mestdecreet en Besluit van de Vlaamse regering van 20 december 1995; Mestdecreet 2006). In Vlaanderen is de gemiddelde hoogste grondwaterstand per perceel echter niet gekend. In het compendium Bemonsteringsprocedures in het kader van het Mestdecreet (BAM), wordt de profielgemiddelde FVG tot 90 cm bepaald en berekend. Informatie over de grondwaterstand (bijvoorbeeld de diepte van het voorkomen van gleyverschijnselen) dient wel opgenomen te worden in het analyseverslag. Dit heeft geen invloed op de berekeningen, maar is van belang bij de interpretatie.

$P_{act,0-L_{ref}}$  kan voor alle bodemtexturen gelijkgesteld worden aan het fosfaatgehalte geëxtraheerd met oxalaat, P-Ox. Wat wel kan verschillen tussen bodemtexturen, is  $FBV_{0-L_{ref}}$  en  $FVG_{krit}$ , dit is de kritische fosfaatverzadigingsgraad waarboven c, de orthofosfaatconcentratie in de uitloegoplossing, te hoog wordt. Dit wordt hieronder uitgewerkt.

#### 14.2.1 Het fosfaatbufferend vermogen (FBV)

Voor **kalkarme zandgronden** en **veenachtige kleibodems** kan FBV berekend worden als

$$FBV = \alpha(Al - Ox + Fe - Ox)$$

Vergelijking 7

met Al-Ox en Fe-Ox het oxalaat-extraheerbaar aluminium- en ijzergehalte en  $\alpha$  de maximale fosfaatsorptiecoëfficiënt, waarvoor een waarde van 0,5 kan aangenomen worden (van der Zee *et al.*, 1990a, b; Schoumans and Chardon, 2015). Zo wordt voor FVG tot Vergelijking 1 gekomen.

Voor **kleibodems** is het oxalaat-extraheerbaar aluminium- en ijzergehalte doorgaans veel hoger, maar het reactiemechanisme (snelle adsorptie en trage diffusie/precipitatie) is hetzelfde door de rol van microkristallijne Al- en Fe-sesqui(hydr)oxides. Voor Nederlandse bodems werd er geen invloed van het  $CaCO_3$ -gehalte gevonden op de maximale P-sorptiecapaciteit (FBV) voor kleibodems, en dit wordt bevestigd door andere literatuurgegevens (Schoumans and Chardon, 2015). Daarom wordt voorgesteld om zowel voor kalkarme als kalkrijke kleibodems ook gebruik te maken van Vergelijking 7 voor het berekenen van FBV.

Voor **kalkgedomineerde grove zandbodems** is  $CaCO_3$  wel bepalend voor fosforvastlegging, maar dan vooral het specifiek oppervlak van  $CaCO_3$  (Schoumans, 2014). Het  $CaCO_3$ -gehalte zelf blijkt niet gerelateerd met FBV. In de praktijk wordt voor de kalkgedomineerde zandbodems een gemiddeld FBV aangenomen van 8,5 mmol  $kg^{-1}$  (Oscar Schoumans, persoonlijke communicatie).

Kalkgedomineerde zandbodems zijn bodems met significante aanwezigheid van  $CaCO_3$ , waardoor  $CaCO_3$  belangrijker wordt dan de Al- en Fe-oxides voor fosforvastlegging. Vergelijking 7 is daarom voor kalkarme zandbodems geldig in een ruimer pH-bereik (pH-KCl < 7) dan gevalideerd door van der Zee *et al.* (1990a, b) en momenteel gangbaar in de Vlaamse wetgeving (pH-KCl < 6). De kalkgedomineerde zandbodems maken maar een klein deel uit van het Vlaamse landbouwareaal: slechts 1,3% van de akkers heeft een pH-KCl boven 6,8 en 4,5% weides een pH-KCl hoger dan 6,4. Het percentage bodems met pH-KCl hoger dan 7,0 is uiteraard nog veel lager (Tits *et al.*, 2016).

Conclusie: in navolging van Schoumans & Chardon (2015) wordt voor alle bodems gebruik gemaakt van Vergelijking 7 om FBV te berekenen tot de referentiediepte. Enkel voor de weinig voorkomende kalkgedomineerde grove zandbodems (pH-KCl > 7, grondsoorten 10 tot en met 24 en 28) wordt een gemiddelde FBV van 8,5 mmol P  $kg^{-1}$  naar voor geschoven. Er werd reeds aangetoond met kolomproeven met 39 bodems met uiteenlopende karakteristieken (pH KCl 3,9-7,0, texturen zand,

zandleem en leem) dat er een goede correlatie was tussen de P-concentratie in het uitloogwater en FVG berekend met behulp van Vergelijking 4/7 (Warrinnier *et al.*, in voorbereiding). Dit wijst ook op de ruimere toepasbaarheid van Vergelijking 4 en 7 dan momenteel beschreven in de Vlaamse wetgeving.

### 14.2.2 De kritische FVG

Algemeen geldt voor alle bodemtexturen

$$FVG_{krit} = \frac{\gamma \cdot K \cdot c_{krit}}{1 + \gamma \cdot K \cdot c_{krit}} \quad \text{Vergelijking 8}$$

met  $\gamma$  een bodemcoëfficiënt (verhouding van de maximale fosfaatsorptiecapaciteit (FBV) over de maximale fosfaatadsorptiecapaciteit), en  $c_{krit}$  de kritische orthofosforconcentratie, dit is de uit milieuoverwegingen maximaal aanvaardbare orthofosforconcentratie.

Met de parameters gerapporteerd door van der Zee (1990a, b) en Schoumans & Chardon (2015) en een kritische orthofosforconcentratie van 0,1 mg o-P/l wordt een  $FVG_{krit}$  van 25% voor kalkarme zandgronden en kleibodems berekend. Voor veenbodems is dit slechts 2% en voor kalkrijke zandgronden is dit 8%. De bekomen  $FVG_{krit}$  zijn echter lager dan deze berekend door Schoumans & Chardon (2015) omdat zij voor  $c_{krit}$  gemeten grondwaterconcentraties (achtergrondwaarden) hebben genomen. Echter, in de afleiding voor dit project wordt uitgegaan van de norm voor orthofosforconcentratie voor oppervlaktewater in Vlaanderen als de kritische orthofosforconcentratie voor uitloging. Deze norm varieert wel volgens het type oppervlaktewaterlichaam (tussen 0,07 en 0,14 mg o-P/l), algemeen wordt een norm aangenomen van 0,1 mg o-P/l.

Conclusie: een  $FVG_{krit, 0-90cm}$  van 25% wordt voorgesteld voor alle bodemtexturen, behalve voor veenbodems (2%) en kalkrijke zandgronden (8%). Gemakkelijkshalve zou er ook enkel van 25% uitgegaan kunnen worden gezien het beperkt voorkomen van de veenbodems en kalkrijke zandgronden:

- Echte veengronden komen enkel voor in natuurgebieden. Op basis van het koolstofgehalte in landbouwgronden (Tits *et al.*, 2016), waarbij de hoogste klasse als veenachtig beschouwd wordt, zijn in de Polders 0,1% van de bemonsterde akkers en 0,1% van de akkers in de Leemstreek veenachtig. Wat weides betreft kan 0,4 % van de bemonsterde weides in België als veenachtig worden geklasseerd.
- Volgens de cijfers van BDB (Tits *et al.*, 2016) heeft bij zandgronden 1,3% van de akkers een pH-KCl boven 6,8 en 4,5% weides een pH-KCl hoger dan 6,4. Het percentage bodems boven pH-KCl 7,0 is uiteraard nog veel lager.

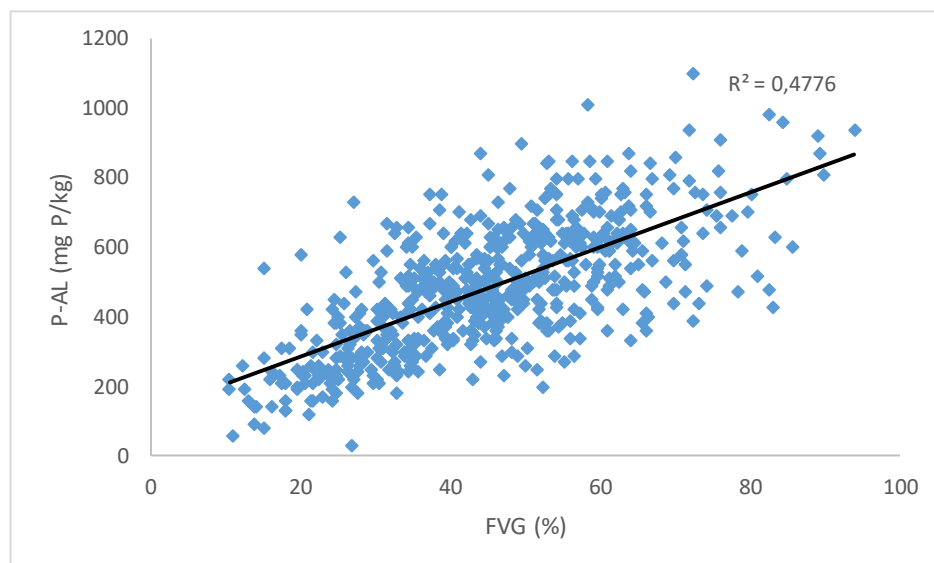
De kritische milieuwaarde voor P-AL is afgeleid uit  $P-AL_{0-30cm}$  en  $FVG_{0-90cm}$ . Indien er in de toekomst nieuwe inzichten ontstaan over de kritische FVG-waarden, kunnen deze eenvoudig aangepast worden.

## 14.3 RELATIE TUSSEN FVG EN P-AL

Op basis van bovenstaande informatie konden waarden voor  $FVG_{krit, 0-90cm}$  afgeleid worden. Gezien P-AL in luik 1 geselecteerd werd als beste test, is een  $P-AL_{krit}$  van de toplaag (0-30 cm) nodig. Met behulp van een uitgebreide dataset van de Bodemkundige Dienst van België kan de omrekening tussen  $FVG_{krit, 0-90cm}$  en P-AL in de toplaag gemaakt worden. Voor 612 praktijkpercelen met een brede range aan eigenschappen (pH-KCl: 3,6-7,6, alle texturen, verschillende bodemtypes) heeft BDB  $P-AL_{0-30cm}$  en  $FVG_{0-90cm}$  ter beschikking.

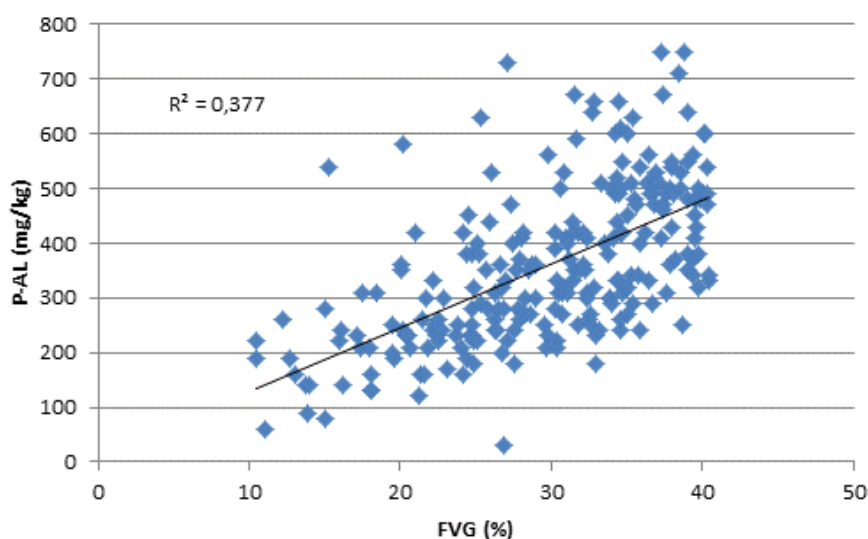
Van de 612 stalen vielen 7 bodems in de categorie 'kalkrijke zandbodems'. Indien FVG berekend werd voor deze stalen met een FBV van 8,5 mmol P kg<sup>-1</sup> (zie hoger), dan werden hoge FVG-waarden bekomen van 170% tot 243% (gemiddeld 222%). Indien toch gebruik gemaakt wordt van Vergelijking 4, hadden deze bodems FVG-waarden tussen 45% en 81% (gemiddeld 65%).

De FVG van de overige 605 stalen werd bepaald conform het Mestdecreet en het Besluit van de Vlaamse regering betreffende de fosfaatverzadigde gronden, beiden van 20 december 1995. Informatie over de grondwaterstand werd opgenomen in het analyseverslag. Vijfentwintig van de 612 percelen hadden een grondwaterstand minder diep dan 90 cm, maar er werd wel bemonsterd en FVG berekend tussen 0 en 90 cm.



Figuur 104. Lineaire relatie tussen P-AL<sub>0-30cm</sub> en FVG<sub>0-90cm</sub> voor 605 bodems (dataset 612 bodems uitgezonderd 7 kalkrijke zandbodems) met brede range aan bodemeigenschappen (BDB)

In Figuur 104 is de relatie tussen P-AL<sub>0-30cm</sub> en FVG<sub>0-90cm</sub> voor de dataset van 605 bodems (zonder 7 kalkrijke zandbodems) gegeven. De correlatie tussen P-AL<sub>0-30cm</sub> en FVG<sub>0-90cm</sub> is goed ( $r=0,69$ ,  $p<0,001$ ). In deze analyse wordt FVG<sub>0-90cm</sub> beschouwd als onafhankelijke variabele, namelijk als proxy voor het milieurisico (op basis van de afleiding hierboven). Op basis van gegeven waarden voor FVG<sub>0-90cm</sub> kunnen gerelateerde waarden voor P-AL<sub>0-30cm</sub> (afhankelijke variabele) afgeleid worden, die gelinkt zijn aan hetzelfde milieurisico. Hierbij is vooral de FVG<sub>krit,0-90cm</sub> van 25% interessant. In de buurt van deze waarde volgt het lineaire model, gefit op de ganse dataset, visueel echter minder goed de puntenwolk (linkerdeel van Figuur 104). Daarom werd dezelfde lineaire analyse ook eens uitgevoerd voor een deel van de dataset, namelijk de bodems met een FVG tussen 10% en 40%. Dit betreft 246 van de 605 stalen. Ook voor deze subset is de correlatie tussen P-AL<sub>0-30cm</sub> en FVG<sub>0-90cm</sub> goed ( $r=0,61$ ,  $p<0,001$ , Figuur 105) en is de fit van de data in de buurt van FVG<sub>krit,0-90cm</sub> = 25% visueel beter (gaat beter door het midden van de puntenwolk rond deze waarde).



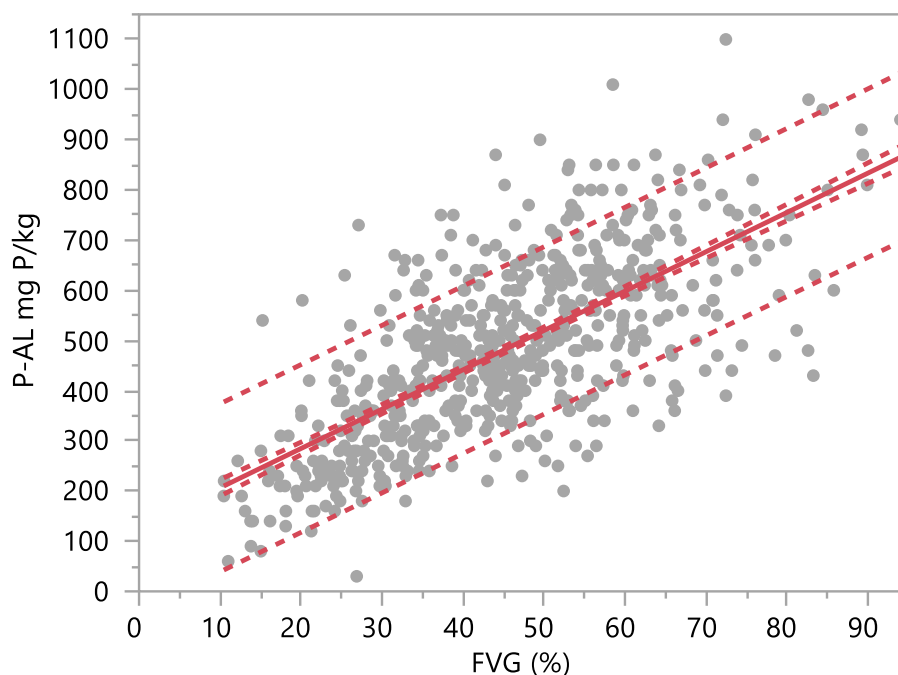
Figuur 105. Relatie tussen P-AL<sub>0-30cm</sub> en FVG<sub>0-90cm</sub> voor 246 bodems met brede range aan bodemeigenschappen en FVG tussen 10% en 40% (BDB)

In Tabel 84 zijn de waarden voor  $P-AL_{krit,0-30cm}$  afgeleid uit de analyse van de relaties in de dataset (alle data uitgezonderd de kalkrijke zandbodems, en de beperkte dataset). De gemiddelde waarde betreft de gemiddelde  $P-AL_{0-30cm}$  gerelateerd met 25% FVG. Daarnaast wordt ook het 95% betrouwbaarheidsinterval gegeven van deze gemiddelde waarde: met 95% zekerheid valt de gemiddelde  $P-AL_{0-30cm}$  gerelateerd met 25% FVG hier in.

Tabel 84. Gemiddelde  $P-AL_{0-30cm}$  in  $mg\ P\ kg^{-1}$  gerelateerd aan  $FVG_{0-90cm}$  van 25% afgeleid uit de verschillende relaties in de BDB-dataset, met 95% betrouwbaarheidsinterval voor dit gemiddelde, en het 80% betrouwbaarheidsinterval voor de individuele bodems

Relatie	$P-AL_{0-30cm}$ gemiddeld	95% BI gemiddelde	80% BI individuele bodems
Alle bodems	324	307 - 341	157 - 491
10%<FVG<40%	304	287 - 320	159 - 491

In het milieu moet echter niet alleen de gemiddelde bodem, maar het merendeel van de bodems en oppervlaktewaters beschermd worden. Daarom moet een betrouwbaarheidsinterval opgesteld worden voor de individuele bodems. Dit interval is veel breder dan deze voor de gemiddelde bodem, zoals in Figuur 106 en Tabel 84 weergegeven wordt. Dit bredere interval geeft het interval voor  $P-AL_{0-30cm}$  weer waarmee met 80% kans een individuele bodem met een FVG van 25% wordt teruggevonden. Er is 10% kans om een FVG van 25% te vinden bij een  $P-AL$  onder dit interval, en er is 10% kans een FVG van 25% te vinden bij een  $P-AL$  boven dit interval. Als we dus wensen dat 90% (=80%+10%) van de individuele bodems die beoordeeld worden op basis van  $P-AL_{0-30}$  een FVG heeft die beperkt is tot 25%, dan is de ondergrens van het 80% betrouwbaarheidsinterval voor de individuele bodems de geschikte milieugrens voor  $P-AL_{0-30}$ . Er bestaan geen normen of verplichte percentages voor bescherming voor milieurisico in Europa, maar veelal wordt gebruik gemaakt van het 90<sup>e</sup> percentiel van gemeten waarde (TGD, 2003). Deze ondergrens van het 80% betrouwbaarheidsinterval is 157  $mg\ P/kg$  voor de ganse dataset, en 159  $mg\ P/kg$  voor de dataset met 10%<FVG<40%.



Figuur 106. Lineaire fit tussen  $P-AL_{0-30cm}$  en  $FVG_{0-90cm}$  met 95% betrouwbaarheidsinterval van het gemiddelde (smalle band rond de fit) en 80% betrouwbaarheidsinterval van de individuele bodems (brede band met stippellijnen als grenzen)

Dezelfde analyse wordt gedaan voor de 580 bodems met grondwaterstand dieper dan 90 cm, dus exclusief de 25 stalen met ondiepere grondwaterstand. Bij deze analyse is de ondergrens van het 80% betrouwbaarheidsinterval voor individuele bodems 156 mg P/kg. Daarom wordt hier de afgeronde waarde van 160 mg P/kg naar voor geschoven als de milieugrens voor P-AL<sub>0-30cm</sub>. De grens van het eenzijdig 90% betrouwbaarheidsinterval (of ondergrens van het tweezijdig 80% betrouwbaarheidsinterval) van de inverse predictie van P-AL 160 mg P/kg geeft een FVG van 25% voor zowel de ganse dataset als voor de dataset met 10%<FVG<40%. Bijgevolg is de P-AL-waarde in de bovenlaag (0-30 cm) van de bodem waarbij er minder dan 10% kans is dat het bijhorende bodemprofiel (0-90 cm) meer dan 25% verzadigd is met fosfaat, 160 mg P/kg. Merk wel op dat de gemiddelde FVG die met deze P-AL-waarde gerelateerd is, veel lager is dan 25%: de FVG is maar 4,1% voor de fit met alle data (ligt buiten de dataset) en 12,8% voor de fit met 10%<FVG<40%. Beide waarden zijn dus veel lager dan 25%. Door het voorzorgsprincipe om het merendeel, en niet het gemiddelde, van de bodems te beschermen, zullen veel bodems 'te streng' beoordeeld worden op basis van de P-AL.

Let op dat de waarde van 160 mg P/kg enkel geldig is voor FVG bepaald tot 90 cm diepte. Indien echter de strikte definitie van FVG volgens van der Zee (1990a) wordt gevolgd, moet FVG bepaald worden tot de diepte waar de kritische orthofosforconcentratie niet overschreden mag worden, dit is de diepte van de grondwaterstand. De diepte van de grondwaterstand is variabel, maar aangezien het fosfor-, ijzer- en aluminiumgehalte veel minder variabel zijn, kan voor praktijkgebruik voor de gemiddelde hoogste grondwaterstand als referentiediepte gekozen worden, zoals in Nederland en zoals ook gesteld in het Besluit van de Vlaamse regering van 20 december 1995 ter uitvoering van het Mestdecreet.

In Vlaanderen is de gemiddelde hoogste grondwaterstand niet gekend per perceel. Een aanzienlijk deel van de percelen heeft met een gemiddelde hoogste grondwaterstand dieper en ondieper dan 90 cm, maar precieze informatie ontbreekt. Deze diepte zal ook voor elke bodem anders zijn. Conform het Decreet en haar uitvoeringsbesluiten wordt FVG daarom altijd tot 90 cm berekend (aanwijzingen van minder diepe grondwaterstand worden voor verdere interpretatie meegenomen). Bij gebrek aan bestaande gegevens over de GHG is geopteerd voor een diepte van 90 cm, hetgeen ook in 2007 als een goede benadering voor de GHG-stand werd beschouwd (Salomez *et al.*, 2007). Idealiter is recente gebiedsdekkende informatie beschikbaar van de grondwaterstand, maar dit is nu (nog) niet het geval. Sinds de vastlegging van de drainageklassen is immers zowel verdroging als vernatting mogelijk.

Strikt volgens de definitie van Van der Zee (1990a) zou de GHG per perceel moeten geëvalueerd worden voor de berekening van FVG. Net omdat Van der Zee (1990a) zich niet beperkte tot één diepte maar zich richtte op de GHG, inherent variabel tussen percelen, kan met een variabele GHG geen relatie worden afgeleid tussen de P-AL-waarde en FVG bepaald tot een bepaalde diepte. De consensus in de Vlaamse wetgeving omtrent de referentiediepte maakt het mogelijk om de P-AL-waarde af te leiden die gerelateerd is aan een FVG op een bepaalde diepte, in dit geval 90 cm.

Indien FVG over minder dan 90 cm bepaald zou worden, zal de gerelateerde P-AL<sub>krit,0-30cm</sub> kleiner zijn dan de waarde van 160 mg P/kg. Bij bepaling over meer dan 90 cm zal de gerelateerde P-AL<sub>krit,0-30cm</sub> groter zijn dan 160 mg P/kg. Dit laatste is niet mogelijk om te berekenen voor de beschikbare dataset, aangezien niet dieper dan 90 cm werd bemonsterd. Berekeningen over minder grote diepte zijn theoretisch wel mogelijk. Voor een diepte van 60 cm is P-AL<sub>krit,0-30cm</sub> bijvoorbeeld maar 113 mg P/kg. Er moet wel benadrukt worden dat deze theoretische berekening voor minstens 580 van de 605 bodems van deze dataset niet correct is wegens het niet voorkomen van dergelijke ondiepe grondwaterstand (zoals opgenomen in het analyseverslag). Er is echter geen voldoende grote dataset beschikbaar met FVG en P-AL van bodems met een ondiepe grondwaterstand, waarop deze afleiding voor 60 cm wel wetenschappelijk correct zou zijn. Bijkomend probleem is dat een dergelijke dataset niet alleen een ondiepe, maar bovendien een zelfde ondiepe grondwaterstand voor alle percelen zou moeten hebben.

In volgende deelwerkpakketten wordt verder gewerkt met de afgeleide kritische P-AL-waarde van 160 mg P/kg, gerelateerd aan een FVG gemeten tot 90 cm conform de huidige wetgeving. Door de

hoge FVG-waarden in de dataset voor de kalkrijke zandbodems (170%-243% met FBV van 8,5 mmol kg<sup>-1</sup> of 45%-81% met Vergelijking 4) en de lage FVG<sub>krit</sub> voor deze bodems (8%), is het niet mogelijk om een P-AL<sub>krit,0-30cm</sub> voor de kalkrijke zandbodems vast te stellen. Gezien het kleine areaal van deze bodems en de goede correlatie tussen FVG volgens Vergelijking 4 en P-uitloging uit de kolomproeven en literatuur voor een range aan bodemtypes, wordt de algemene P-AL<sub>krit,0-30cm</sub> waarde van 160 mg P kg<sup>-1</sup> voorgesteld voor alle bodems in Vlaanderen.

Indien er in de toekomst nieuwe inzichten ontstaan en nieuwe kritische FVG-waarden naar voor worden geschoven, kan met dezelfde correlatie een nieuwe kritische waarde voor P-AL<sub>0-30cm</sub> afgeleid worden. In luik 1 (DWP 1.4) werd vastgesteld dat P-AL/Fe-AL een betere voorspeller is van de uitlopende fosforconcentratie in bodemkolommen dan P-AL. Het is echter met de gekozen aanpak via de FVG niet mogelijk om een kritische milieugrens voor P-AL/Fe-AL af te leiden, omdat er geen databank voorhanden is waarbij zowel FVG als P-AL/Fe-AL gekend is.

## 15 DWP 2.4: BODEM-PLANT-MODEL

In DWP 2.1 werd een opbrengstcurve opgesteld, geldig voor akkerbouwgewassen in Vlaanderen (Figuur 101), en een kritische P-AL voor gewasopbrengst. In DWP 2.3 kon enkel een kritische P-AL voor uitloogverliezen (milieu) afgeleid worden. Het bodem-plant-model wordt daarom gereduceerd tot het afleiden van een streefzone voor P-AL. Deze ligt tussen 110 en 160 mg P/kg. De ondergrens wordt gevormd door de kritische P-AL voor gewassen. Bij 110 mg P/kg is er niet meer dan 5% kans op een gemiddelde gewasopbrengst van minder dan 95% relatieve opbrengst, bij lagere fosforbeschikbaarheid neemt de kans op substantiële opbrengstverliezen toe. Deze landbouwgrenswaarde is afgeleid voor een staalnamediepte van 23-25 cm. Bij 160 mg P/kg is er voor individuele bodems 90% kans op een fosfaatverzadigingsgraad van maximaal 25% (indien gemeten tot 90 cm diep), die gerelateerd is met een maximale uitloogconcentratie van 0,1 mg oP/l. Boven 160 mg P/kg worden de kansen op hogere milieuverliezen groter. Deze milieugrenswaarde is afgeleid voor een staalnamediepte van 30 cm.

In de streefzone worden de belangen van landbouw en milieu verenigd: zowel een goede gewasopbrengst als beperkte fosforverliezen. Idealiter bevinden alle Vlaamse percelen zich in deze streefzone. Dit is echter voor een groot deel niet het geval. In luik 3 worden bemestingsadviezen afgeleid om naar deze streefzone te evolueren.

Een streefzone voor grasland (weides) kon niet afgeleid worden. Hiervoor is bijkomend onderzoek nodig.

## 16 REFERENTIES LUIK 2

- Ashjaei, S., Tiessen, H., Schoenau, J.J., 2010. Correlations between phosphorus fractions and total leachate phosphorus from cattle manure- and swine manure-amended soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41, 1338-1349.
- Baert, L., Depuydt, S., De Smet, J., Hofman, G., Scheldeman, K., Vanderdeelen, J., Van Meirvenne, M., Lookman, R., Merckx, R., Schoeters, I., Vlassak, K., De Gryse, S., Hartmann, R., Seuntjes, P., Verplancke, H., Verschoore, P., 1997. Fosfaatverzadiging van zandige bodems in Vlaanderen. Meise.
- Barber, S.A., 1984. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Brookes, P.C., Heckrath, G., De Smet, J., Hofman, G., Vanderdeelen, J., 1997. Losses of phosphorus in drainage water. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C., Johnston, A.E. (Eds.), *Phosphorus loss from soil to water*. CAB International, Cambridge, pp. 253-271.
- Carstensen, A., 2017. A new way to diagnose P deficiency in plants. International Fertiliser Society. IFS, Cambridge.
- De Smet, J., Hofman, G., Vanderdeelen, J., Van Meirvenne, M., Baert, L., 1995. Fosfaatuitspoeling onder zandleembodems. *Agricontact*, pp. 1-6.
- Hartz, T.K., Johnstone, P.R., 2006. Relationship between soil phosphorus availability and phosphorus loss potential in runoff and drainage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37, 1525-1536.
- Kerre, B., Willaert, B., Cornelis, Y., Smolders, E., 2017. Long-term presence of charcoal increases maize yield in Belgium due to increased soil water availability. *European Journal of Agronomy* 91, 10-15.
- Leinweber, P., Meissner, R., Eckhardt, K.U., Seeger, J., 1999. Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *European Journal of Soil Science* 50, 413-424.
- Maguire, R.O., Sims, J.T., 2002. Soil testing to predict phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality* 31, 1601-1609.
- McDowell, R.W., 2012. Minimising phosphorus losses from the soil matrix. *Current Opinion in Biotechnology* 23, 860-865.
- McDowell, R.W., Sharpley, A.N., 2001a. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. *Journal of Environmental Quality* 30, 508-520.
- McDowell, R.W., Sharpley, A.N., 2001b. Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure application to intensively farmed land. *Science of the Total Environment* 278, 113-125.
- Nawara, S., 2018. PhD thesis: The availability of phosphorus in a soil depleting scenario. KU Leuven, Leuven.
- Nawara, S., van Dael, T., De Cooman, E., Elsen, A., Merckx, R., Smolders, E., Amery, F., 2018. Testing soil phosphorus in a depleting P scenario: an accelerated soil mining experiment. *European Journal of Soil Science* 69, 804-815.
- Nawara, S., Van Dael, T., Merckx, R., Amery, F., Elsen, A., Odeurs, W., Vandendriessche, H., McGrath, S., Roisin, C., Jouany, C., Pellerin, S., Denoroy, P., Eichler-Lobermann, B., Borjesson, G., Goos, P., Akkermans, W., Smolders, E., 2017. A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe. *European Journal of Soil Science* 68, 873-885.
- Reuter, D.J., Robinson, J.B., 1997. *Plant Analysis, an Interpretation Manual*. CSIRO Publishing, Melbourne & Sydney.
- Salomez, J., De Bolle, S., Hofman, G., De Neve, S., 2007. Afbakening van de fosfaatverzadigde gebieden in Vlaanderen op basis van een kritische fosfaatverzadigingsgraad van 35% - deel 1b: protocolevaluatie.
- Schoumans, O.F., 2014. Description of the phosphorus sorption and desorption processes in coarse calcareous sandy soils. *Soil Science* 179, 221-229.
- Schoumans, O.F., Bouraoui, F., Kabbe, C., Oenema, O., van Dijk, K.C., 2015. Phosphorus management in Europe in a changing world. *Ambio* 44, S180-S192.
- Schoumans, O.F., Chardon, W.J., 2015. Phosphate saturation degree and accumulation of phosphate in various soil types in The Netherlands. *Geoderma* 237-238, 325-335.
- Schroeder, P.D., Radcliffe, D.E., Cabrera, M.L., Belew, C.D., 2004. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus in runoff: Effects of soil series variability. *Journal of Environmental Quality* 33, 1452-1463.
- Sharpley, A., Tunney, H., 2000. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century. *Journal of Environmental Quality* 29, 176-181.
- Smith, K.A., Chalmers, A.G., Chambers, B.J., Christie, P., 1998. Organic manure phosphorus accumulation, mobility and management. *Soil Use and Management* 14, 154-159.
- TGD, 2003. Technical Guidance Document on Risk Assessment in support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substances Commission Regulation (EC) No 1488/94 on Risk Assessment for existing substances Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market Part II. p. 337.
- Tits, M., Elsen, A., Deckers, S., Boon, W., Bries, J., Vandendriessche, H., 2016. Bodemvruchtbaarheid van de akkerbouw- en weilandpercelen in België en Noordelijk Frankrijk (2012-2015). Bodemkundige Dienst van België.
- Tunney, H., Daly, K., Kurz, I., 2002. Phosphorus loss from grassland soils to water. WCSS.
- van der Zee, S.E.A.T.M., van Riemsdijk, W.H., de Haan, F.A.M., 1990a. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel I: Toelichting. Wageningen.
- van der Zee, S.E.A.T.M., van Riemsdijk, W.H., de Haan, F.A.M., 1990b. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel II: Technische uitwerking. Wageningen.
- Vanden Nest, T., Ruyschaert, G., Vandecasteele, B., Cougnon, M., Merckx, R., Reheul, D., 2015. P availability and P leaching after reducing the mineral P fertilization and the use of digestate products as new organic fertilizers in a 4-year field trial with high P status. *Agriculture Ecosystems & Environment* 202, 56-67.
- Yamaguchi, J., Tanaka, A., 1990. Quantitative observation on the root-system of various crops growing in the field. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36, 483-493.





## 17 LUIK 3

In luik 3 wordt eerst een literatuurstudie uitgevoerd naar het gedrag van fosfor in de bodem, meer bepaald rond fosforbuffercapaciteit en fixatie van fosfor in de tijd (DWP 3.1). In DWP 3.2 wordt specifiek ingegaan op de geselecteerde test P-AL: hoe verandert die in de tijd en met de fosforbodembalans, welke factoren beïnvloeden de buffercapaciteit en fixatie? Dit leidt tot bemestingsadviezen op lange termijn, voor het evolueren naar of het blijven in de streefzone (afgeleid in luik 2). Op bemestingsadviezen op korte termijn wordt ingegaan in DWP 3.3. Het belang van fosfor aanwezig in diepere lagen dan de routinematig bemonsterde toplaag wordt besproken in DWP 3.4. In DWP 3.5 worden de verschillen tussen erosie- en uitlogingsverliezen en het belang ervan in Vlaanderen toegelicht. Ten slotte wordt in DWP 3.6 ingegaan op bemestings- en managementtechnieken voor bodemfosfor en fosforbemesting. In een literatuurstudie worden onder andere bemestingstijdstip, rijenbemesting, bodem-pH, fosforvastlegging en verschillende vormen van fosforbemesting besproken.

## 18 DWP 3.1: LITERATUURSTUDIE FOSFORGEDRAG IN DE BODEM

Er werd een literatuurstudie uitgevoerd over het gedrag van fosfor in de bodem, meer bepaald over de fosforbuffercapaciteit en fosforfixatie in de bodem (zie bijlage 3). Op het eind (hoofdstuk 5) wordt ingegaan op evolutie van de in luik 1 geselecteerde P-test P-AL (en P-CaCl<sub>2</sub>) in de tijd. Van deze referenties worden data gebruikt voor de ontwikkeling van een model voor evolutie van P-AL in DWP 3.2.

## 19 DWP 3.2: OPSTELLEN VAN FOSFORBEMESTINGSADVIES VOOR HET BEREIKEN VAN DE STREEFZONE

### 19.1 ALGEMEEN

In Luik 2, DWP 2.4 werd een streefzone afgeleid waarin landbouw en milieu elkaar vinden. Idealiter evolueren alle bodems in Vlaanderen naar deze zone. Om te weten welke bodemfosforbalans (P-input door bemesting verminderd met de P-export door gewasafvoer) nodig is om van een gegeven startwaarde voor P-AL naar de streefzone te evolueren, werden labo- en serreproeven opgezet met verschillende fosforbalansen waarin de invloed van verschillende bodemkarakteristieken op de fosfordynamiek werd onderzocht (19.2). Vervolgens werden de veranderingen in P-AL bij verschillende positieve en negatieve fosforbodembalansen in veldproeven onderzocht (19.3). Daarbij is niet alleen de grootte van de verandering per aangelegde fosforbalans belangrijk, maar ook hoe deze verschilt tussen bodems en bodemeigenschappen. Bij significante verschillen in fosforbuffercapaciteit (beperking van de verandering in P-AL bij een aangelegde fosforbalans) is het van belang na te gaan door welke bodemeigenschappen deze bepaald wordt, aangezien het weinig realistisch is om deze voor elke bodem apart te meten (zie literatuurstudie 3.1).

In luik 2 werden ook veldproeven uitgevoerd, waarvan enkele meerdere jaren (maximaal 3) op dezelfde locatie werden aangehouden. Door de beperkte tijdsduur werd echter nooit een verandering in P-AL waargenomen, deze proeven zijn bijgevolg niet meegenomen.

Belangrijk om op te merken is, dat het fosforbemestingsadvies dat hier ontwikkeld wordt, een advies is voor de bodem, en niet zozeer voor de plant. In het jaar van bemesting neemt de plant immers maar zo'n 10% van de toegepaste fosfor op. De overige 90% vult de bodemvoorraad aan. De plant neemt het grootste deel van zijn fosforopname op uit de bodemfosfor. Deze bodemvoorraad bepaalt dus grotendeels de opbrengst. Daarom is het belangrijk om fosforbemestingsadvies op lange termijn voor de bodem en niet voor de plant te bepalen.

Enkele termen die in deze delen worden gebruikt:

- Cumulatieve bodemfosforbalans: totale P-input door bemesting op de bodem, verminderd met de totale P-export door gewasafvoer. Uitgedrukt in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (of in mg/kg in labo-experimenten)
- Jaarlijkse bodemfosforbalans: cumulatieve bodemfosforbalans gedeeld door het aantal jaar waarover deze balans werd toegepast. Uitgedrukt in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jr
- P-AL<sub>ini</sub>: initiële P-AL (mg P/kg)
- P-AL<sub>fin</sub>: finale P-AL (mg P/kg)
- ΔP-AL: verandering in P-AL: P-AL<sub>fin</sub> – P-AL<sub>ini</sub> (mg P/kg)

### 19.2 LABO- EN SERREPROEVEN

#### 19.2.1 Veranderingen in P-AL voor acht Vlaamse bodems in serre en labo

##### 19.2.1.1 Inleiding

Acht Vlaamse bodems werden onderworpen aan drie verschillende fosforbalansen, opgelegd in serre en labo. Hierbij wordt nagegaan welke parameters belangrijk zijn voor de verandering in P-AL, waargenomen bij deze acht bodems.

## 19.2.1.2 Materiaal en methoden

### 19.2.1.2.1 Drie balansen

Acht Vlaamse bodems (Tabel 85) kregen drie verschillende fosforbalansen opgelegd: uitmijning, licht positieve bodembalans en zwaar positieve bodembalans. De eerste twee balansen zijn deel van de serreproef in luik 1. In de uitmijningsbehandeling werd geen fosfor toegevoegd, maar wel bijna twee jaar fosfor onttrokken door middel van grasgroei en –afvoer (-P behandeling). Bij de licht positieve bodembalans was er ook fosforafvoer via het gras, maar deze werd (licht over-) gecompenseerd via toediening van fosfor aan de bodem (+P behandeling).

Tabel 85. Bodemeigenschappen van de acht Vlaamse bodems gebruikt in de serreproef en voor een overbestedingsproef

Bodemnr	P-AL <sub>ini</sub> (mg/kg)	pH	%OC	textuur
1	310	5,9	1,2	Lichte leem
2	280	6,6	1,3	Zandleem
3	120	6,2	1,2	Zandleem
4	150	5,6	3,0	Fijn zand
5	200	4,7	1,2	Zand
6	110	5,3	1,7	Fijn zand
7	120	7,2	1,0	Leem
8	150	6,1	3,4	Leem

### 19.2.1.2.2 Derde balans: overbesteding

De derde fosforbalans, overbesteding, werd uitgevoerd in het labo. De initiële niet-bemeste bodems van de serreproef werden onderworpen aan twee behandelingen: één met P-overbesteding (+P) en één controle (zonder P-toevoeging, -P). Elke behandeling werd uitgevoerd in tweevoud. De beoogde P-dosis komt overeen met de gemiddelde cumulatieve P-toediening aan de +N+P behandeling (evenwichtsbesteding) tijdens de serreproef met de Vlaamse landbouwbodems (deelwerkpakket 1.3). De recovery werd berekend als

$$\text{recovery (\%)} = \frac{(P \text{ in bodem met } P \text{ toevoeging} - P \text{ in bodem zonder } P \text{ toevoeging})}{P \text{ spike}} * 100$$

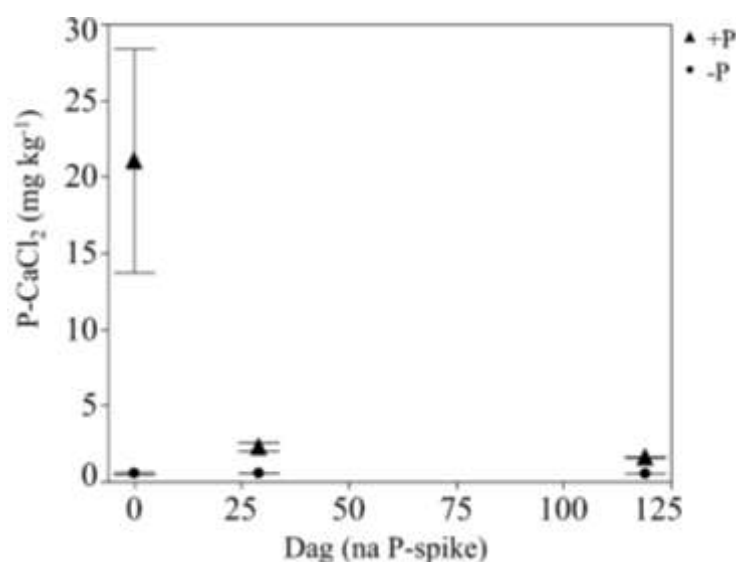
Per herhaling werd 500 g luchtdroge bodem afgewogen en bevochtigd tot 75% van de veldcapaciteit in afgesloten potten. Na één week incuberen op 20°C werden de bodems bevochtigd tot 95% van de veldcapaciteit, tegelijkertijd werd P toegevoegd als een oplossing KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (7.2 mg P mL<sup>-1</sup>) aan de +P-behandeling, de –P-behandeling werd op dezelfde manier gemengd met evenveel water en geroerd. Deze dag is de start van het experiment (dag 0). Na enkele dagen werden anaerobe condities waargenomen in de potten van bodem 8, Daarom werd het vochtgehalte verlaagd naar ongeveer 65% van de veldcapaciteit door verdampen. De massa van de bodems werd meermaals gedurende het experiment gewogen en indien nodig werd er gecorrigeerd voor verdamping door te bevochtigen.

Bodemstalen van beide behandelingen werden genomen op dag 0, 29 en 119 en geanalyseerd voor beschikbaar P met de AL- en de CaCl<sub>2</sub>-extractie (een Q-test en een I-test). Op dag 196 werd nogmaals een staal genomen, en een substaal van de bodem werd onderworpen aan een nat-droog cyclus (drogen – bevochtigen – drogen; het drogen werd uitgevoerd bij 25°C in een plantengroei-kamer) om na te gaan of dit een invloed heeft op de P-fixatie. Deze laatste stalen werden enkel geanalyseerd met de AL-extractie.

### 19.2.1.3 Resultaten overbestedingsproef

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

De evolutie van het beschikbaar P-gehalte gemeten met de CaCl<sub>2</sub>-extractie wordt ter illustratie weergegeven voor bodem 4 in Figuur 107. Het P-gehalte van de controlebehandeling is constant in de tijd, terwijl het P-gehalte van de +P-behandeling daalt in de tijd. De initiële P-dosis wordt op dag 0 gemiddeld over alle bodems voor slechts 33% teruggevonden in het CaCl<sub>2</sub>-extract (= recovery P-spike). Op dag 119 is dit gemiddeld gedaald tot 5% (Tabel 86). Deze resultaten zijn te verwachten aangezien er een onmiddellijke sorptie van P op de bodempartikels plaatsvindt en het geëxtraheerde P-CaCl<sub>2</sub> een maat is voor P in de bodemoplossing.



Figuur 107. Verandering van P-CaCl<sub>2</sub> in functie van de tijd voor de P-overbesteding (P-spike) en de controlebehandeling (vb. bodem 4). Foutenbalken geven de standaarddeviatie weer.

Tabel 86. Recovery\* van de P-dosis ± standaarddeviatie opgemeten in het CaCl<sub>2</sub>-extract van de behandeling met P-toevoeging (P-spike) voor de verschillende staalnametijdstippen na bemesting.

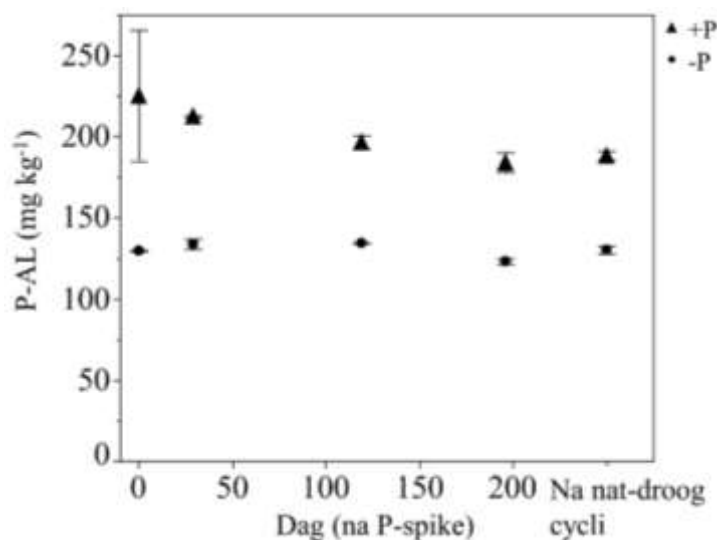
Recovery P-spike in CaCl <sub>2</sub> extract			
/ %			
Bodem	Dag 0	Dag 29	Dag 119
1	53 ± 7	13,5 ± 0,1	8,7 ± 0,1
2	45 ± 1	11,3 ± 0,3	3,0 ± 0,1
3	37 ± 11	4,2 ± 2,7	3,5 ± 0,1
4	14 ± 5	1,2 ± 0,2	0,7 ± 0,1
5	43 ± 8	11,7 ± 0,6	9,2 ± 0,1
6	30 ± 2	8,0 ± 0,1	4,9 ± 0,1
7	32 ± 4	9,4 ± 1,2	6,8 ± 0,1
8	8 ± 1	2,9 ± 0,8	2,2 ± 0,5

\*% van de P-additie (147 mg kg<sup>-1</sup>) gemeten in de bodemtest van de +P bodem na correctie voor dat van de -P bodem

#### P-AL

De evolutie van het beschikbaar P-gehalte gemeten met de AL-extractie wordt ter illustratie weergegeven voor bodem 4 in Figuur 108. Het P-gehalte van de controlebehandeling blijft constant

in de tijd, terwijl het P-gehalte in de behandeling met P-toevoeging een dalende trend vertoont. Dit wordt ook kwantitatief weergegeven in Tabel 87. De initiële P-dosis wordt op dag 0 gemiddeld over alle bodems voor slechts 80% teruggevonden in het AL-extract. Op dag 167 is dit gemiddelde gedaald tot 57%. De P-gehalten in de +P-behandeling op dag 196 zijn significant lager dan de P-gehalten op dag 29 (dag 0 niet genomen als referentie wegens niet homogene menging initieel). Voor vier van de acht bodems is het P-gehalte opgemeten na de nat-droog cycli groter ( $p < 0,05$ ) dan op dag 196, dit zowel in de +P-behandeling als in de controlebehandeling. Dit is tegen de verwachtingen in, aangezien er werd verondersteld dat drogen van de bodem fixatie zou bevorderen.



Figuur 108. Verandering van P-AL in functie van de tijd voor de P-overbemesting (P-spike) en de controlebehandeling (vb. bodem 4). Foutenbalken geven de standaarddeviatie weer.

Tabel 87. Recovery<sup>§</sup> van de P-dosis  $\pm$  standaarddeviatie opgemeten in het AL-extract van de behandeling met P-toevoeging (P-spike) voor de verschillende staalnametijdstippen. \* = P-gehalte in de behandeling met P-toevoeging is op dag 196 significant lager dan op dag 29. Voor bodem 3 op dag 119 en bodem 2 op dag 196 werd slechts 1 replica mee opgenomen in de tabel omdat het verschil tussen de behandeling met toevoeging en de controle hier een negatieve waarde gaf.

Recovery P-spike in AL extract / %					
Bodem	Dag 0	Dag 29	Dag 119	Dag 196	Na nat droog cycli
1	76 $\pm$ 25	80 $\pm$ 3	77 $\pm$ 4	70 $\pm$ 3*	71 $\pm$ 5
2	100 $\pm$ 8	82 $\pm$ 31	79 $\pm$ 7	64	86 $\pm$ 5
3	69 $\pm$ 10	56 $\pm$ 6	52	44 $\pm$ 5*	47 $\pm$ 3
4	65 $\pm$ 28	54 $\pm$ 3	42 $\pm$ 3	41 $\pm$ 5*	40 $\pm$ 1
5	89 $\pm$ 12	84 $\pm$ 5	71 $\pm$ 5	59 $\pm$ 4*	74 $\pm$ 6
6	79 $\pm$ 19	62 $\pm$ 2	50 $\pm$ 1	45 $\pm$ 1*	54 $\pm$ 2
7	74 $\pm$ 33	88 $\pm$ 3	76 $\pm$ 0	74 $\pm$ 2*	76 $\pm$ 4
8	89 $\pm$ 4	67 $\pm$ 5	63 $\pm$ 6	60 $\pm$ 1*	66 $\pm$ 3

<sup>§</sup>% van de P-dosis (147 mg kg<sup>-1</sup>) gemeten in de bodemtest van de +P bodem na correctie voor dat van de -P bodem

Tabel 88. De recovery van de P-spike met AL-extractie daalt bij een langere contacttijd tussen de bodem en de P-spike. \* = recovery is statistisch significant lager ( $p < 0,05$ ) dan deze van de P-spike.

	Vorbereiding	In centrifugebuisje	Schudden (u)	Meting	Recovery $\pm$ standaarddeviatie / %
<b>A</b>	Mengen van bodem met <b>P-spike</b> en water (cf. P-overbemestingsproef)	Bodemstaal + extractieoplossing	4	Supernatans	78 $\pm$ 6 *
<b>B</b>		Bodemstaal + extractieoplossing + <b>P-spike</b>	4	Supernatans	86 $\pm$ 4 *
<b>C</b>		Bodemstaal + extractieoplossing	2 + <b>P-spike</b> + 2	Supernatans	89 $\pm$ 5 *
<b>D</b>		Bodemstaal + extractieoplossing	4	Supernatans + <b>P-spike</b>	94 $\pm$ 3
<b>E</b>				<b>P-spike</b> in AL extractie oplossing	100 $\pm$ 3



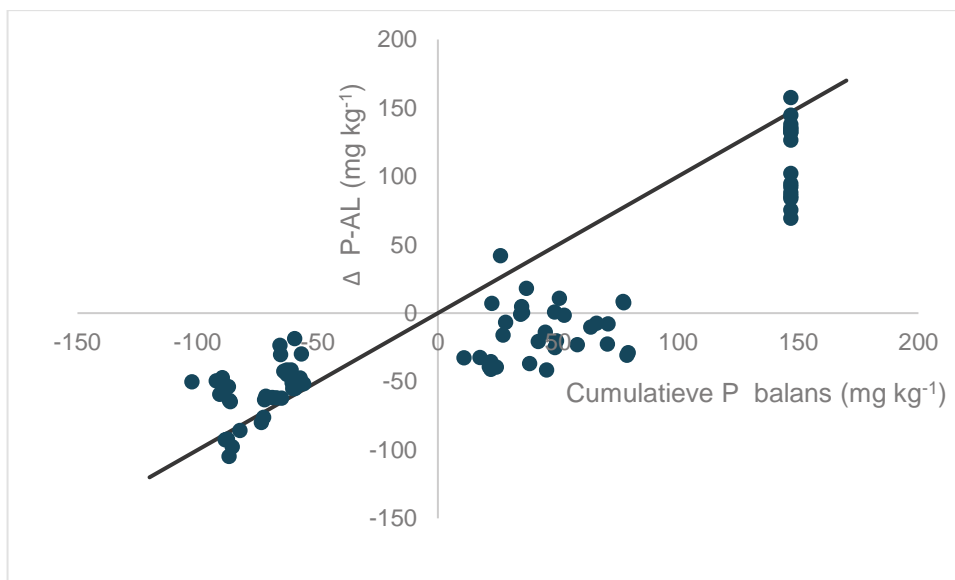
#### 19.2.1.4 Aanvullende testen: recovery van P-bemesting op korte termijn

De onvolledige recovery van de overbemesting met de P-AL-extractie (tabel en figuren hierboven) werd in detail onderzocht. Om na te gaan of het verlies in P-AL bij de evenwichtsbemesting en overbemesting niet te wijten is aan een analytische fout werd een extra experiment opgezet waarbij de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ -bemesting (verder *P-spike* genoemd) werd toegevoegd op verschillende momenten voor de finale meting met ICP. Naast de referentiemethode van de overbemestingsproef, werd de P-spike toegevoegd net voor de extractie of tijdens verschillende stappen van de extractie zelf (Tabel 88). Ter controle werd ook één bodem geanalyseerd zonder toevoeging van P. De recovery van de P-spike toont aan dat hoe langer de contacttijd tussen de bodem en de P-spike, hoe lager de recovery is.

Bij toevoegen van fosfor aan de bodem treedt er een onmiddellijke fixatie op van P in een fractie die slechts deels extraheerbaar is met de AL-extractie. Uit verder onderzoek blijkt dat de hoeveelheid P die fixeert en niet meer extraheerbaar is met de AL-methode stijgt in functie van de contacttijd tussen de P-spike en de bodem.

#### 19.2.1.5 Veranderingen in P-AL bij de drie bodembalansen

De veranderingen van P-AL voor de acht bodems in functie van de opgelegde cumulatieve balans zijn weergegeven in Figuur 109. Eerst en vooral valt het op dat van de meeste punten niet alle P die werd toegevoegd werd teruggevonden in, en niet alle P die werd onttrokken was verdwenen uit de P-AL-fractie. Aangezien dit geen analytische fout is (zie 19.2.1.4) kan geconcludeerd worden dat een deel van de toegevoegde fosfor onmiddellijk 'verdwijnt' bij contact met de bodem. Deze P wordt dus door de bodem vastgehouden die niet terug in oplossing kan gebracht worden via extractie met ammoniumlactaat. Uit de grafiek is ook duidelijk dat een licht positieve balans nodig is om P-AL constant te houden. Het gewas (in dit geval gras) kan echter ook P opnemen en afvoeren uit een P-pool die niet gemeten wordt met P-AL, waardoor P-AL minder daalt dan op basis van de balans aangenomen zou worden.



Figuur 109. Veranderingen in P-AL van de 8 Vlaamse bodems bij verschillende cumulatieve P-balans (twee herhalingen per aangelegde balans). De zwarte lijn stelt de 1:1-lijn voor.

De cumulatieve P-balans kan de verandering in P-AL reeds voor 78% verklaren. Hoe hoger de bemestingsdosis, hoe meer P-AL toeneemt, en hoe meer uitmijning, hoe meer P-AL afneemt. Vervolgens werd een multiple lineaire regressie uitgevoerd op  $\Delta\text{P-AL}$ , met inbegrip van alle bodemeigenschappen (inclusief som Fe + Al),  $\text{P-AL}_{\text{ini}}$ ,  $\text{P-Ox}_{\text{ini}}$ ,  $\text{P-CaCl}_2_{\text{ini}}$  en verhoudingen van de P-metingen om de invloed van de fosforbuffercapaciteit op  $\Delta\text{P-AL}$  na te gaan. Het uiteindelijke model (na stapsgewijs weglaten van alle niet-significante termen) kon 86% van de variantie verklaren. Naast de cumulatieve balans bleek ook het effect van het Fe-gehalte (negatief),  $\text{P-Ox}_{\text{ini}}/\text{P-AL}_{\text{ini}}$  (positief) en

de interactieterm tussen Fe-gehalte en de cumulatieve balans (negatief) significant. Dit wil zeggen dat een hoog ijzergehalte zorgt voor meer fixatie van de reeds aanwezige fosfor in de P-AL-fractie. Zo wordt gemodelleerd dat het verschil in fixatie tussen de bodem met het laagste (370 mg/kg) en het hoogste Fe-Ox-gehalte (11120 mg/kg) 70 mg P/kg bedraagt. Daarnaast zorgt een hoger ijzergehalte ook voor minder grote veranderingen in P-AL bij toevoegen of afvoer van P (=buffering). Dit kan verklaard worden door progressieve vastlegging van P op en in ijzer(hydr)oxides in de bodem. Zo zal een toevoeging van 100 mg P/kg bodem een toename van 87 mg P/kg geven bij de bodem met het laagste Fe-gehalte, en slechts een toename van 38 mg P/kg bij de bodem met het hoogste Fe-gehalte. Geen enkele andere parameter toonde een buffereffect. Een hogere P-Ox<sub>ini</sub>/P-AL<sub>ini</sub> verhouding zorgt ervoor dat er minder fixatie is van de reeds aanwezige fosfor in de P-AL-fractie. Wellicht zijn er minder fixatieplaatsen beschikbaar bij een hogere P-Ox voor eenzelfde P-AL. Zo wordt het verschil in fixatie tussen de bodem met de laagste (1,6) en de hoogste P-Ox/P-AL<sub>ini</sub> (6,7) gemodelleerd op 58 mg P/kg. Er werd geen significant effect van P-AL<sub>ini</sub> alleen of in interactie met de cumulatieve balans (buffering) gevonden, terwijl in de literatuur (DWP 3.1) wel vaak wordt teruggevonden dat de fosforbuffercapaciteit daalt bij hoger fosforgehalte.

## 19.2.2 Invloed van begin-P-AL op veranderingen in P-AL

### 19.2.2.1 Inleiding

Uit de literatuurstudie (DWP 3.1) bleek dat er soms invloeden van de startwaarde voor fosforbeschikbaarheid op de verandering in fosforbeschikbaarheid geobserveerd worden. In het serre- en labo-experiment met de 8 Vlaamse bodems (19.2.1) werd geen invloed van P-AL<sub>ini</sub> op  $\Delta$ P-AL waargenomen. Dit was wel het geval voor de verhouding P-Ox<sub>ini</sub>/P-AL<sub>ini</sub>, maar enkel op het intercept en niet in interactie met de cumulatieve balans (=buffering). In een bijkomend labo-experiment wordt de invloed van P-AL<sub>ini</sub> op  $\Delta$ P-AL bij fosforbemesting nagegaan voor eenzelfde bodem met drie verschillende niveaus van P-AL<sub>ini</sub>. Het voordeel van deze benadering is dat alle andere bodemeigenschappen dezelfde zijn, en dat enkel P-AL<sub>ini</sub> verschilt.

### 19.2.2.2 Materiaal en methoden

In Gembloux loopt een fosforbemestingsproef reeds gedurende 51 jaar. Er werden bodemstalen genomen van de toplaag (0-25 cm) van drie verschillende behandelingen: P0 (geen fosforbemesting), P1 (evenwichtsfosforbemesting, bemesting = afvoer) en P2 (positieve cumulatieve bodembalans van 1093 kg P/ha). De bodemstalen zijn een mengstaal van 3 herhalingen van elke behandeling. De stalen kregen twee behandelingen, telkens in tweevoud uitgevoerd: wel en geen fosfortoevoeging van 100 mg P/kg bodem. Beide behandelingen werden gedurende 119 dagen bij 21°C geïncubeerd, waarna P-AL gemeten werd.  $\Delta$ P-AL wordt hier berekend als het verschil in P-AL tussen de behandeling met en zonder P-toevoeging in het labo.

### 19.2.2.3 Resultaten

Slechts iets meer dan de helft van de toegediende P-dosis werd teruggevonden als  $\Delta$ P-AL (Tabel 89). Er waren geen significante verschillen in  $\Delta$ P-AL tussen de verschillende niveaus van P-AL<sub>ini</sub>. Er werd dus niet meer of minder P teruggevonden in de P-AL-fractie na bemesting, naargelang het initiële P-AL-niveau.

Tabel 89. Gemiddelde P-AL<sub>ini</sub> en  $\Delta$ P-AL van de bodemstalen van Gembloux die bemest werden met 100 mg P/kg in het labo (twee herhalingen)

P-veldproefbehandeling	P-AL <sub>ini</sub> (mg P/kg)	$\Delta$ P-AL (mg P/kg)
P0	35	57 (0,5)
P1	92	51 (10)
P2	159	54 (4)

### 19.2.3 Invloed van organische stof en pH op veranderingen in P-AL

#### 19.2.3.1 Inleiding

In de literatuurstudie van DWP 3.1 werden grotendeels geen effecten van organische stof en pH op de buffercapaciteit waargenomen (zie bijlage 3), al werden wel enkele uitzonderingen genoteerd. Er werden echter geen waarnemingen voor veranderingen van de fosformeting P-AL gedaan, daarom werden specifieke labotesten opgezet. Daarbij wordt de invloed van pH en koolstofgehalte op  $\Delta$ P-AL bij fosforbemesting nagegaan voor eenzelfde bodem die door verschillende behandelingen in stikstofbemesting verschillende bodem-pH creëerde, en door het al dan niet laten liggen van maaisel, verschillen in organisch stofgehalte. Het voordeel van deze benadering is dat de meeste andere bodemeigenschappen dezelfde zijn, en dat enkel pH of organisch stofgehalte verschilt.

#### 19.2.3.2 Materiaal en methoden

In Melle liep van 2001 tot 2011 een veldproef op grasland ("Linde3") met verschillende behandelingen in stikstofbemesting, maaifrequentie en het al dan niet laten liggen van afgemaaid gras (Denef *et al.*, 2009). Door deze verschillende behandelingen werden verschillen in pH en organisch koolstofgehalte gecreëerd binnen eenzelfde perceel. Er werden twee stalen geselecteerd met gelijk organisch koolstofgehalte (1,35%) maar verschillende pH (3,7 versus 4,8) en twee stalen met gelijke pH (3,8) maar verschillend organisch stofgehalte (1,14% versus 1,52%).

De stalen kregen twee behandelingen, telkens in tweevoud uitgevoerd: wel en geen fosfortoevoeging van 100 mg P/kg bodem. Beide behandelingen werden gedurende 119 dagen bij 21°C geïncubeerd, waarna P-AL gemeten werd.  $\Delta$ P-AL wordt hier berekend als het verschil in P-AL tussen de behandeling met en zonder P-toevoeging in het labo.

#### 19.2.3.3 Resultaten

Gemiddeld werd 60-70% van de toegediende P-dosis teruggevonden na 119 dagen in de P-AL-fractie (Tabel 90). Er was geen significant verschil in  $\Delta$ P-AL tussen de stalen met dezelfde %OC maar verschillende pH, of tussen de stalen met dezelfde pH maar verschillend %OC. In deze proef werd dus geen significant effect van pH en %OC op de verandering in P-AL bij bemesting waargenomen. Wel was de standaarddeviatie van staal 2 groot, waardoor eventuele verschillen mogelijk niet significant zijn. In de analyse van de 8 bodems werd echter ook geen effect van pH op de verandering van P-AL in de serre en labo waargenomen (19.2.1). Het effect van pH op de verandering van P-AL in veldomstandigheden wordt verder nog nagegaan (19.3).

Tabel 90. Gemiddelde  $\Delta$ P-AL van de bodemstalen van Linde3 die bemest werden met 100 mg P/kg in het labo (twee herhalingen)

Staalnummer	pH-KCl	%OC	$\Delta$ P-AL (mg P/kg)
1	4,8	1,35	71 (1)
2	3,7	1,35	60 (10)
3	3,8	1,14	68 (1)
4	3,8	1,52	67 (4)

## 19.3 VELDPROEVEN

### 19.3.1 Benodigde informatie

Om realistische voorspellingen voor veldsituaties te kunnen doen, is het nodig om P-AL-veranderingen in langetermijn veldstudies te bestuderen. Daarom werd gezocht in literatuur, eigen veldproeven (ILVO en BDB) en veldproeven van andere onderzoeksinstituten waarbij we gebruik

mogen maken van de beschikbare gegevens (zie hieronder voor meer details). Volgende data moeten minimaal beschikbaar zijn om de veldproefgegevens te kunnen opnemen in de analyse:

- Begin- en eindwaarde van P-AL. Het is belangrijk dat de bodemstaalnames voor de eindmeting op hetzelfde veld of subplot worden uitgevoerd als voor de beginmeting. In de literatuurgegevens moesten P-AL-waarden soms afgelezen worden van grafieken, wat kan resulteren in mogelijk kleine variaties met de reële waarden.
- Tijdsduur van het veldexperiment (tussen de begin- en eindmeting van P-AL)
- Fosforbodembalans tussen de begin- en eindmeting van P-AL. Dit is de fosforbemesting min de fosforafvoer door het gewas. Meestal zijn fosforafvoergegevens beschikbaar. Indien niet, wordt gewerkt met fosforafvoergegevens van een behandeling waar deze wel van beschikbaar zijn of van een voorgaand jaar met dezelfde teelt. Indien deze ook niet beschikbaar zijn, wordt gebruik gemaakt van fosforafvoercijfers zoals gebruikt voor MAP5 of van algemene fosforgehaltes (Ehlert *et al.*, 2009).
- Bodemeigenschappen indien beschikbaar: pH, textuur, %OC, %klei, Fe- en Al-gehalte: kunnen gelinkt worden aan buffereigenschappen

Meer details hiervan zijn per veldproef (in totaal 33 veldproeven) hieronder weergegeven. In totaal zijn er door de verschillende behandelingen en soms ook herhalingen 265 datapunten beschikbaar. In de omschrijving van de veldproeven hieronder worden P-AL-waarden gewaardeerd volgens de huidige klasse-indeling van BDB (Tits *et al.*, 2016).

#### **19.3.1.1 Literatuur: Nederlandse maaiproeven (Aarts *et al.*, 2008)**

Tussen 1994 en 2003 lagen veldproeven op 4 Nederlandse locaties (jonge zeeklei, zand, rivierklei en veen) met een zeer lage tot streefwaarde P-AL. Gedurende 5 jaar lagen 5 P-trappen (balans van -17 tot +17 kg P/ha/jr) aan op grasland dat gemaaid werd (Aarts *et al.*, 2008).

#### **19.3.1.2 Literatuur: fosfaatfixerend kleigrasland (Aarts *et al.*, 2008)**

Gedurende 4 jaar kregen drie percelen met fosfaatfixerende klei (P-AL (zeer) laag) in Nederland twee verschillende positieve P-balansen: onder en boven het P-bemestingsadvies voor grasland (Aarts *et al.*, 2008).

#### **19.3.1.3 Literatuur: beweidingsproeven op 4 locaties**

Gedurende 15-17 jaar werden op 4 locaties in Nederland (twee keer zand, jonge zeeklei en veen) met tamelijk lage tot streefzone P-AL-waarden, 3 P-trappen (van evenwichtsbemesting tot +19 kg P/ha/jr) aangelegd onder beweidingscondities (van Middelkoop, 2007; Aarts *et al.*, 2008; van Middelkoop *et al.*, 2016; van der Salm *et al.*, 2017). Bijkomend werd op de 4 locaties ook gedurende 5 jaar uitmijning opgevolgd (van der Salm *et al.*, 2009).

#### **19.3.1.4 Literatuur: sanering fosforrijke zandgrond (Reijneveld *et al.*, 2003)**

Op een zeer fosforrijke zandgrond in Nederland werden gedurende 8 jaar 3 verschillende negatieve P-balansen opgelegd in een rotatie met gras, maïs en bieten (Reijneveld *et al.*, 2003).

#### **19.3.1.5 Literatuur: langdurige P-trappenproef in Nederland (van Wijk *et al.*, 2013)**

Gedurende 24 jaar werden op een zandbodem met streefwaarde P-AL in Nederland 4 P-trappen aangelegd, van negatieve tot zwaar positieve P-balans (Alblas and van der Schoot, 2000; Ehlert *et al.*, 2003; van Wijk *et al.*, 2013). Er lag een rotatie aan met aardappelen, suikerbieten, granen en groenten. De proefvlakken werden later nog opgesplitst zodat nog andere P-balansen (voornamelijk 7 jaar uitmijning) met verschillende startwaarden voor P-AL aanlagen (van Wijk *et al.*, 2013).

#### **19.3.1.6 Literatuur: Langetermijnproeven in Zweden (Djodjic et al., 2005)**

Gedurende 21-26 jaar liepen langetermijnfosforproeven op 5 locaties in Zweden (twee zandleem, twee leem, één klei) met zeer tot tamelijk lage P-AL (Djodjic *et al.*, 2005). Onder een rotatie met onder andere granen en suikerbieten werden telkens 3 P-trappen aangelegd: uitmijning, licht negatieve en positieve fosforbalans (Djodjic *et al.*, 2004).

#### **19.3.1.7 Literatuur: P-trappen in Hongarije (Berecz et al., 2005)**

Op een zandleembodem in Hongarije met extreem lage P-AL werden gedurende 37 jaar sterk verschillende P-trappen aangelegd, van uitmijning tot zware bemesting voor maïs en granen (Berecz *et al.*, 2005).

#### **19.3.1.8 BDB-veldproef: Ath (Vanderdeelen et al., 1985; Vandendriessche et al., 1994)**

Gedurende 23 jaar (1965-1987) werden op een leembodem in Ath met streefzone P-AL 5 P-trappen aangelegd, van uitmijning tot sterk positieve bodembalans. Er werd een rotatie van granen, aardappelen en suikerbieten geteeld (Vanderdeelen *et al.*, 1985; Vandendriessche *et al.*, 1994). Op de bodemstalen van jaar 1982 en 1985 werd P-beschikbaarheid ook met andere P-testen dan P-AL gemeten (Nawara *et al.*, 2017).

#### **19.3.1.9 Veldproef CRA-W in Gembloux (België)**

Een langetermijn P- en K-proef loopt reeds 50 jaar (sinds 1967) in Gembloux op een leemperceel met start-P-AL 176 mg P/kg (streefzone) (Legrand *et al.*, 2012). Het landgebruik is een rotatie van bieten en granen. De analyse hier spitst zich toe op de 3 P-trappen van de tweede K-trap (altijd evenwichtsbemesting voor K): fosforuitmijning (P0), fosforevenwichtsbemesting (P1) en fosforoverbemesting (P2). Fosforafvoer werd in het begin van de proef geschat op 79 kg P/ha voor een rotatie van 3 jaar. Voor de evenwichtsbemesting (P1) wordt dan ook altijd bemest met 79 kg P/ha/rotatie. Behandeling P2 kreeg tot en met 2001 het dubbele van deze hoeveelheid, vanaf 2002 anderhalf keer de bemestingshoeveelheid van P1 (Nawara *et al.*, 2017). Afvoerdata van fosfor zijn echter voor de meeste proefjaren niet beschikbaar. Op basis van opbrengstgegevens wordt geschat dat de fosforafvoer voor P0 5% minder en voor P2 1,5% meer is dan voor P1. Er werd zowel in 2015 als in 2018 bodem bemonsterd. Op het beginstaal (1967) werd eveneens P-AL bepaald. In 2018 werden daarnaast ook stalen tot 90 cm diep genomen (zie verder).

#### **19.3.1.10 Veldproef Exhaustion Land in UK (Poulton et al., 2013)**

Op een zandleemperceel van Rothamsted Research in Harpenden (UK) loopt sinds 1856 een langetermijnproef met wisselende behandelingen (types en grootte van N- en P-bemesting). De bodemstalen zijn afkomstig van 4 P-behandelingen die startten in 1986 op 5 plotjes verschillend in karakteristieken door verschillende voorbehandeling: geen bemesting, stalmest, N-bemesting, NPK-bemesting en P-bemesting (Rothamstad Research, 2012; Poulton *et al.*, 2013) De 4 P-behandelingen (0; 43,7; 87,3 en 131 kg P/ha) lagen aan van 1986 tot 1993, gevolgd door afwezigheid van P-bemesting tot en met 1999. De plots zijn bemonsterd in 1999 en 2008, waartussen de vroegere 0-behandeling nog steeds geen P-bemesting kreeg, en de andere behandelingen 20 kg P/ha/jr (Nawara *et al.*, 2017). De rotatie bestaat uit bieten en granen. Door de verschillende voorgeschiedenis en bijgevolg variërende startwaarde voor P-AL (zeer tot tamelijk laag) zijn er geen strikte herhalingen.

#### **19.3.1.11 Veldproef Saxmundham Rotation II in UK**

Sinds 1899 loopt een veldproef op een leembodem in Saxmundham (UK) met variërende fosforbemestingshoeveelheden (0-2510 kg P/ha tussen 1899 en 1968). In 1969 werden de 8 overblijvende grote plots onderverdeeld in 4 blokken met 5 subplots die verschillende P-bemestingshoeveelheden kregen (0-379 kg P/ha) en waarop een rotatie liep van aardappelen, gerst, suikerbieten en wintertarwe (Johnston *et al.*, 1986; Johnston *et al.*, 2013). De stalen zijn afkomstig uit 1978 en 1982, van een behandeling zonder P-bemesting en een behandeling met 105 kg P/ha bemesting gedurende de 4 jaar tussen de staalnamemomenten (Steve McGrath, personal

communication). Door de verschillende voorgeschiedenis en bijgevolg variërende startwaarde voor P-AL (zeer laag tot streefwaarde) zijn er geen strikte herhalingen (Nawara *et al.*, 2017).

#### **19.3.1.12 Veldproef Vlaco en UGent (professor Dirk Reheul) in Melle (België)**

Sinds 2010 loopt een veldproef op een zandleemperceel in Melle met tamelijk hoge P-AL-waarde, onder beheer van UGent (professor Dirk Reheul). Er zijn 8 P-trappen (van 0 tot 41 kg P/ha) en 7 behandelingen met 37 kg P/ha toegepast via verschillende organische bemestingsvormen (digestaat, dierlijke mest en hun fracties). Er ligt een rotatie aan van maïs, aardappelen, bieten en granen (Vanden Nest *et al.*, 2015). Meer informatie en resultaten zijn ook te vinden in bijlage 1 van luik 2. Per behandeling zijn er 3 herhalingen. Er werden stalen geanalyseerd in 2011 en 2018.

#### **19.3.1.13 Veldproef BDB in Reppel (België)**

In Reppel werd op een zandbodem met tamelijk hoge P-AL-waarde gedurende 7 jaar (1972-1978) een veldproef onder gras aangelegd met verschillende kunstmest- en drijfmestbehandelingen (Boon, 1976). De analyse van de twee behandelingen met 0 en 52 kg P/ha/jr (met voldoende N- en K-voorziening, N2K2) gebeurde op een mengstaal van de herhalingen.

#### **19.3.1.14 Veldproef BDB in Geetbets (België)**

Gedurende 7 jaar (1974-1980) werd op een zandleembodem in Geetbets met streefzone P-AL een proef onder akkerbouw (granen en suikerbiet) aangelegd met 4 verschillende P-trappen (0 tot 79 kg P/ha/jr) (Boon, 1977). De analyse van de 4 P-behandelingen gebeurde op een mengstaal van de herhalingen.

#### **19.3.1.15 Veldproef BDB in Carlsbourg (België)**

Gedurende 9 jaar (1973-1981) liep het tweede deel van een langetermijnproef in Carlsbourg (Wallonië) op een leembodem met lage tot streefzone P-AL (Vanderdeelen *et al.*, 1985). Er lagen vijf verschillende P-trappen (0 tot 262 kg P/ha/jaar) aan bij voldoende N- en K-voorziening, gewassen waren raaigras en verschillende granen. De analyse gebeurde op een mengstaal van de herhalingen (Archief BDB).

#### **19.3.1.16 Veldproeven BDB in Kempen (België)**

Gedurende 5 jaar lagen op verschillende locaties in de Kempen (zandgrond) veldproeven aan met verschillende N-, P- en K-bemestingsdosissen (Boon, 1974). Vijf van deze veldproeven werden voor analyse geschikt gevonden op basis van de beschikbaarheid van data. Telkens werden de 4 behandelingen met verschillende P-bemesting (0 tot 79 kg P/ha/jr) bij voldoende N- en K-bemesting (N3K3) geanalyseerd (mengstaal van de herhalingen). De geteelde gewassen waren aardappel, Italiaans raaigras en dan afhankelijk van de locatie maïs, granen, bieten en/of rapen.

#### **19.3.1.17 Veldproef ILVO: Bopact in Merelbeke (België)**

Sinds 2010 ligt in Merelbeke de Bopact-veldproef aan op een zandleembodem met tamelijk hoge P-AL (D'Hose *et al.*, 2016). De veldproef heeft drie factoren: wel of geen composttoepassing, runder- of varkensdrijfmesttoepassing en kerende of niet-kerende bodembewerking. De behandelingen liggen in 4 herhalingen aan. De geanalyseerde stalen werden genomen begin 2010 en eind 2014. Gewassen zijn maïs, aardappel en gerst.

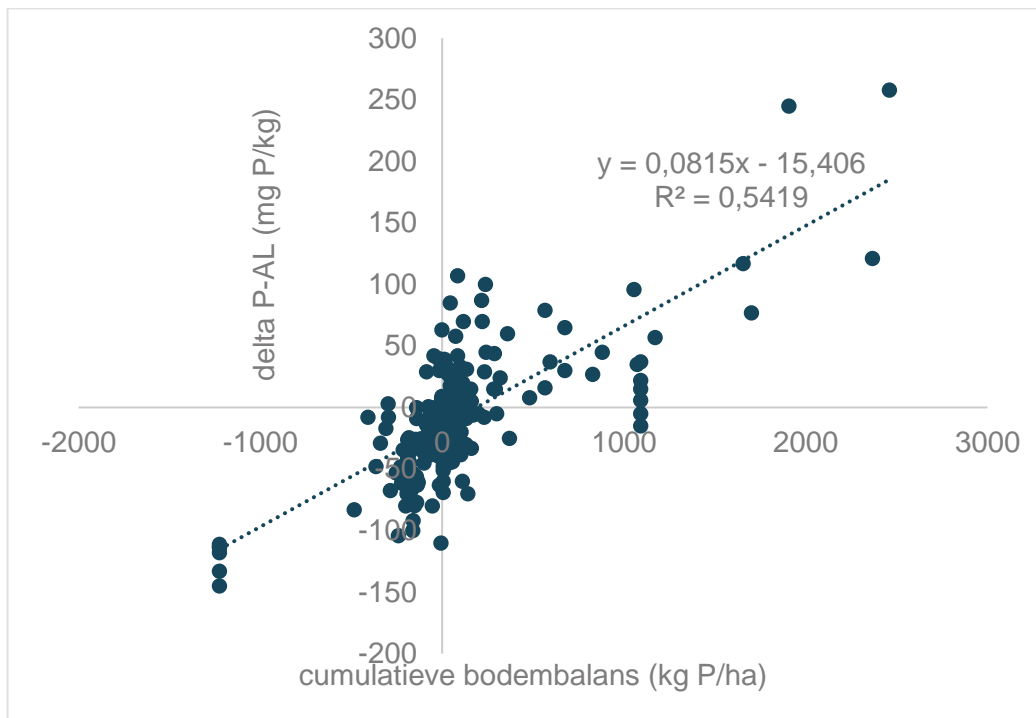
#### **19.3.1.18 Veldproef ILVO: biocharproef in Merelbeke (België)**

Sinds 2012 ligt in Merelbeke de biocharveldproef aan op een zandleembodem met tamelijk hoge P-AL (Nelissen *et al.*, 2015). Verschillende biochar- en compost(mengsels) werden op verschillende tijdstippen éénmalig toegepast. Daarnaast was er ook een controle-behandeling zonder fosforbemesting. Er werd gerst, prei, gras en maïs geteeld, alles in vier herhalingen. De geanalyseerde stalen werden genomen eind 2011/2012/2013 (afhankelijk van de behandeling) en begin 2017.

## 19.3.2 Analyse verandering van P-AL (mg P/kg)

### 19.3.2.1 Algemeen

De tijdsduur tussen  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  en  $P\text{-AL}_{\text{fin}}$  varieerde tussen 3 en 51 jaar. Cumulatieve bodembalansen varieerden tussen -1224 en 2461 kg P/ha. In Figuur 110 is een duidelijke significant positieve relatie te zien tussen  $\Delta P\text{-AL}$  en de cumulatieve bodembalans ( $R^2=0,54$ ). Het intercept is negatief, wat wijst op een vastlegging van fosfor in niet-meetbare fracties in de tijd.



Figuur 110. Verandering in P-AL in 33 veldproeven met verschillende behandelingen in functie van de cumulatieve bodembalans

### 19.3.2.2 Multiple lineaire regressie

In Figuur 110 is er nog vrij veel scatter tussen de data ( $R^2=0,54$ ). Daarom werd een multiple lineaire regressie uitgevoerd om andere bepalende factoren te detecteren. Er waren geen belangrijke correlaties van de cumulatieve bodembalans met andere parameters, waardoor interactietermen werden opgenomen voor de modelopbouw. Omdat niet van alle datapunten alle bodemeigenschappen beschikbaar waren, werd eerst een model opgebouwd met parameters beschikbaar voor elk datapunt: cumulatieve fosforbalans, tijd,  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  en textuur. Er werd gekozen voor een mixed model met random effect van de veldproef. Na het stapsgewijs weglaten van de niet-significante parameters werd een model bekomen met  $R^2=0,89$ , met als significante parameters:

- De cumulatieve bodembalans (+)
- $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  (-)
- Interactieterm tijd en cumulatieve balans (-)
- Interactieterm  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  en cumulatieve balans (+)

De parameter tijd zelf was niet significant maar werd wel opgenomen in het model wegens het belang van de interactieterm tussen tijd en cumulatieve balans. Bijgevolg is vooral  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  bepalend voor het intercept: hoe groter  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$ , hoe meer fixatie van fosfor naar fracties die niet meetbaar zijn als P-AL. Voor de richtingscoëfficiënt zijn de tijd en  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  belangrijk. De tijd heeft een bufferwerking: hoe groter de tijdsduur, hoe beperkter de toename of afname in P-AL. Zo zal de toename in P-AL bij een positieve balans van 100 kg P/ha 2 mg P/kg minder bedragen indien deze over 15 in plaats van 5 jaar gespreid is.  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  werkt dan weer stimulerend op de cumulatieve balans (omgekeerde van buffering): hoe groter de initiële waarde van P-AL, hoe meer P-AL ook kan toenemen met een

bepaalde bemestingsdosis, of hoe meer P-AL kan afnemen bij uitmijnen. Indien P-AL initieel bijvoorbeeld 100 mg P/kg groter is, zal bij een positieve/negatieve balans P-AL 2,1 mg P/kg meer toenemen/afnemen. Dezelfde tendens werd ook waargenomen voor P extraheerbaar met ammoniumacetaat in veldproeven in Finland (Ekholm *et al.*, 2005). Verminderde fosforbuffercapaciteit bij toenemend fosforgehalte wordt ook algemeen in de literatuur vastgesteld (zie literatuurstudie in bijlage 3). In de labo- en serreproeven werd echter geen significant effect van  $P-AL_{ini}$  waargenomen (19.2).

In dit model is er geen significant verschil in de verandering van P-AL met de cumulatieve balans tussen positieve balansen (overbemesting) en negatieve balansen (uitmijning). Dit werd ook reeds waargenomen voor Olsen-P in veldproeven in Canada (Messiga *et al.*, 2010). Dit suggereert dat hysteresis van weinig belang is na uitschakeling van het fixatie-effect van  $P-AL_{ini}$ . Onder andere in een veldproef in Engeland werd vastgesteld dat de daling in bodem-P bij uitmijning initieel soms groter is dan later in de tijd (Johnston *et al.*, 2014). De bemestingsgeschiedenis is bijgevolg van belang, maar het is niet evident om deze steeds te weten te komen en/of in getallen uit te drukken. Het model bewijst dat  $P-AL_{ini}$  hier echter een proxy voor kan zijn.

Vervolgens werd gekeken of bodemeigenschappen percentage organische stof, pH, %klei, ijzer- en aluminiumgehalte (apart en som), die niet voor alle veldproeven beschikbaar waren, significante parameters bleken bij toevoeging aan het bestaande model. Dit bleek niet het geval. In tegenstelling tot de labo- en serreproeven wordt hier dus geen significant effect van het ijzergehalte waargenomen. Door de grotere dataverzameling en de aard van de proeven (veldproeven over lange termijn in plaats van labo-proeven over korte termijn) lijken de veldproeven relevanter voor het voorspellen van de verandering van P-AL en het belang van het ijzergehalte hierin.

Sommige veldproeven hebben vrij veel datapunten omdat van deze veldproeven ook de herhalingen apart beschikbaar waren (uit de literatuur enkel gemiddelden per behandeling). Wanneer de analyse werd gedaan met enkel de gemiddeldes (slechts 181 in plaats van 265 datapunten) werden nagenoeg dezelfde resultaten ( $R^2$  en significante parameters) bekomen. In Figuur 110 zijn rond cumulatieve balans -1200 en +1200 kg  $P_2O_5$ /ha wat afwijkende punten te zien, die afkomstig zijn van de veldproef in Gembloux (langst durende proef, met de meest negatieve bodembalansen). Indien deze veldproef niet wordt opgenomen in de analyse, werd een vergelijkbare  $R^2$  bekomen (0,88 in plaats van 0,89) en was de interactieterm tussen  $P-AL_{ini}$  en de balans niet meer significant. Andere uitkomsten waren zeer gelijkaardig.

Het ontwikkelde model voor  $\Delta P-AL$ :

$$\Delta P-AL = 20,4 - 0,174 * P-AL_{ini} - 0,53 * \text{tijd} \\ + (0,124 + 0,00021 * P-AL_{ini} - 0,0021 * \text{tijd}) * \text{cumulatieve balans} \quad \text{Vergelijking 9}$$

zal gebruikt worden om fosforbemestingsadvies op lange termijn af te leiden (zie 19.4.2).

### 19.3.3 Analyse jaarlijkse verandering P-AL

De data van de veldproeven kunnen ook op jaarbasis geanalyseerd worden (Figuur 111). Ook hier is de jaarlijkse bodembalans de belangrijkste verklarende parameter van de jaarlijkse verandering in P-AL ( $R^2=0,40$ ). Ook bij weglaten van het punt met zeer hoge bodembalans (212 kg P/ha/jr, BDB Carlsbourg) werd de bekomen relatie in Figuur 111 behouden ( $R^2$  daalt wel van 0,40 naar 0,34). Het intercept bedraagt -2,2 mg P/kg/jr. Dat betekent dat bij evenwichtsbemesting (P-bemesting = P-afvoer) P-AL jaarlijks met 2,2 mg P/kg/jr daalt. Om het effect van andere parameters dan de jaarlijkse fosforbalans op de jaarlijkse verandering in P-AL na te gaan, werd een multiple lineaire regressie uitgevoerd. Hieruit blijkt dat  $P-AL_{ini}$  een significant negatief verklarende parameter is voor de jaarlijkse verandering in  $P-AL_{ini}$  ( $R^2$  neemt toe van 0,40 naar 0,50, of 0,81 bij meenemen van het

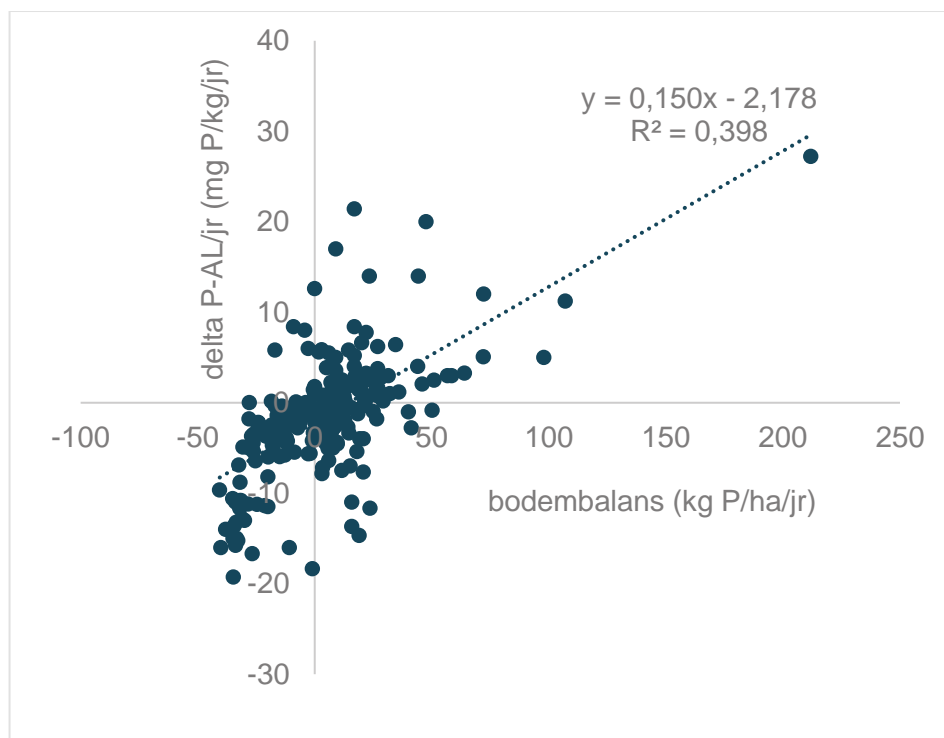


random proefveldeffect). Zo zal de jaarlijkse extra input nodig voor het constant blijven van P-AL groter zijn bij grotere P-AL<sub>ini</sub>:

$$\Delta P\text{-AL}/\text{jr} = 2,36 - 0,0252 * P\text{-AL}_{\text{ini}} + 0,13 * \text{jaarlijkse P-balans}$$

Vergelijking 10

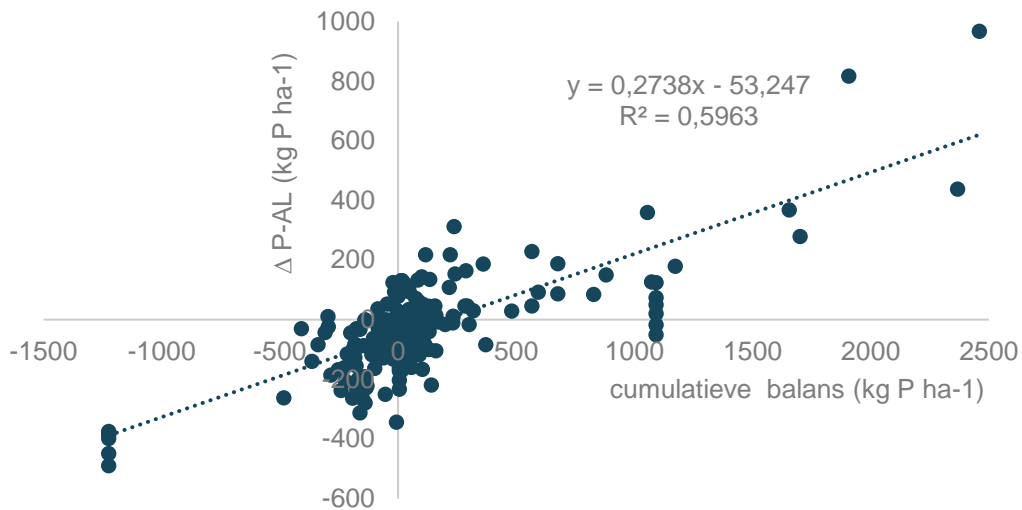
De grootte van dit effect wordt uitgewerkt in 19.4.3 met behulp van het bekomen model, namelijk om bemestingsadvies af te leiden voor bodems met P-AL in de streefzone. Merk ook op dat andere bodemparameters weer niet bepalend zijn in de jaarlijkse verandering van P-AL.



Figuur 111. Jaarlijkse verandering in P-AL in functie van de jaarlijkse bodembalans voor de 265 data van de 33 veldproeven

#### 19.3.4 Analyse verandering in P-AL in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha

Het is mogelijk om P-AL uit te drukken in kg P/ha in plaats van mg/kg indien de staalnamediepte en de bodemdichtheid gekend zijn. Voor enkele veldproeven moest een bodemdichtheid aangenomen worden omdat geen gemeten waarden beschikbaar waren (1450 kg/m<sup>3</sup> voor zandleem en leem, 1250 kg/m<sup>3</sup> voor andere texturen), de staalnamediepte varieerde tussen 5 en 30 cm. Op deze manier heeft  $\Delta P\text{-AL}$  dezelfde eenheid als de cumulatieve balans (kg P/ha). In Figuur 112 is te zien dat de helling van de curve gefit door de datapunten slechts 0,27 bedraagt. Dit houdt in dat slechts 27% van de toegediende P teruggevonden wordt in de P-AL-fractie in de toplaag. Tevens houdt het in dat slechts 27% van de afgevoerde P opgenomen wordt uit de P-AL-fractie in de toplaag. In luik 1 werd in de uitmijningsproef (DWP 1.3) echter P-AL als goede test geselecteerd omdat P-AL de uitgemijnde fosforhoeveelheid wel goed kon benaderen. Daardoor werd voor de serre- en laboproeven hierboven een veel beperktere afwijking van de 1:1-lijn waargenomen (Figuur 109). Een belangrijk verschil is dat in deze serre- en laboproeven geen uitloging naar of opname uit diepere lagen mogelijk was, de grond/wortel-verhouding anders is dan in het veld en de tijdsduur veel beperkter was. In de literatuur wordt ook waargenomen dat de massabalans niet gesloten kan worden (Blake *et al.*, 2003; van Wijk *et al.*, 2013). Een eerste mogelijke verklaring is dat P-AL niet alle P omvat die deelneemt aan de bodem-plant-bemestingscyclus. P uit bemesting kan dan terecht komen in een fractie die niet gemeten wordt door de ammoniumlactaatextractie, en planten kunnen ook P opnemen uit deze niet gemeten fractie. Een tweede mogelijke verklaring is dat P uit bemesting migreert naar diepere lagen en planten P opnemen uit diepere lagen dan de bemonsterde toplaag. Beide hypothesen worden hieronder onderzocht.



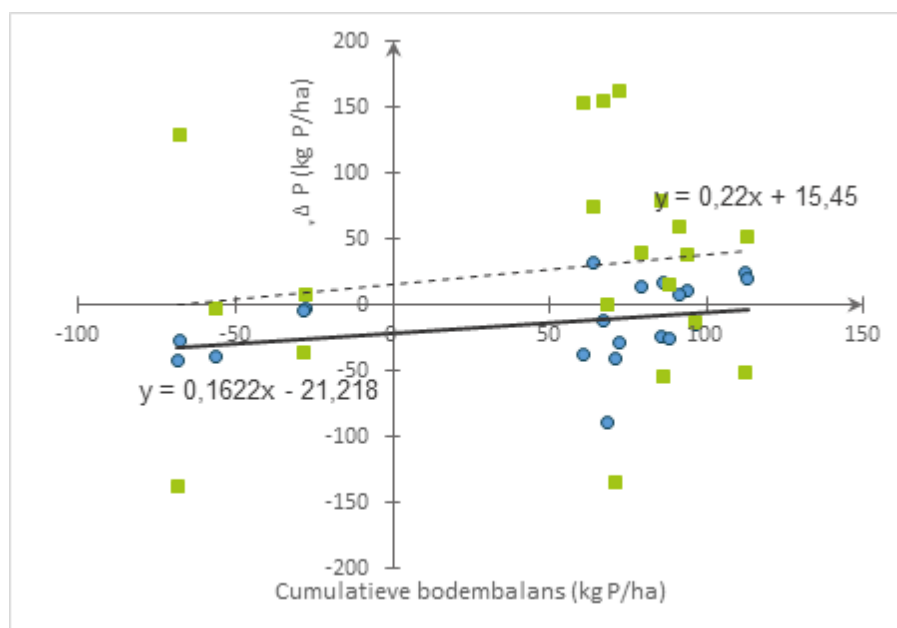
Figuur 112. Verandering in P-AL in kg P per ha in functie van de cumulatieve balans voor 265 datapunten uit 33 veldproeven

### 19.3.4.1 Hypothese 1: meer P dan P-AL neemt deel aan P-cyclus

Er wordt verondersteld dat er meer P dan de P-AL deelneemt aan de bodem-bemesting-plant-cyclus. Bemesting kan ook deze niet-gemeten pool aanvullen, en planten kunnen er P uit opnemen. Om te controleren of de massabalans wel kan gesloten worden indien alle P in de toplaag wordt gemeten, werd voor drie veldproeven de totale bodem-P (P-tot) gemeten met totale bodemdestructie (met koningswater in microgolfoven).

#### Rothamsted

Zowel in de initiële als in de finale bodemstalen (9 jaar later) werd P-AL en P-tot gemeten. De verandering in beide P-fractionen in functie van de cumulatieve bodembalans is weergegeven in Figuur 113. Voor beide P-pools is de scatter rond de fit groot, de richtingscoëfficiënt van de fit op de P-totaal data is iets groter (0,22) dan deze op de P-AL data (0,16), maar beiden zijn niet significant verschillend van nul en van elkaar. Ook voor P-tot is de richtingscoëfficiënt veel kleiner dan 1, waardoor de massabalans zeker niet kan gesloten worden.



Figuur 113. Verandering in P-AL (blauwe bollen, doorlopende trendlijn) en in P-totaal (groene vierkanten, gestreepte trendlijn) over negen jaar, beiden in kg P/ha in functie van de cumulatieve bodembalans in de veldproef in Rothamsted

## Ath

Er zijn geen initiële bodemstalen meer beschikbaar van de veldproef in Ath. Er zijn wel bodemstalen van 1985 (na 20 jaar) van verschillende behandelingen (bemestingsniveaus) beschikbaar, waardoor hypothese 1 wel kan getest worden op de verschillen tussen de behandelingen. Zo kan getest worden of het verschil in bodembalans tussen een bepaalde bemestingsbehandeling en de behandeling met nulbemesting ( $\Delta\text{balans}_{\text{Px-P0}}$ ), wat nagenoeg overeenkomt met de bemestingshoeveelheid in de behandeling ten opzichte van de nulbemesting, volledig teruggevonden wordt in extra P-AL of P-totaal in deze bemestingsbehandeling bovenop deze gemeten in de nulbemestingsbehandeling ( $\text{P-AL}_{\text{Px}} - \text{P-AL}_{\text{P0}}$  en  $\text{P-tot}_{\text{Px}} - \text{P-tot}_{\text{P0}}$ ).

Tabel 91. P-AL en P-totaal (kg P/ha) in bodemstalen (0-25 cm) van 5 P-bemestingsbehandelingen van de veldproef in Ath (1985), met de cumulatieve balans (1965-1985) en het procentueel deel van het verschil in de cumulatieve balans tussen behandeling Px (1, 2, 3 of 4) en P0 gemeten met P-AL en P-totaal

P-beh (Px)	P-AL (kg P/ha)	P-tot (kg P/ha)	cumul. balans (kg P/ha)	$\frac{\text{P-AL}_{\text{Px}} - \text{P-AL}_{\text{P0}}}{\Delta\text{balans}_{\text{Px-P0}}}$	$\frac{\text{P-tot}_{\text{Px}} - \text{P-tot}_{\text{P0}}}{\Delta\text{balans}_{\text{Px-P0}}}$
P0	290	1657	-402	-	-
P1	470	1849	178	31%	33%
P2	744	2017	739	40%	32%
P3	779	2181	1043	34%	36%
P4	996	2437	1472	38%	42%

In Tabel 91 is te zien dat hoewel er veel meer P gemeten wordt met P-totaal dan met P-AL, de verschillen in P gemeten tussen twee bemestingsbehandelingen zeer gelijkaardig zijn met P-AL en met P-totaal. Deze verschillen zijn slechts 31-42% van het verschil in cumulatieve balans tussen de behandelingen, waardoor ook hier duidelijk is dat met een P-totaalmeting de massabalans niet gesloten kan worden.

## Gembloux

Ook van de veldproef in Gembloux (51 jaar) zijn geen initiële bodemstalen beschikbaar, zodat zoals bij de veldproef van Ath met verschillen tussen bemestingsbehandelingen gewerkt wordt. In Tabel 92 is te zien dat er bijna dubbel zoveel P van het verschil in balans teruggevonden wordt via P-totaal in vergelijking met P-AL, maar dat de massabalans met deze meting in de toplaag (0-25 cm) nog lang niet gesloten is.

Tabel 92. Gemiddelde P-AL en P-totaal (kg P/ha) in bodemstalen (0-25 cm) van 3 P-bemestingsbehandelingen (6 herhalingen) van de veldproef in Gembloux (2018), met de cumulatieve balans (1967-2018) en het procentueel deel van het verschil in de cumulatieve balans tussen behandeling Px (1 of 2) en P0 gemeten met P-AL en P-totaal

P-beh (Px)	P-AL (kg P/ha)	P-tot (kg P/ha)	cumul. balans (kg P/ha)	$\frac{\text{P-AL}_{\text{Px}} - \text{P-AL}_{\text{P0}}}{\Delta\text{balans}_{\text{Px-P0}}}$	$\frac{\text{P-tot}_{\text{Px}} - \text{P-tot}_{\text{P0}}}{\Delta\text{balans}_{\text{Px-P0}}}$
P0	181	1646	-1224	-	-
P1	421	2110	7	20%	38%
P2	628	2451	1093	19%	35%

### 19.3.4.2 Hypothese 2: P uit diepere bodemlagen neemt ook deel aan de bodemcyclus

Om na te gaan of er ook een belangrijk deel van de P-bemesting migreert naar diepere bodemlagen en planten P opnemen uit diepere bodemlagen, zijn bodemstalen van meerdere bodemdieptes uit een veldproef nodig. Deze konden verkregen worden van de veldproef in Gembloux (0-25 cm, 25-50 cm en 50-90 cm). In Tabel 93 is te zien dat ook in diepere bodemlagen een deel van het verschil in bodembalans terug te vinden is. Voor P-AL is dit slechts een beperkt deel: 6 tot 10% van de bodembalans werd onder 25 cm teruggevonden. Voor P-totaal is dit aandeel aanzienlijker (29%-38%) zodat in totaal de massabalans voor een groot deel gesloten kan worden (64-76%).

Tabel 93. Gemiddelde P-AL en P-totaal (kg P/ha) in bodemstalen van verschillende dieptes van 3 P-bemestingsbehandelingen (6 herhalingen) van de veldproef in Gembloux (2018), met de cumulatieve balans (1967-2018) en het procentueel deel van het verschil in de cumulatieve balans tussen behandeling Px (P1 of P2) en P0 gemeten met P-AL en P-totaal

Diepte (cm)	P-beh (Px)	P-AL (kgP/ha)	P-tot (kgP/ha)	cumul.balans (kg P/ha)	$\frac{P-AL_{Px} - P-AL_{P0}}{\Delta balans_{Px-P0}}$	$\frac{P-tot_{Px} - P-tot_{P0}}{\Delta balans_{Px-P0}}$
					$\Delta balans_{Px-P0}$	$\Delta balans_{Px-P0}$
0-25	P0	181	1646	-1224	-	-
	P1	421	2110	7	20%	38%
	P2	628	2451	1093	19%	35%
25-50	P0	118	1515	-1224	-	-
	P1	173	1774	7	4%	21%
	P2	306	1996	1093	8%	21%
50-90	P0	143	2241	-1224	-	-
	P1	168	2459	7	2%	18%
	P2	177	2434	1093	1%	8%
0-90	P0	443	5402	-1224	-	-
	P1	762	6342	7	26%	76%
	P2	1110	6881	1093	29%	64%

### 19.3.4.3 Conclusie

Hypothese 1 en hypothese 2 kunnen slechts gedeeltelijk bevestigd worden door de resultaten. P-AL in de toplaag meet inderdaad niet alle P die deelneemt aan de bemesting-bodem-plant-cyclus. Er is een beperkt deel P in de toplaag die niet gemeten wordt met P-AL en er is een beperkt deel P in de diepere lagen te meten met P-AL, die wel deelnemen aan de cyclus. Toch kunnen we de massabalans nog niet sluiten door deze pools in rekening te brengen. De grootste extra pool die deelneemt in de proef van Gembloux is P-totaal in diepere bodemlagen. Een deel daarvan zit in de laag 25-50 cm, wat deels kan veroorzaakt zijn door diep ploegen en mengen met de toplaag (Christian Roisin, persoonlijke communicatie). Het valt voor de laag 50-90 cm op dat er (niet-significante) verschillen zijn in P-AL en P-totaal tussen P0 (nulbemesting) en P1 of P2, maar dat deze verschillen veel beperkter zijn tussen P1 en P2, hoewel het verschil in balans tussen P0 en P1 ongeveer even groot is als het verschil in balans tussen P1 en P2. Dit suggereert dat de verschillen in P-gehalte vooral te verklaren zijn door extra P-opname door het gewas uit diepere lagen in de P0-behandeling, en niet zozeer door migratie van P naar diepere lagen. Ook voor de veldproef in Lelystad 19.3.1.5 zijn metingen van P-totaal in diepere bodemlagen uitgevoerd (van Wijk *et al.*, 2013). Ook daar wijzigde P-AL veel minder dan verwacht op basis van de P-balans. Met een aantal aannames kunnen we met de resultaten berekenen dat de massabalans bijna gesloten kan worden als P-totaal gemeten wordt tot 50-60 cm diepte (onder 60 cm was er geen verschil tussen de bemestingsbehandelingen). Indien

enkel de bovenste 30 cm in rekening werd genomen, werd maar de helft van het verschil in balans teruggevonden. Aangezien er verschillen in de laag 30-60 cm terug te vinden waren tussen alle bemestingstrappen, zijn de verschillen wellicht te verklaren door een combinatie van P-opname door het gewas uit en van P-migratie naar deze laag. Dit verschil in P wordt echter maar beperkt gemeten via P-AL. Zowel uit de veldproef van Gembloux als uit de veldproef van Lelystad kan dus besloten worden dat een significant deel van P dat deelneemt aan de bodem-bemesting-plantcyclus zich bevindt in lagen onder de toplaag, niet extraheerbaar met P-AL.

### 19.3.5 Veldproeven uitmijnen UGent (professor Kris Verheyen)

Er werden stalen bekomen van twee veldproeven van UGent rond fosforuitmijning.

Veldproeven op grasland werden tussen 2011 en 2017 aangelegd op drie zandbodems in Landschap De Liereman in Oud-Turnhout (met lage, gemiddelde en hoge P-beschikbaarheid) en op één P-rijke bodem in Zedelgem. Geen van de twee behandelingen in de proef te Zedelgem kreeg fosforbemesting, maar verschilden in N- en K-bemesting. De analyse gebeurde per behandeling op een mengstaal van de herhalingen.

Op drie verschillende zandbodems in Landschap De Liereman in Oud-Turnhout (met gemiddelde tot hoge P-beschikbaarheid) werden verschillende uitmijningsproeven (geen fosforbemesting) aangelegd. De drie verschillende behandelingen betreffen verschillende rotaties en dus verschillende fosforexportheveelheden. De analyse gebeurde per behandeling en per perceel op een mengstaal van de herhalingen.

Ondanks het weglaten van elke vorm van fosforbemesting namen P-AL en P-Ox toe in de verschillende behandelingen. Omdat dit niet te verklaren valt, werden deze veldproeven niet opgenomen in de analyse hierboven.

## 19.4 BEMESTINGSADVIES OP LANGE TERMIJN

### 19.4.1 Algemeen

Luik 2 resulteerde in het afleiden van een streefzone voor P-AL. Het bemestingsadvies op lange termijn heeft als doel om vanuit eender welke start-P-AL-waarde naar deze streefzone te evolueren of om in deze streefzone te blijven.

Uit DWP 3.2 is duidelijk dat de fosforhoeveelheden die toegevoegd en afgevoerd worden van de bodem, niet eenvoudig mogen opgeteld worden met of afgetrokken worden van de bodemvoorraad. De grote hoeveelheid velddata liet toe een model (Vergelijking 9) op te stellen voor evolutie van P-AL (mg P/kg) in functie van de cumulatieve fosforbalans. Uit dit model kan fosforbemestingsadvies op lange termijn voor evolutie naar de streefzone afgeleid worden voor initiële P-AL-waarden die onder of boven de streefzone liggen (19.4.2). Tevens kon een model opgesteld worden voor jaarlijkse veranderingen in P-AL in functie van de jaarlijkse bodembalans (Vergelijking 10). Uit dit model kan fosforbemestingsadvies op lange termijn afgeleid worden om streefwaarden van P-AL te behouden (19.4.3).

### 19.4.2 Advies voor P-AL onder of boven de streefzonewaarden

Met behulp van Vergelijking 9 kan voor een gegeven  $P-AL_{ini}$ , tijd en cumulatieve balans de verwachte  $\Delta P-AL$  berekend worden. Voor bemestingsadvies is het eerder interessant om vanuit een gegeven  $\Delta P-AL$  te vertrekken, namelijk de verandering in P-AL nodig om te evolueren naar de ondergrens van de streefzone (110 mg P/kg, voor  $P-AL_{ini} < 110$  mg P/kg) of de bovengrens van de streefzone (160 mg P/kg, voor  $P-AL_{ini} > 160$  mg P/kg). Daarbij zijn zowel de cumulatieve balans als de tijd onbekenden, en bovendien afhankelijk van elkaar via de jaarlijkse fosforbalans. Hier rijst het probleem dat de tijd en de cumulatieve balans aan elkaar gerelateerd zijn, en we dus de cumulatieve balans niet kunnen afleiden zonder aannames van tijdsspannes. Daarom wordt eerst de cumulatieve balans afgeleid uit een vereenvoudigd model zonder tijdspanne ( $R^2$  daalt van 0,89 naar 0,83):

$$\Delta P\text{-AL} = 17,2 - 0,18 * P\text{-AL}_{\text{ini}} + (0,068 + 0,000077 * P\text{-AL}_{\text{ini}}) * \text{cumulatieve balans}$$

Vergelijking 11

Met aannames van de jaarlijkse balans kan dan een tijdsspanne afgeleid worden, die dan in het volledige model kan ingevuld worden. Deze levert dan opnieuw een cumulatieve balans, waaruit met de jaarlijkse balans een nieuwe (meer correcte) tijdsspanne kan afgeleid worden. Deze iteratie wordt herhaald tot een constante tijdsspanne en cumulatieve balans bekomen worden. Bij langere tijdsspannes dan 50 jaar werden vaak geen stabiele waarden gevonden (geen convergentie). Ook bij zeer kleine veranderingen in P-AL werden geen stabiele waarden gevonden, daarvoor wordt verwezen naar 19.4.3. In Tabel 94 is een opzoektabel weergegeven voor verschillende combinaties van P-AL<sub>ini</sub> ΔP-AL, cumulatieve balans, jaarlijkse fosforbalans en tijdsspanne.

Zo is duidelijk (geval A-B) dat om van P-AL 260 mg P/kg naar de bovengrens van de streefzone (160 mg P/kg) te evolueren, er ongeveer 500 kg P/ha netto afgevoerd moet worden. Wordt er 'stevig uitgemijnd' (=geen fosforbemesting, bemesting met andere nutriënten zodat afvoer op 40 kg P/ha/jr kan gehouden worden), dan kan dit op 11 jaar tijd gerealiseerd worden. Bij beperktere afvoer, bijvoorbeeld door beperkte organische bemesting met een netto afvoer van -15 kg P/ha/jr, zal dit 36 jaar duren. Wanneer P-AL<sub>ini</sub> hoger is, daalt P-AL sneller in de tijd bij dezelfde balans (vergelijk geval A, C en F). Bij stevig uitmijnen wordt dezelfde daling van -100 mg P/kg vanaf 460 mg P/kg al bereikt na 4 jaar in plaats van 11 jaar. Dezelfde daling kan ook bereikt worden door 19 jaar aan de MAP5-bemestingsnormen van klasse IV-bodems te bemesten (geval H). Om daarna nog eens 100 mg P/kg te dalen aan dezelfde jaarlijkse balans van -8,7 kg P/ha/jr, is er nu al 35 jaar nodig (geval E). Bij heel licht uitmijnen (-5 kg P/ha/jr) bij een P-AL<sub>ini</sub> net boven de streefzone (200 mg P/kg) duurt het zo'n 22 jaar om 40 mg P/kg te dalen (geval I). Deze cijfers tonen aan dat met de MAP5-normen er pas na enkele decennia streefwaardecijfers kunnen bereikt worden.

Tabel 94. Voorspelde cumulatieve balans en tijdsspanne voor enkele voorbeelden van wijzigen in P-AL (ΔP-AL) en P-AL<sub>ini</sub> op basis van het uitgebreide model bekomen uit de 23 veldproeven (Vergelijking 9)

Geval	P-AL <sub>ini</sub> (mg P/kg)	ΔP-AL (mg P/kg)	Jaarlijkse fosforbalans (kg P/ha/jr)	Cumulatieve fosforbalans (kg P/ha)	Tijd (jaar)
A	260	-100	-40	-450	11
B	260	-100	-15	-547	36
C	360	-100	-40	-293	8
D	360	-100	-15	-298	20
E	360	-100	-8,7	-310	35
F	460	-100	-40	-180	4
G	460	-100	-15	-174	12
H	460	-100	-8,7	-167	19
I	200	-40	-5	-112	22
J	70	40	22	442	20
K	90	20	12	324	27
L	100	10	8,7	137	16
M	100	10	20	62	3

Met het model kan de benodigde cumulatieve balans berekend worden voor een bepaalde gevraagde daling in P-AL (=advies). Om grote veranderingen in P-AL te berekenen, is combinatie van verschillende lijnen in de tabel nodig. Bijvoorbeeld om van 460 naar 160 mg P/kg te evolueren moeten lijn F, C en A gecombineerd worden. Over welke tijdsduur deze netto afvoer moet gerealiseerd worden, kan geen pasklaar antwoord gegeven worden. Idealiter wordt geen fosfobemesting meer gegeven waardoor de daling het snelst gaat (verschil tussen lijn A en B, of C en D), maar per bodem moet bekeken worden wat haalbaar is in de bedrijfsvoering (mestoverschot?), of er dan aangevuld moet worden met kunstmest en moet er ook over gewaakt worden dat de aanvoer van organische stof niet in het gedrang komt. Best wordt dus gekozen voor een organische mest met een zo laag mogelijk fosforgehalte en zo hoog mogelijke gehalte effectieve organische stof.

Voor bodems met een te lage waarde voor  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  kan ook een bemestingsadvies op lange termijn afgeleid worden. Zo is voor P-AL 70 mg P/kg een toename van 40 mg P/kg nodig, wat kan gerealiseerd worden door 20 jaar lang een overmaat van 22 kg P/ha/jr toe te passen (geval J). Een beperkte stijging van 100 naar 110 mg P/kg aan 8,7 kg P/ha/jr (MAP5-normen voor klasse I) zou 16 jaar in beslag nemen (geval L). Dit zou ook in 3 jaar kunnen door telkens 20 kg P/ha/jr bovenop de afvoer te bemesten (geval M). Bij lagere P-AL-startwaarden zijn zeker jaarlijkse balansen nodig die hoger zijn dan de MAP5-normen.

In het VK wordt aangeraden om cumulatief 400 kg  $P_2O_5$ /ha toe te passen om een stijging van 10 mg P/l P-Olsen te krijgen (ADHB, 2017). Het bemestingsadvies verschilt naargelang de startwaarde voor P-Olsen en hoe lang het mag duren vooraleer de streefwaarde bereikt wordt. Voor bodems in P-index 0 (laagst, streefzone is P-index 2), wordt een jaarlijkse positieve bodembalans van 60 (10-15 jaar) tot 100 kg  $P_2O_5$ /ha/jaar (5-10 jaar) aangeraden. Voor bodems in P-index 1 wordt de helft van deze jaarlijkse positieve bodembalans aangeraden.

#### 19.4.3 Advies voor behoud van streefzonewaarden

Indien gewenst wordt om P-AL min of meer constant te houden, zoals het geval voor streefzonewaarden, is het model opgesteld voor de jaarlijkse verandering van P-AL (Vergelijking 10) een betere keuze dan het model met de cumulatieve fosforbalans (Vergelijking 9).

In

Tabel 95 (opzoektabel voor constante P-AL) is te zien dat bij toenemende  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$  de voorspelde daling in P-AL bij evenwichtsbemesting toeneemt. Daarom is ook een grotere positieve balans nodig om P-AL constant te houden bij hogere  $P\text{-AL}_{\text{ini}}$ . Zo is om P-AL constant te houden op de ondergrens van de nieuw voorgestelde streefzone ( $P\text{-AL} = 110 \text{ mg P/kg}$ ) een positieve balans nodig van  $3 \text{ kg P/ha/jr} = 7 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha/jaar}$ . Om P-AL constant te houden op de bovengrens van de nieuw voorgestelde streefzone ( $P\text{-AL} = 160 \text{ mg P/kg}$ ) is een positieve balans nodig van  $12,5 \text{ kg P/ha/jr} = 29 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha/jaar}$ . Deze waarden zijn iets hoger dan de zogenaamde 'onvermijdbare' verliezen in de Nederlandse adviesbasis (de Haan and van Geel, 2013), namelijk  $5 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha/jaar}$  voor de ondergrens van de streefzone en  $20 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha/jaar}$  voor de bovengrens van de streefzone. Deze Nederlandse waarden moeten nog door langetermijnonderzoek bevestigd worden. De streefzonewaarden zelf kunnen niet vergeleken worden omdat deze op basis van Pw-getal zijn in Nederland. In het VK wordt geen bijkomende fosforbemesting bovenop de gewasexport geadviseerd om in de streefzone te blijven (ADHB, 2017). Merk ook op dat met de MAP5-normen voor klasse 2 (balans  $\approx 0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha/jr}$ ) er dus een daling van P-AL kan verwacht worden.



Tabel 95. Voorspelde jaarlijkse verandering in P-AL bij evenwichtsbemesting en benodigde balans voor een constante P-AL voor verschillende waarden van P-AL<sub>ini</sub>, op basis van Vergelijking 10

<b>P-AL<sub>ini</sub></b> <b>(mg P/kg)</b>	<b>ΔP-AL/jr bij</b> <b>evenwichtsbemesting</b> <b>(mg P/kg/jr)</b>	<b>Jaarlijkse balans nodig</b> <b>voor constante P-AL</b> <b>(kg P/ha/jr)</b>
<b>90</b>	0,1	-1
<b>110</b>	-0,4	3
<b>140</b>	-1,2	9
<b>160</b>	-1,7	13
<b>180</b>	-2,2	17
<b>200</b>	-2,7	21
<b>300</b>	-5,2	40

#### 19.4.4 Advies voor verschillende bemestingstypes

In de literatuurstudie voor DWP 3.6 (bijlage 4) over verschillende bemestingstypes werd afgeleid dat voor bemestingsadviezen op lange termijn geen werkingscoëfficiënten voor verschillende bemestingstypes in rekening moeten worden gebracht. Dus ook voor mesttypes waar het beeld van is dat zij de fosfortoestand beperkt verhogen (compost, stalmest, rotsfosfaat), wordt aangeraden om met dezelfde P-dosis te bemesten als bij kunstmest. Zoniet kan de fosforbeschikbaarheid in de bodem sterk verhoogd worden. Het toepassen van organische meststoffen als compost en stalmest in hogere dosissen kan eventueel wel overwogen worden in het kader van de problematiek van bodems met te laag koolstofgehalte (zie DWP 3.6).

## 20 DWP 3.2: EVOLUTIE VAN FOSFORBESCHIKBAARHEID EN FOSFOROPNAME BIJ UITMIJNEN

### 20.1 CHEMISCHE DEPLETIE IN LABO

#### 20.1.1 Inleiding

Kennis over de beschikbaarheid van fosfor in de bodem is noodzakelijk om het bodemfosforgehalte te laten dalen zonder verlies aan gewasopbrengst. Planten kunnen slechts een beperkte P-verwijdering (desorptie) realiseren tijdens een bepaalde tijdsspanne. De langetermijndesorptie van P kan echter bestudeerd worden via een meer intensieve chemische desorptie met behulp van een adsorbens met een grote sorptiecapaciteit dat voortdurend werkt als een nulput (zero sink, vb. ferrihydriet). Het fosfaat sorbeert op het ferrihydriet, waardoor het vaste stof-vloeistof evenwicht verstoord wordt en P vrijgezet wordt uit de vaste fase om P in de bodemoplossing terug aan te vullen. De hoeveelheid gedesorbeerd P wordt gemeten via ICP.

Met behulp van deze experimentele data kan er inzicht verworven worden in de verschillende P-fractionen in de bodem en hun desorptiekinetieken. Op de data wordt het twee-pool-model van Lookman gemodelleerd (Lookman *et al.*, 1995). Het combineren van de data van de biologische (deelwerkpakket 1.3) en chemische depletie maakt het mogelijk om na te gaan hoelang de beschikbare bodemfosfor voldoet aan de P-vraag van de plant (zie deelwerkpakket 2.2).

#### 20.1.2 Materiaal en methoden

##### *Bodemstalen*

De bodemstalen onderworpen aan de chemische desorptie zijn de initiële en finale bodemstalen van respectievelijk het begin en einde van de depletieproef van de +N-behandeling (uitgezonderd bodem 3); waarbij de finale (door gras uitgemijnde) bodemstalen een mengstaal zijn van de afzonderlijke herhalingen uit de potproef. Van elk staal werd 2,5 g bodem afgewogen en gemengd met 40 ml  $2 \times 10^{-3}$  M  $\text{CaCl}_2$  en  $3 \times 10^{-4}$  M KCl. Aan deze bodemoplossingen werd vervolgens een membraan gevuld met ferrihydriet toegevoegd.

##### *Desorptie*

De ferrihydrietoplossing (HFO) werd gemaakt door 100 g  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{l}^{-1}$  op pH 7-8 te brengen door het druppelsgewijs toevoegen van 1 M NaOH. Deze oplossing werd vervolgens gecentrifugeerd (Thermo Scientific Heraeus Multifuge, X3R centrifuge, 3000g, 10 min), het supernatans werd afgegoten en ultrazuiver water werd opnieuw toegevoegd. Deze was-stap werd 3x uitgevoerd. Uiteindelijk werd de HFO opgelost in ultrazuiver water in een 2-liter volumetrische fles.

Voorafgaand aan het experiment werden de dialysemembranen (Spectra/Por® Dialysis membrane 12-14 kDa) gedurende enkele dagen geweekt in gedestilleerd water om glycerol te verwijderen. De membranen werden vervolgens gevuld met 10 mL ferrihydrietoplossing en toegevoegd aan de bodemoplossingen (elk bodemstaal werd in vijfvoud geanalyseerd). De bodemstalen werden aangevuld met vijf controle stalen (geen bodem), en met vijf referentiestalen met 0,8 mM P in oplossing om de sorptiecapaciteit van het ferrihydriet na te gaan. Een druppel chloroform werd toegevoegd om microbiële activiteit tegen te gaan.

De oplossingen met ferrihydriet werden in een end-over-end shaker geplaatst op 20°C, en er werden stalen genomen op dag 3, 9, 21, 44, 58, 77; d.i. de dialysemembranen werden vervangen, nieuwe membranen gevuld met ferrihydriet werden toegevoegd aan de bodemoplossingen, en de stalen werden opnieuw op de schudder geplaatst. Op elk staalnamemoment werden nieuwe referentiestalen opgestart. De potjes werden wekelijks geopend om contact met de lucht (en zuurstof) mogelijk te maken en anaerobe condities te vermijden. Staalname op dag 77 was niet meer

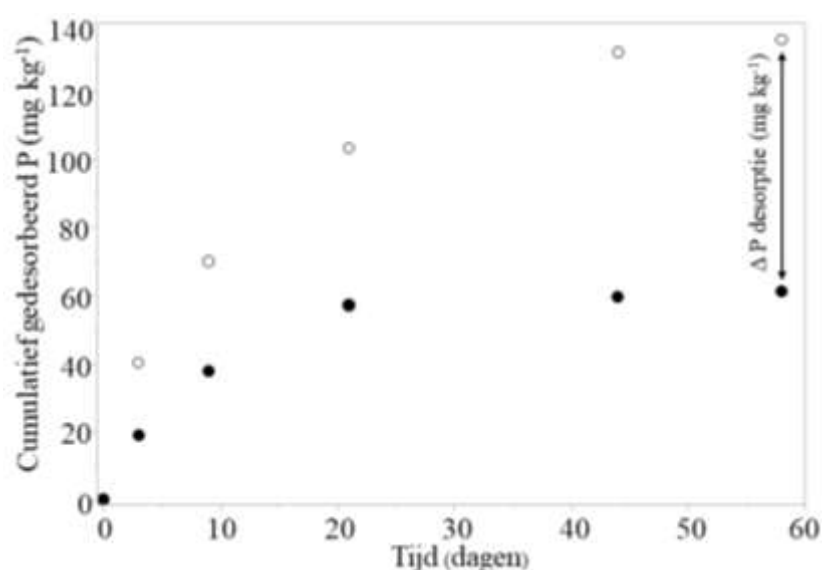
mogelijk voor alle behandelingen doordat de membranen gevuld met ferrihydriet soms kapot gingen ten gevolge van wrijving met de bodempartikels.

Bij staalname werden de dialysemembranen afgespoeld met ultrazuiver water om bodempartikels te verwijderen en werd de HFO opgelost door 0,5 ml geconcentreerd zwavelzuur toe te voegen ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , > 95%,  $d=1.83 \text{ g ml}^{-1}$ , Fischer Scientific). Het gedesorbeerde P werd opgemeten via ICP-OES (Perkin Elmer, Optima 3300 DV).

### 20.1.3 Resultaten

#### Desorptiecurve

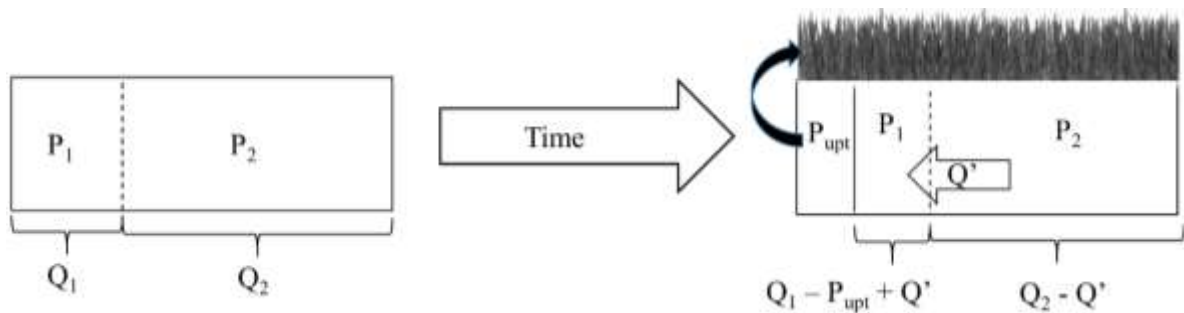
Het cumulatief door ferrihydriet gedesorbeerde fosfor in functie van de tijd wordt weergegeven in Figuur 114 (voorbeeld bodem 2). Het verschil in cumulatief gedesorbeerd P op het laatste staalnametijdstip tussen de initiële en finale (uitgemijnde) stalen van de depletieproef wordt gedefinieerd als “ $\Delta P$  desorptie” en wordt geïllustreerd in Figuur 114. Voor bodem 2 is  $\Delta P$  desorptie  $74 \text{ mg kg}^{-1}$  bodem.



Figuur 114. Cumulatief gedesorbeerd P in functie van de tijd voor de initiële (open symbolen) en finale uitgemijnde stalen (gesloten symbolen) van de depletieproef van bodem 2

#### Modelleren van de fosfordesorptie (Lookman model)

De resultaten werden gemodelleerd met het twee-pool model van Lookman *et al.* (1995). Dit model definieert een snelle ( $P_1$ ) en een trage ( $P_2$ ) desorbeerbare P-pool, elk met een eigen desorptie snelheidsconstante ( $k_1$  en  $k_2$  respectievelijk); waarbij verondersteld wordt dat de som van beide pools overeenkomt met het oxalaat extraheerbaar P (P-Ox). Bij de finale door het gewas uitgemijnde stalen van de potproef is een deel van het beschikbare fosfor in  $P_1$  opgenomen door de plant ( $P_{\text{upt}}$ ), deze pool wordt opnieuw aangevuld door P ( $Q'$ ) uit de traag desorbeerbare pool ( $P_2$ ). In het model komt  $P_{\text{upt}}$  overeen met de cumulatieve P-opname door de plant bepaald via de depletieproef. De absolute waarden van  $P_1$  en  $P_2$  dalen dus tijdens de depletieproef ten gevolge van P-opname door de plant. Een schematisch overzicht van  $P_1$  en  $P_2$  voor de initiële en finale bodemstalen wordt weergegeven in Figuur 115 en Tabel 96.



Figuur 115. Conceptuele weergave van de verschillende P-pools in de initiële en finale bodemstalen

Tabel 96. Overzicht van de snelle en traag desorbeerbare P pool voor de initiële en finale bodemstalen

	<b>P<sub>1</sub> (snel)</b>	<b>P<sub>2</sub> (traag)</b>	<b>Totaal</b>
<b>Initieel</b>	$Q_1$	$Q_2 = P-Ox - Q_1$	$P-Ox$
<b>Finaal</b>	$Q_1 - P_{upt} + Q'$	$Q_2 - Q' = P-Ox - Q_1 - Q'$	$P-Ox - P_{upt}$

Om de data van de initiële en finale bodemstalen in één model te kunnen brengen, werd een dummyvariabele aan het model toegevoegd als kwalitatieve factor (initieel:  $d=0$ , finaal:  $d=1$ ). Het door ferrihydriet gedesorbeerde P ( $Q_{des}$ ) werd gefit aan de hand van vergelijking 1.

$$Q_{des} = (Q_1 - d * P_{upt} + d * Q') * (1 - e^{-k_1 * t}) + (P_{Ox} - Q_1 - d * Q') * (1 - e^{-k_2 * t}), \text{ (vgl.1)}$$

waarbij  $Q_1$  de fractie is in de snel desorbeerbare pool in het initiële bodemstaal en  $P-Ox - Q_1 (= Q_2)$  de traag desorbeerbare fractie in het initiële bodemstaal,  $Q'$  is de hoeveelheid P die verplaatst van de traag naar de snel desorbeerbare pool gedurende de uitmijningsproef,  $k_1$  en  $k_2$  zijn de desorptiesnelheidsconstanten van respectievelijk  $P_1$  en  $P_2$  ( $1/u$ ), en  $t$  is de tijd ( $u$ ). Alle P-pools werden uitgedrukt als een fractie van de totale P-Ox inhoud.

#### *Modelparameters bepaald via het Lookman-model*

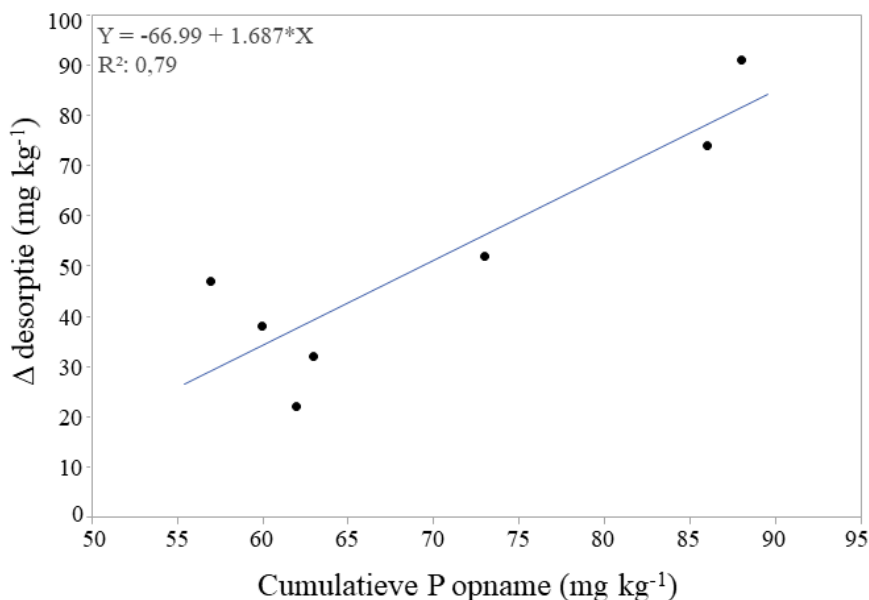
In Tabel 97 worden de parameters  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $Q_1$  en  $Q'$  per bodem weergegeven die bepaald zijn door vergelijking 1 te fitten op de desorptiedata. In het rechterdeel van de kolom worden de absolute groottes van de verschillende pools weergegeven, zowel initieel als finaal. Een gemiddelde waarde van de parameters wordt gebruikt voor het gemiddelde deel in werkpakket 2.2.

Tabel 97. Modelparameters bepaald via het Lookman-model: k1 en k2 zijn de snelheidsconstanten van de snel en traag desorbeerbare pool, Q1 is de fractie van het P-Ox gehalte dat initieel in de snel desorbeerbare pool aanwezig is, Q' is de fractie die tijdens de uitmijning door plantopname van de traag naar de snel desorbeerbare pool gaat. De absolute groottes van de pools initieel en finaal worden in het rechterdeel van de tabel weergegeven. De P-Ox waarden zijn de initiële waarden van de +N-P behandeling. in = initieel, fin = finaal (uitgemijnd in serreproef)

Bodem	$k_1 \times 10^{-3}$ / u <sup>-1</sup>	$k_2 \times 10^{-5}$ / u <sup>-1</sup>	Q <sub>1</sub> / %	Q' / %	P-Ox / mg kg <sup>-1</sup>	P <sub>1, in</sub> / mg kg <sup>-1</sup>	P <sub>2, in</sub> / mg kg <sup>-1</sup>	Q' / mg kg <sup>-1</sup>	P <sub>1, fin</sub> / mg kg <sup>-1</sup>	P <sub>2, fin</sub> / mg kg <sup>-1</sup>	P <sub>upt</sub> / mg kg <sup>-1</sup>
1	10,5	10,8	14,1	5,3	645	92	558	34	38	524	88
2	4,4	1,9	24,9	5,2	473	117	353	24	54	329	87
4	3,8	2,4	8,0	4,8	760	61	699	36	34	663	63
5	5,6	8,2	19,5	8,5	417	82	338	61	83	277	60
6	6,7	2,6	6,2	6,3	716	45	675	45	28	630	62
7	5,1	7,0	15,5	8,8	234	36	194	20	-1	174	57
8	7,9	8,3	14,1	5,7	547	77	473	31	35	442	73
<b>gemiddelde</b>	6,2	5,9	14,6	6,4	540	79	461	35	44	426	70

### Vergelijking P gedesorbeerd en cumulatieve plantopname (en $R^2$ )

Theoretisch gezien zou het verschil in cumulatief gedesorbeerd P op het laatste staalnametijdstip tussen de initiële en finale stalen van de depletieproef ( $\Delta P$ -desorptie) moeten overeenkomen met de hoeveelheid P die opgenomen is door de plant. Deze relatie wordt weergegeven in Figuur 116 ( $Y = -66,99 + 1,687X$ ) en een  $R^2$  van 0,79 wordt geobserveerd. Een vergelijking in absolute waarden tussen  $\Delta P$ -desorptie en de cumulatieve opname wordt weergegeven in Tabel 98.



Figuur 116. Het verschil in finale chemische P-desorptie tussen bodemstalen voor- en na de depletie door de plant uitgeten opzichte van de hoeveelheid P die opgenomen werd door de plant tijdens de uitmijningsproef in de serre.

Tabel 98.  $\Delta P$ -desorptie (chemisch) en cumulatieve P-opname (plant) per bodem.

Bodem	$\Delta P$ -desorptie / mg kg <sup>-1</sup>	Cumulatieve P-opname /mg kg <sup>-1</sup>
1	91	88
2	74	86
4	32	63
5	38	60
6	22	62
7	47	57
8	52	73

### Discussie

De gemodelleerde resultaten geven weer dat de plant fosfor opneemt uit een snel en een traag desorbeerbare pool. De snel desorbeerbare pool heeft een gemiddelde reactietijd van 6,7 dagen (inverse van  $k_1$ , en rekening houden met de eenheden per dag/uur:  $1/(6,2 \cdot 10^{-3} (1/u) \cdot 24 (u/dag))$ ) en een gemiddelde grootte van  $79 \text{ mg kg}^{-1}$  (als P-Ox), hetgeen meermaals de jaarlijkse gewasonttrekking is. De traag desorbeerbare pool daarentegen is gemiddeld zes maal groter dan de snelle pool, en heeft een tragere reactietijd van 706 dagen (inverse van  $k_2$ ,  $1/(5,9 \cdot 10^{-5} (1/u) \cdot 24(u/dag))$ ), hetgeen voldoende groot is om voor een aanvulling van de snel desorbeerbare pool te zorgen in een uitmijningsscenario.

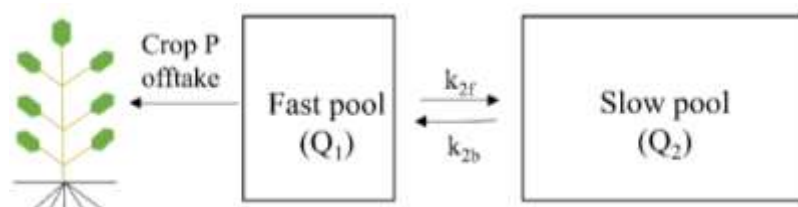
Het moment waarop deze heraanvulling te langzaam wordt, en er dus onvoldoende P beschikbaar is voor de plant, wordt bepaald via modellering in DWP 2.2 (luik 2) op basis van een gemiddelde waarde van de afgeleide parameters in dit werkpakket.

## 20.2 MODELLERING

In dit deel onderzoeken we hoe de P-beschikbaarheid in de bodem afneemt bij een negatieve bodembalans. Modelmatig willen we een prognose maken hoe in de toekomst de beschikbaarheid evolueert, de snel beschikbare fractie  $Q_1$  neemt af en planten zijn meer aangewezen op de traag beschikbare fractie  $Q_2$ . Uiteraard is de groeisnelheid van de plant hierbij belangrijk.

Het effect van de gewasgroeisnelheid op de P-opname door de plant werd gemodelleerd met een mechanistisch nutriënt-opnamemodel (Nawara, 2018) (zie ook DWP 2.2 in luik 2 voor een korte beschrijving). Dit model was gebaseerd op het bestaande Barber-Cushman model maar deze laatste werd uitgebreid met nutriënt-opnamekinetiek die afhankelijk is van de gewasgroeisnelheid, en met de hierboven beschreven P-desorptiekinetiek die de vaste stof-vloeistof verdeling van P controleert. Simulaties door het mechanistisch nutriënt-opnamemodel gaven een vrij goede overeenkomst met de gegevens van de serreproef van dit project (DWP 1.3 in luik 1). Ze toonden aan dat sneller groeiende planten (+N-behandeling) meer afhankelijk zijn van de P-desorptiekinetiek dan de traag groeiende planten (-N-behandeling). Het model, toegepast op het veld, simuleerde ook een verschil in P-behoefte tussen maïs en tarwe o.w.v. verschil in snelheid van P-opname (zie resultaten DWP 2.2). Dit model bevestigt dus de experimentele bevinding dat sneller groeiende planten minder van het historisch P kunnen opnemen dan traag groeiende planten vooraleer er opbrengstverliezen worden waargenomen.

De P-beschikbaarheid op de lange-termijn (>10 jaren) werd niet met het mechanistisch model van Nawara (2018) beschreven maar met een daarop gebaseerd vereenvoudigd empirisch model. De belangrijkste reden hiervoor is van technische aard, het mechanistisch model houdt geen rekening met tal van processen die in het veld gebeuren zoals de jaarlijkse groei en afsterven van wortels, het homogeniseren van de bodem enz. Het model dat gebruikt werd, is gebaseerd op dat van Sattari et al. (2012) (Figuur 117).



Figuur 117. Conceptuele weergave van het model (Sattari *et al.*, 2012) (aangepast) dat wordt gebruikt voor de simulatie van de P-beschikbaarheid bij een negatieve bodembalans op lange termijn. Het gewas neemt P op uit de snel reagerende pool ( $Q_1$ ) die wordt bevoorradt door de langzaam desorberende P-pool ( $Q_2$ ). De snelheidsconstante  $k_{2f}$  beschrijft de sorptie en  $k_{2b}$  beschrijft de desorptie tussen de twee pools. De opname in het gewas is  $\alpha \times P_{\text{upt, max}}$  met  $P_{\text{upt, max}}$  het P-opnamepotentiaal van een gewas en  $\alpha$  een reductiefactor afhankelijk van de  $Q_1/Q_2$ -verhouding en  $Q_1 + Q_2 = P\text{-Ox}$ .

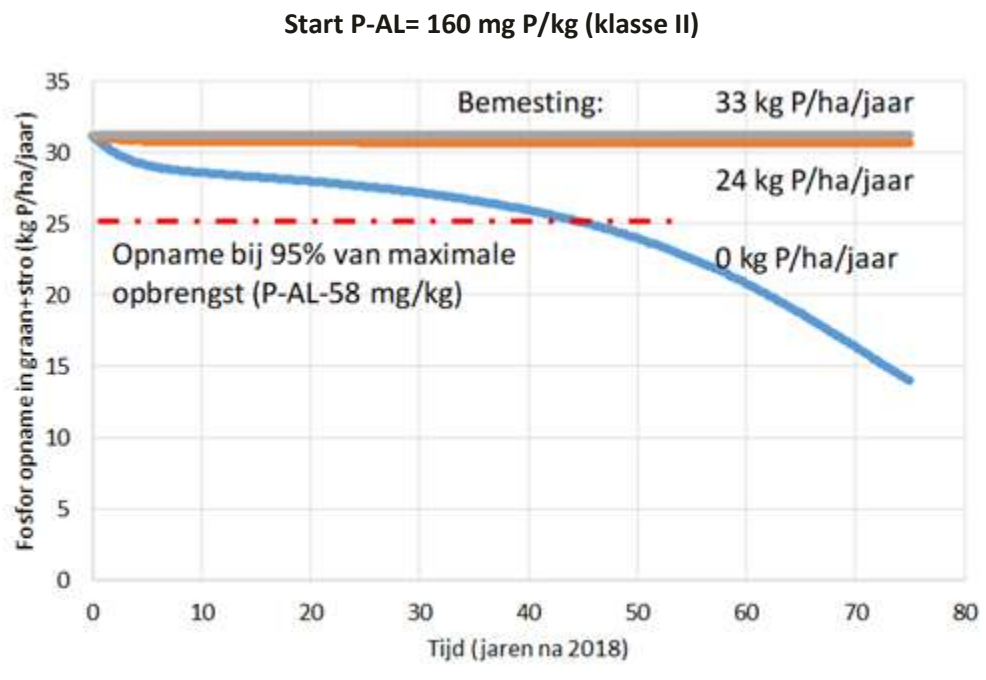
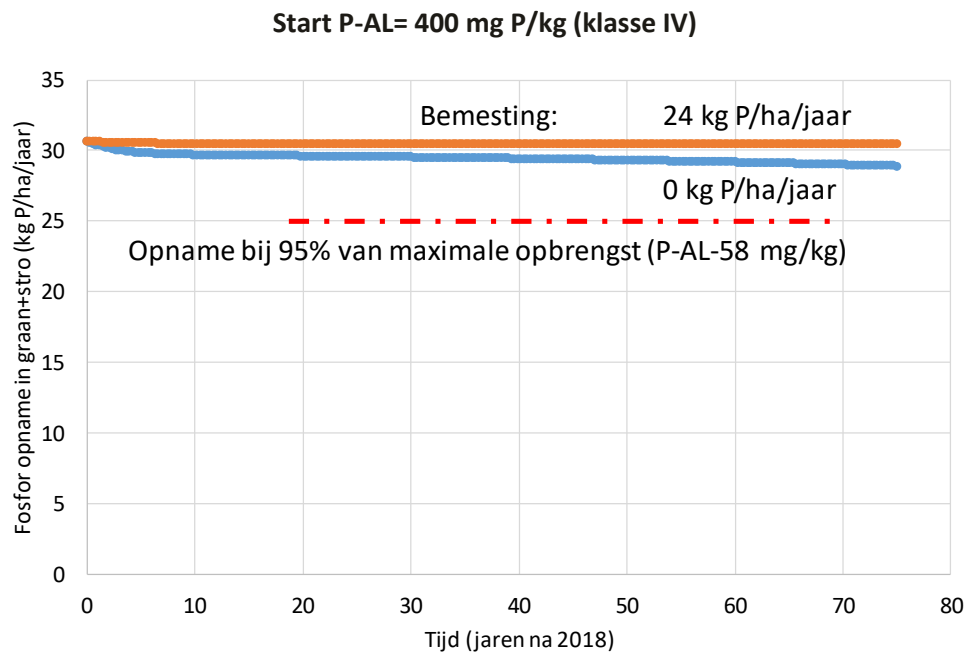
Dat empirische model werd gebruikt, beginnend met verschillende startwaarden van P-AL in de bodem en met de aanname dat planten de P opnemen uit de bovenste 45 cm van de bodem (zie hieronder). Het model werkt echter met P-Ox omdat P-AL niet alle beschikbare P omvat terwijl dat voor P-Ox wel het geval is. Steeds werd er een gemiddelde conversie genomen voor de omzetting tussen beide, dit op basis van de gemiddelde relatie:  $P\text{-AL} = -30 + 0,52 \times P\text{-Ox}$  (Nawara *et al.*, 2017) (afgeleid voor verschillende staalnamedieptes tussen 9 en 25 cm) met alle concentraties in mg P/kg bodem.

De snelheidsconstanten  $k_{2f}$  en  $k_{2b}$  waren niet diegene die waargenomen werden in het hierboven beschreven desorptie-experiment (20.1) maar werden gekalibreerd met de potproefgegevens (DWP 1.3 in luik 1), dat wil zeggen met de snelheid waarmee deze poolgroottes veranderden, in situ

gedurende de gehele proef van 500 dagen. Dit komt omdat de fluxen van P van  $Q_2$  naar  $Q_1$  in de gemiddelde bodem (niet in de rhizosfeer) in een uitputtend P-scenario in situ zeker veel langzamer zijn dan in de geagiteerde bodemsuspensies van een desorptietest. Dit hangt samen met de ruimtelijke heterogeniteit van P in de rhizosfeer die, op zijn beurt, verklaard is door de beperkte mobiliteit van P in de bodem. Als illustratie: het mechanistische model laat zien dat na 1 jaar P-opname de  $Q_1$  aan het oppervlak van de wortel volledig uitgeput is terwijl die op 1 mm van de wortel meer dan 65% van de initiële  $Q_1$  is.

In het proefschrift van Nawara (2018) wordt uitgelegd hoe  $k_{2f}$  en  $k_{2b}$  werden afgeleid; voor dit werk volstaat het te melden dat  $k_{2b} = 0,053/\text{jaar}$ , een waarde die iets groter is dan die gebruikt door Sattari et al. (2012) ( $0,04/\text{jaar}$ ). Deze is ongeveer een factor tien kleiner dan de desorptiesnelheidsconstante verkregen door de chemische desorptie, d.w.z. in omstandigheden van een zero-sink in een gehomogeniseerde suspensie. Het proefschrift van Nawara (2018) geeft ook details hoe de relatie werd gevonden tussen P-opname en de P-beschikbaarheid in de bodem, m.a.w. hoe voor tarwe de reductiefactor  $\alpha$  (Figuur 117) berekend werd in functie van de  $Q_1/Q_2$ -verhouding en  $Q_1 + Q_2 = P\text{-Ox}$ . Voor dit verslag beperken we ons tot de informatie dat dit werd afgeleid voor tarwe die in 120 dagen groeiseizoen een maximale opbrengst (graan+stro) heeft van 13 ton/ha en maximaal 34 kg P/ha opneemt ( $=P_{\text{upt}}$ ). Voor deze modellering nemen we aan dat de plantenwortels de P-opnamen uit de bovenste 45 cm (= 6000 ton droge bodem/ha). Validatie van het model met data van Gembloux (hieronder) toonde aan dat de gemeten daling in P-AL in de bovenste laag over 51 jaren uitmijnen zwaar werd overschat indien we enkel aannemen dat de bovenste 23 cm de bron zijn van P. Het is ook niet meer dan logisch om aan te nemen dat er een bijdrage is van diepere horizonten aan het plant beschikbaar P. Wat meer details hiervan staan in DWP 2.2 (luik 2).





Figuur 118. De evolutie van de P-opname in tarwe (stro+korrel) naargelang bemesting en startwaarde van de P-AL met de aanname dat P enkel uit de bovenste 45 cm van de bodem wordt gehaald

Met bovenstaand model werden vervolgens verschillende scenario's gelopen om de beschikbaarheid van P in de bodem te voorspellen over de volgende 75 jaren. De scenario's zijn zo gekozen dat ze de richtlijnen van MAP 5 benaderen en/of dat ze nagaan wat het effect is van bemesting onder de bovengrens voor het milieu die in dit project wordt voorgesteld. Dit is in onderstaande Tabel 99 weergegeven.

Tabel 99. Scenario's van bemesting om te berekenen hoe de bodembalans en P-opname (tarwe als model) evolueert in de volgende 75 jaren. De startwaarde van  $Q_1/Q_2$  is 0,17, de verhouding van de gemiddelde  $Q_1$  en  $Q_2$  ( $79/461=0,17$ , Tabel 97) waarden over de 8 Vlaamse bodems voor de start van de uitmijningsproef.

Startwaarde P-AL in 2018 (mg P/kg)	P- Klasse	bewortelings- diepte	bemesting kgP/ha/jaar	Scenario
<b>400</b>	klasse IV	45 cm	0	volledige uitmijning
			24	=55 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha/j, maximum in MAP 5 (iets lager dan jaarlijkse onttrekking)
<b>160 milieugrens</b>	= klasse II	45 cm	0	volledige uitmijning
			24	iets lager dan jaarlijkse onttrekking
			33	=75 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha/j, maximum in MAP 5

De berekeningen tonen aan dat (Figuur 118):

Startend met een sterk bemeste bodem, nu aan de ondergrens van klasse IV (P-AL): indien we voor deze situatie een volledige nulbemesting nastreven, mét ook de volledige verwijdering van stro, dan zakt de P-AL niet onder de 58 mg P/kg over de eerste 75 jaren (het zou 140 jaren duren), de kritische grens waarbij de opbrengst van tarwe daalt door P-gebrek (d.w.z. >5% daling van opbrengst; zie luik 2). Indien we de maximale P bemesting van het MAP 5 aanhouden, d.w.z. een bemesting die lager is dan de jaarlijkse onttrekking, dan is uiteraard ook geen tekort in aanbod te verwachten in de volgende 75 jaren.

Startend met de bovengrens van de streefzone, kritische milieuwaarde, P-AL=160 mg P/kg

Bij de onderhoudsbemesting, op dit moment het maximum in MAP 5 voor klasse II, is er uiteraard geen daling in opname en blijft P-Ox uiteraard op eenzelfde waarde. Aangezien P-AL mbv de conversiefactor uit P-Ox berekend wordt, blijft de gemodelleerde P-AL ook gelijk. Bij een lagere bemesting, equivalent aan 24 kg P/ha/j (55 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/j), is er een daling in P-AL van de bodem, maar geen daling in opbrengst, uiteraard wel een kleine daling in de P-opname. Bij een volledige uitmijning, met ook de volledige verwijdering van stro, verwacht het model een opbrengstdaling voor tarwe van >5% na 45 jaar. De algemene kritische P-AL voor gewassen van 110 mg /kg (ondergrens streefzone) wordt bereikt na 20 jaar (data niet getoond in de figuur).

Model verificatie (fitting). Dit gebeurde met het hoger beschreven gegeven van het proefveld in Gembloux. Daar was P-AL=178 mg P/kg in 1968 (net na de start van de proef), dit is vergelijkbaar met het hier berekende scenario van klasse II. Na 50 jaren (2018) in een nulbemesting (P0) is de gemeten P-AL gezakt in de bovenlaag naar gemiddeld 56 mg P/kg. Het model voorspelt dat dit inderdaad zakt naar 56 mg P/kg na 50 jaar, indien we op de massa bodem/ha aanpassen tot 6000 ton/ha, met een

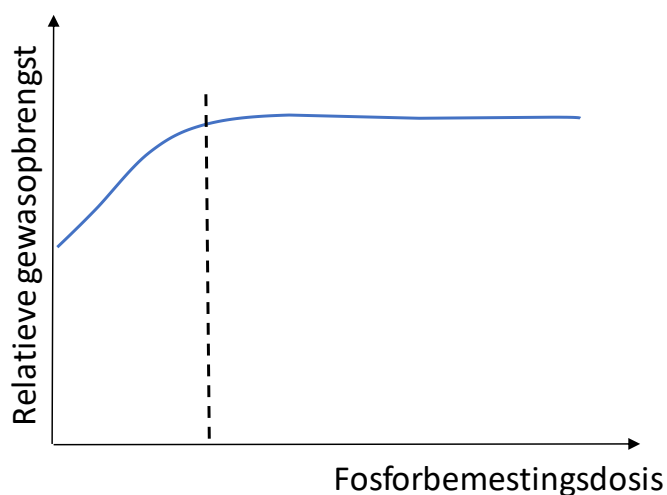
dichtheid van  $1,35 \text{ g/cm}^3$  komt dat neer op 45 cm bewortelingsdiepte. Indien we dat op 23 cm zouden laten, dan voorspelt het model dat de P-AL zou zakken tot onder 10 mg/kg, ver onder de gemeten waarde.

## 21 DWP 3.3 BEMESTINGSADVIEZEN OP KORTE TERMIJN

In DWP 3.2 werden bemestingsadviezen op lange termijn afgeleid, en dit zowel om naar de streefzone van P-AL te evolueren (19.4.2), als om in de streefzone te blijven (19.4.3). Voor P-AL lager dan de streefzonewaarden, is de benodigde cumulatieve fosforbalans om naar de streefzone te evolueren, te berekenen. Bijvoorbeeld om van 90 mg P/kg naar 110 mg P/kg te evolueren is 113 tot 324 kg P/ha nodig (afhankelijk van de tijd waarover de balans is gespreid, zie Vergelijking 9). Het is moeilijk verdedigbaar om dergelijke dosis in één keer toe te passen, dus rijst de vraag hoe deze balans gespreid moet worden in de tijd. Er zijn verschillende manieren om naar deze vraag te kijken.

### 21.1 OP BASIS VAN DE BEMESTINGSPROEVEN

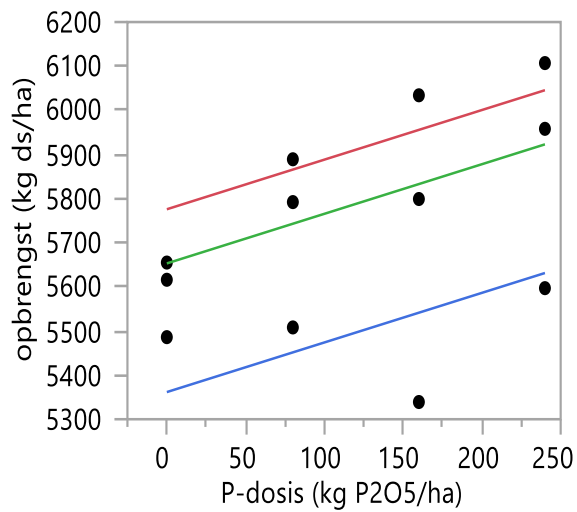
Op één jaar tijd is het niet mogelijk om een lage P-AL onmiddellijk in de streefzone te krijgen. Een landbouwer wenst echter zo weinig mogelijk opbrengstverliezen. Het is dus de vraag hoeveel fosforbemesting nodig is om bij een gegeven lage P-AL toch aanvaardbare opbrengsten te krijgen. Bemestingsadviezen op korte termijn kunnen mogelijk gebaseerd worden op bemestingsproeven waarbij toenemende relatieve opbrengst bij toenemende fosforbemestingsdosissen werd waargenomen. De bemestingsdosis waarbij de relatieve opbrengst begint af te vlakken, is dan het geschikte advies. Een hogere fosfordosis leidt immers niet tot meer opbrengst (Figuur 119).



Figuur 119. Voorbeeld van de toename van de relatieve gewasopbrengst bij toenemende fosforbemestingsdosis op een perceel met te lage fosforbeschikbaarheid. Vanaf een bepaalde bemestingsdosis (bij stippellijn) is een verdere toename van relatieve gewasopbrengst niet meer mogelijk

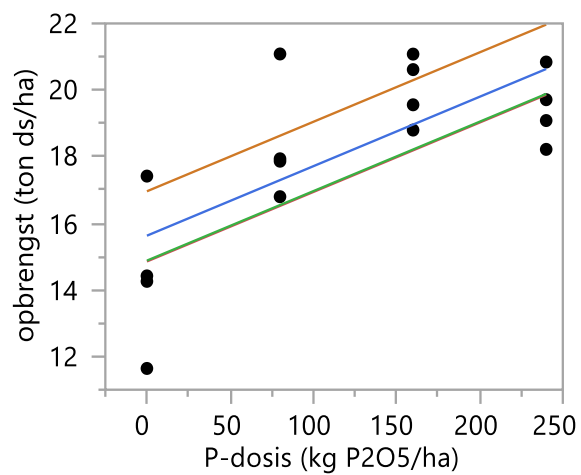
Van de 23 uitgevoerde bemestingsproeven op percelen met lage P-AL (zie luik 2, DWP 2.1) zijn er slechts vijf met een significant effect van de fosforbemestingsdosis op de opbrengst (mixed model):

1. Wintertarwe in Herfelingen (2016) bij P-AL 80 mg P/kg (Figuur 120)



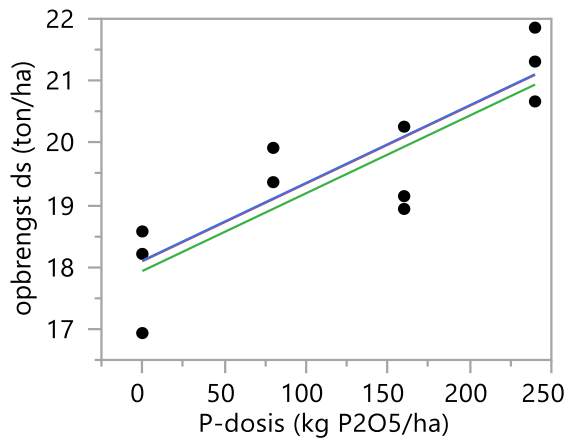
Figuur 120. Opbrengst van wintertarwe in de bemestingsproef in Herfelingen in 2016 neemt significant toe met de fosforbemestingsdosis (de 3 gekleurde lijnen stellen de lineaire fit van het mixed model voor de 3 verschillende blokken voor)

2. Maïs in Lille (2016) bij P-AL 78 mg P/kg (Figuur 121)



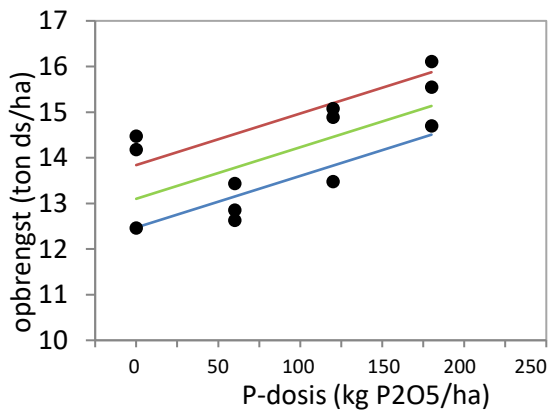
Figuur 121. Opbrengst van maïs in de bemestingsproef in Lille in 2016 neemt significant toe met de fosforbemestingsdosis (de gekleurde lijnen stellen de lineaire fit van het mixed model voor de verschillende blokken voor)

3. Maïs in Schoonaarde (2017) bij P-AL 91 mg P/kg (Figuur 122)



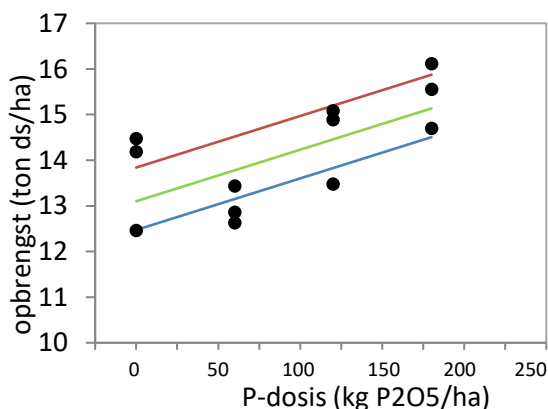
Figuur 122. Opbrengst van maïs in de bemestingsproef in Schoonaarde in 2017 neemt significant toe met de fosforbemestingsdosis (de gekleurde lijnen stellen de lineaire fit van het mixed model voor de verschillende blokken voor)

4. Aardappelen in Kessel-Lo (2017) bij P-AL 178 mg P/kg (Figuur 123)



Figuur 123. Opbrengst van aardappelen in de bemestingsproef in Kessel-Lo in 2017 neemt significant toe met de fosforbemestingsdosis (de gekleurde lijnen stellen de lineaire fit van het mixed model voor de verschillende blokken voor)

5. Aardappelen in Kruishoutem (2018) bij P-AL 74 mg P/kg (Figuur 124)



Figuur 124. Opbrengst van aardappelen in de bemestingsproef in Kruishoutem in 2018 neemt significant toe met de fosforbemestingsdosis (de gekleurde lijnen stellen de lineaire fit van het mixed model voor de verschillende blokken voor)

Op de grafieken (Figuur 120 tot Figuur 124) is visueel te zien dat de opbrengst soms lijkt af te vlakken bij toenemende fosforbemestingsdosis (eerder Mitscherlichmodel, zoals Figuur 121), terwijl er ook

blijvende toename in opbrengst bij toenemende fosforbestedingsdosis waargenomen kan worden (zonder afvlakken, andere grafieken). Op basis van deze beperkte dataset is het moeilijk een algemeen bestedingsadvies af te leiden voor korte termijn bij te lage P-AL. Wel kunnen een aantal vuistregels naar voor geschoven worden (zie 21.2).

## 21.2 VUISTREGELS VOOR FOSFORBEMESTING BIJ P-AL ONDER DE STREEFZONE

### 21.2.1 Voldoende extra fosforbesteding

Om P-AL van de bodem uiteindelijk in de streefzone te krijgen, is een positieve fosforbalans nodig (zie langetermijnsadvies in 19.4.2). Aan de MAP5-normen voor klasse I (20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jr oftewel 8,5 kg P/ha/jr meer P-afvoer dan P-aanvoer) zal dit echter nog steeds verschillende decennia duren. Een positieve fosforbalans van 20 kg P/ha/jr (oftewel +46 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jr) zal deze tijd verkorten: 3 jaar voor een toename van 10 mg P/kg, 8 jaar voor een toename van 20 mg P/kg en 14 jaar voor een toename van 30 mg P/kg. De fosforbestedingsdosis die overeenkomt met deze balans, bevindt zich tussen de tweede en de derde trap van de fosforbestedingsproeven. Op de meeste curves (Figuur 120 tot Figuur 124) is te zien dat er dan nog steeds opbrengstverhoging mogelijk is, maar dat al een belangrijke verhoging gerealiseerd kan worden.

### 21.2.2 Pas op met zouten

Hogere balansen dan +20 kg P/ha/jr kunnen mogelijk de opbrengst nog verder verhogen, maar teveel besteding kan ook negatieve gevolgen hebben door te hoge zouttoepassing.

Immers minerale meststoffen zijn anorganische zouten maar ook organische meststoffen of bodemverbeterende middelen zoals GFT- of groencompost bevatten zouten. Ze verhogen allen het zoutgehalte van de bodem. De verhoging van het zoutgehalte is afhankelijk van:

- de dosis
- gebruikte product of meststof
- de grondsoort
- het vochtgehalte
- de bufferende werking van de grond
- het tijdstip van toediening
- mate van inwerken van het product (oppervlakkig toedienen, onderwerken in de bovenste 10 cm of de volledige bouwlaag)

De reactie van planten op saliniteit of hun zoutgevoeligheid verschilt tussen soorten en zelfs tussen cultivars binnen een bepaalde soort. Saliniteit kan plantengroei en –productie sterk beïnvloeden en kan een serieus verlies aan opbrengst met zich meebrengen. Een gewas is ook niet in alle groeistadia even gevoelig voor zoutstress. Tijdens het kiemen van de zaden en bij jonge zaailingen zal de zouttolerantie veel lager liggen.

Zoutschade in de akkerbouw, met andere woorden in open lucht, kan voorkomen door hoge besteding te kort voor de zaai. In het zaaibed is de zoutconcentratie te hoog, de osmotische potentiaal stijgt en de bodemwaterpotentiaal vermindert waardoor kiemplantjes het bijzonder moeilijk krijgen. Dergelijk effect kan bijkomend versterkt worden door droge weers- en bodemomstandigheden.

Zoutschade kan voorkomen worden door de keuze van de meststof, dosis en tijdstip van toedienen. Bij toediening van organische meststoffen of bodemverbeterende middelen in het najaar kunnen eventuele balastzouten zoals Cl<sup>-</sup> tijdens de winter verminderen. Bij rijenbesteding en besteding dicht bij de kiem moet het zoutgehalte van de meststof lager zijn.

Bij hogere dosissen (bijv. 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, hoogste trap uit de bemestingsproeven in DWP 2.1) moet zeker ook gezien worden naar voedingselementen die niet opgenomen zijn in de mestwetgeving maar wel verzoutend kunnen werken, zoals K en Na. Bijkomende factoren zoals een beperkte werkzaamheid waarmee rekening gehouden wordt en waardoor de dosis verhoogt, resulteren ook in een verhoogde aanvoer van K en Na.

Tabel 100. Relatieve zouttolerantie van verschillende gewassen (Maas, 1985; Verlinden and Callens, 2005)

Zouttolerantie	Granen	Akkerbouwgewassen	Groenten	Fruitbomen
<b>Tolerant</b>	Gerst	Suikerbiet	Asperge	
<b>Matig tolerant</b>	Rogge		Courgette	
	Tarwe	Aardappel	Spinazie	
<b>Matig gevoelig</b>	Maïs		Kool	
			Komkommer	
			Paprika	
			Radijs	
			Selderij	
			Sla	
			Tomaat	
<b>Gevoelig</b>			Boon	Appel
			Erwt	Kers
			Ui	Peer
			Wortel	Pruim

Hou rekening met een fosforwerkingscoëfficiënt

In de literatuurstudie van DWP 3.6 (bijlage 4) werden werkingscoëfficiënten (kunstmestequivalent, KME) afgeleid voor verschillende bemestingstypes (Tabel 101). Het advies dat opgesteld is voor snelwerkende kunstmest, moet gecorrigeerd worden voor deze werkingscoëfficiënten door het advies te delen door de werkingscoëfficiënt. Let op: deze werkingscoëfficiënten mogen enkel in rekening worden gebracht voor bemestingsadvies op korte termijn, dus niet voor de evolutie naar de streefzone.

### 21.2.3 Streef naar een optimale pH

Uit de afleiding van de minimale P-AL voor optimale gewasopbrengst was reeds duidelijk dat bij optimale bodem-pH een lagere P-AL volstaat (zie luik 2, DWP 2.1). Terwijl het jaren kan duren voor P-AL de landbouwkundig minimale waarde bereikt, is een suboptimale pH, en onrechtstreeks dus ook een betere fosforvoorziening voor het gewas, op relatief korte termijn te bewerkstelligen door bijvoorbeeld te bekalken.

### 21.2.4 Verdeel de fosforbemesting en gewassen wijs over de rotatie

Als een landbouwer bezig is met een te laag bodemfosforgehalte op te krikken, kan hij er voor kiezen om de toegelaten beperkte fosforbemesting op het perceel te concentreren op de fosforgevoelige gewassen (vooral maïs en aardappel, zie DWP 2.1 in luik 2). Past de landbouwer elk jaar fosforbemesting toe (bijvoorbeeld via dierlijke mest), dan is het interessant om de minst



fosforgevoelige gewassen eerst in de rotatie te plaatsen. De fosforgevoelige gewassen komen dan later in de rotatie, wanneer het fosforgehalte in de bodem reeds wat toegenomen is door de positieve fosforbalans in de voorbije jaren.

### 21.2.5 Pas rijenbemesting (of andere bemestingsplaatsing) toe

De fosforbemestingsdosis lokaal in de buurt van de wortels verhogen, zonder te hoge totale fosforbemestingsdosis toe te passen, kan via plaatsbemesting, zoals rijenbemesting. Dit is vooral interessant voor gewassen met een beperkt wortelstelsel, zoals bij aardappelen, maar ook bij maïs in het begin van de ontwikkeling (door toepassing van startfosfor). Rijenbemesting kan ook via dierlijke bemesting toegepast worden, zoals reeds uitgevoerd voor aardappelen (van Geel, 2012). Bij maïs kan dit het gebruik van startfosfor vervangen zonder opbrengstdaling (Schröder *et al.*, 1997; Federolf *et al.*, 2016).

Tabel 101. Afgeleide algemene KME-waarden (kunstmestequivalent, bemestende waarde op korte termijn) voor verschillende bemestingsproducten

Mesttype	KME (%)
Struviet	70 (hoge bodem-pH) tot 100 (lage bodem-pH)
Slakkenmeel	50
Rotsfosfaat en hydroxyapatiet	20
Dierlijke mest	90
Compost	50
Digestaat	60 (gedroogd) – 90 (ruw)
Afvalwaterslib	30
Slachtafval	Variabel
Assen	Variabel
Biochar	60

### 21.2.6 Goed bodemmanagement

Een goede bodemstructuur is belangrijk zodat wortels zich goed kunnen ontwikkelen om op zoek te gaan naar de aanwezige bodemfosfor. Een voldoende bodemvochtigheid is belangrijk voor fosforopname. Er kan gewerkt worden aan een voldoende waterbergend vermogen, door bijvoorbeeld het organisch stofgehalte in de bodem te verhogen.

Daarnaast kunnen via goed bodemmanagement ook de omstandigheden geoptimaliseerd worden voor bodemeigen organismen die de fosforbeschikbaarheid voor het gewas kunnen verhogen, zoals mycorrhizae. Deze schimmels leven in symbiose met de wortels van talrijke gewassen, maar zijn gevoelig voor fungiciden, ploegen en grondontsmetting. Regenwormen kunnen de fosforbeschikbaarheid ook verhogen en kunnen gestimuleerd worden door bekalken en reductie van de groundbewerking.

### 21.2.7 Ploeg niet te diep

Bij diep ploegen zal fosforarme grond uit de diepere bodemlagen gemengd worden met de relatief fosforrijkere bovenlagen, wat resulteert in een daling in P-AL van de nieuwe toplaag. Dit kan vooral voor de ondiep wortelende gewassen (bijvoorbeeld aardappelen) een probleem vormen.

### **21.2.8 Bemestingstijdstip**

Hoe meer tijd tussen het moment van bemesten en plantopname, hoe meer tijd de bodem heeft om de fosforbemesting vast te leggen en minder beschikbaar te maken. Fosforbemesting wordt in het geval van te lage P-AL dus best zo kort mogelijk voor of tijdens de teelt toegepast. Voor het milieu is het van belang om de bemesting niet kort voor een regenbui uit te voeren.

## 22 DWP 3.4: FOSFOR DIEPER DAN DE BOUWLAAG

De streefzones voor de P-AL zijn opgesteld op basis van fosforanalyses van de laag 0-23/25 cm (ondergrens, kritische waarde voor het gewas) of 0-30 cm (bovengrens, kritische waarde voor het milieu). Het is echter mogelijk dat ook onder 30 cm diepte nog een aanzienlijke fosforpool aanwezig is. In dit deelwerkpakket wordt geïnventariseerd in welke mate er een aangerijkte fosforpool aanwezig is in de diepere lagen, met name onder de bouwvoor van de landbouwpercelen.

Om de grootte van de dieper liggende fosforpools te duiden werden 200 percelen geselecteerd. Deze percelen zijn verspreid over de verschillende landbouwstreken. Van deze percelen is op de bodemlagen 0-30 cm, 30-60 cm en 60-90 cm het fosforgehalte bepaald met het ammoniumlactaatextract, het oxalaatextract en het 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-extract. De gemiddelde fosforgehaltes bepaald met de drie vermelde extracten worden getoond in Tabel 102. Bij deze doorrekening werden waarden onder de bepalingsgrens vervangen door de helft van de bepalingsgrens (Tabel 103).

Tabel 102. Gemiddeld fosforgehalte\* per bodemlaag in functie van het gekozen extractiemiddel

Bodemlaag	P-AL (mg/kg)	Pox (mg/kg)	P-CaCl <sub>2</sub> 0,01M (mg/kg)
0-30 cm	304	670	3,7
30-60 cm	153	388	1,1
60-90 cm	76	223	0,6

\* waarden onder de bepalingsgrens worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens (Tabel 103)

Tabel 103. Overzicht per extractiemethode van de P-bepalingsgrens en de helft van de bepalingsgrens waarmee gerekend wordt wanneer waarden onder de bepalingsgrens worden gemeten

Extract	Bepalingsgrens	½ bepalingsgrens
Ammoniumlactaat	40 mg/kg	20 mg/kg
Oxalaat	25 mg/kg	12 mg/kg
0,01M CaCl <sub>2</sub>	1 mg/kg	0,5 mg/kg

De kleiner wordende gehalten in de diepere lagen alsook de “zachtheid” van het extractiemiddel blijken duidelijk uit het aandeel stalen waarin het P-gehalte beneden de bepalingsgrens lag (Tabel 104).

Tabel 104. Percentage stalen per extractiemethode en bodemlaag waarin het fosforgehalte onder de respectievelijke bepalingsgrens (cfr Tabel 103) lag

Bodemlaag	P-AL	Pox	P-CaCl <sub>2</sub> 0,01M
0-30 cm	0,5	0,0	7,5
30-60 cm	9,0	0,0	64,5
60-90 cm	33,0	0,5	92,0

Voor het oxalaatextract lagen nagenoeg alle fosforgehaltes binnen meetbereik. Slechts op 1 van de 200 geselecteerde percelen lag het fosforgehalte in de onderlaag van 60-90 cm onder de bepalingsgrens. Met het ammoniumlactaatextract was een betrouwbare fosforbepaling in de bovenlaag van 0-30 cm geen probleem. In de bodemlaag van 30-60 cm bleek het P-AL-gehalte zich reeds op 9% van de percelen onder de bepalingsgrens te situeren. Op één derde van de percelen kon in de onderlaag van 60-90 cm met onvoldoende zekerheid een correcte P-AL-waarde worden gemeten. Met het 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-extract bleek het fosforgehalte in de bovenlaag van 0-30 cm zelfs in 7,5% van de percelen reeds te beperkt te zijn en beneden bepalingsgrens te liggen. In de diepere bodemlagen 30-60 en 60-90 cm konden slechts op respectievelijk 35% en 8% van de percelen meetresultaten met voldoende zekerheid getoond worden. Omwille van het grote aantal stalen beneden bepalingsgrens en het snel bereiken van de bepalingsgrens in het 0,01M CaCl<sub>2</sub>-extract, is het belang van fosfor in de ondergrond enkel verder uitgediept in functie van het ammoniumlactaat- en oxalaatextract.

## 22.1 AMMONIUMLACTAAT

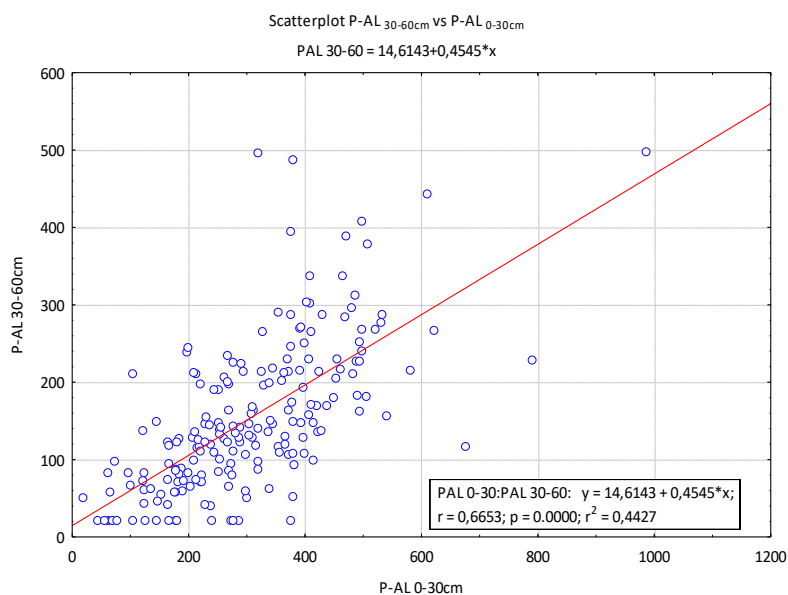
Het gemiddelde P-AL-gehalte in de bodemlaag 0-30 cm van de 200 geselecteerde percelen bedraagt 304 mg/kg droge grond, gaande van bepalingsgrens tot 988 mg P/kg droge grond (Tabel 105). De onderlagen zijn duidelijk armer aan fosfor, toch tonen de maximale gehalten gemeten in deze lagen (500 en 450 mg P-AL/kg droge grond) dat deze niet mogen onderschat worden.

Tabel 105. Karakterisering P-AL (mg/kg droge grond) in het bodemprofiel tot 90 cm

Bodemlaag	Gemiddeld	Minimum*	Maximum	Stdev
0-30 cm	304	20	988	142
30-60 cm	153	20	496	97
60-90 cm	76	20	447	65

\* waarden onder de bepalingsgrens (P-AL: 40 mg/kg droge grond) worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens (20 mg/kg droge grond)

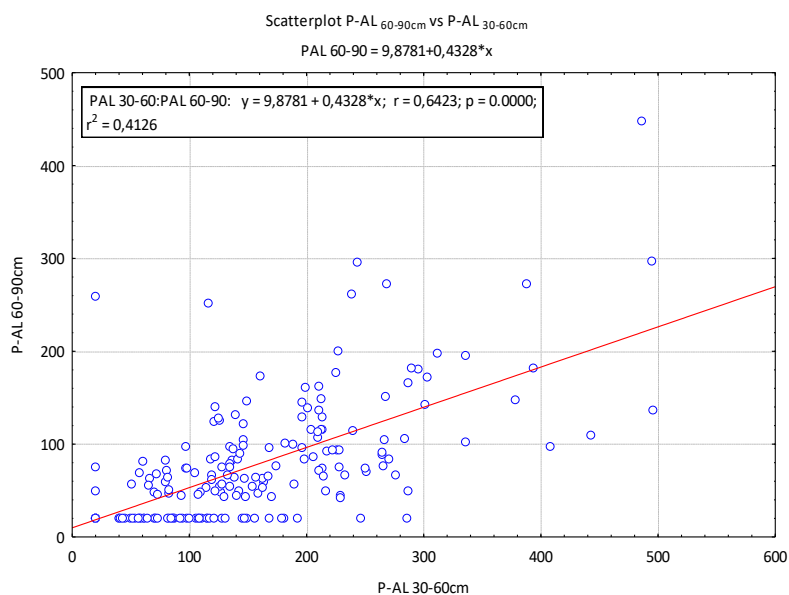
Uit Tabel 105 blijkt dat het P-AL-gehalte in de bodemlaag 30-60 cm ruwweg de helft is van het P-AL-gehalte in de bovenste 30 cm. Deze ruwe benadering wordt bevestigd in Figuur 125 waarin het P-AL-gehalte in de bodemlaag 30-60 cm wordt geplot ten opzichte van het P-AL-gehalte in de bovenlaag 0-30 cm. De correlatie tussen beide fosforgehaltes is statistisch significant ( $p < 0.05$ ) en het gefitte lineaire model verklaart 44% van de variantie.



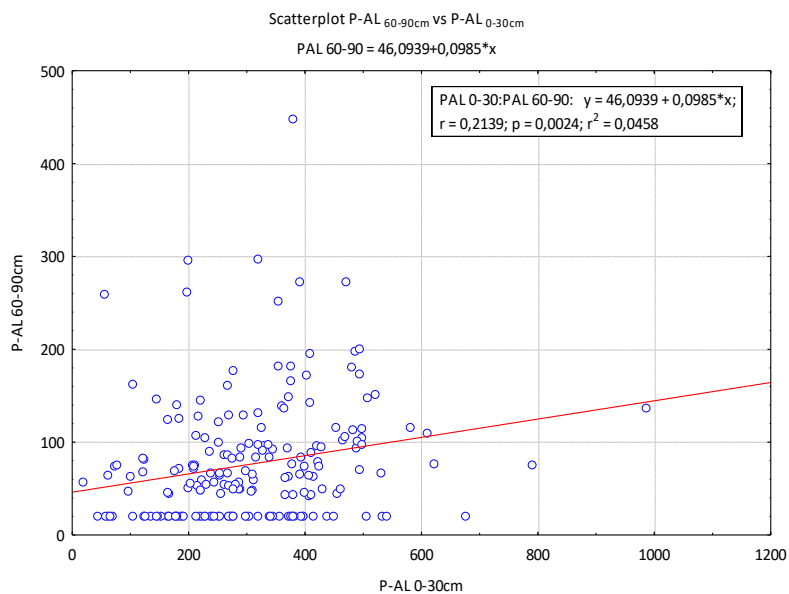
Figuur 125. P-AL (mg/kg droge grond) in de bodemlaag 30-60 cm (P-AL 30-60cm) in functie van P-AL (mg/kg droge grond) in de bodemlaag 0-30 cm (P-AL 0-30cm) op 200 geselecteerde percelen.

Ook van de bodemlaag 30-60 cm naar de bodemlaag 60-90 cm wordt ongeveer een halvering van het P-AL-gehalte vastgesteld op de 200 geselecteerde percelen. Het P-AL-gehalte in de bodemlaag 60-90 cm wordt geplot in functie van het P-AL-gehalte in de bodemlaag 30-60 cm in Figuur 126. De correlatie tussen het P-AL-gehalte in beide onderlagen is eveneens statistisch significant ( $p < 0,05$ ). Het gefitte lineaire model verklaart 41% van de variantie. Het P-AL-gehalte in de bovenlaag 0-30 cm en het P-AL-gehalte in de onderlaag 60-90 cm zijn ook statistisch significant gecorreleerd maar het gefitte lineaire model verklaart slechts 5 % van de variantie (Figuur 127). Deze mindere verklaring wordt mede veroorzaakt door het toenemend aantal stalen waarvan het P-AL-gehalte zich onder de bepalingsgrens situeert.

In functie van de textuur kan dit beeld enigszins afwijken. De 200 geselecteerde percelen waren in hoofdzaak zand- en zandleempercelen. Percelen op leem of klei waren minder vertegenwoordigd (Tabel 106). Deze verdeling is mede bepaald door de beginpopulatie waaruit de percelen zijn geselecteerd. De verdere bespreking beperkt zich voornamelijk tot zand- en zandleempercelen gezien het beperkte aantal leem- en kleipercelen.



Figuur 126. P-AL (mg/kg droge grond) in de bodemlaag 60-90 cm (P-AL 60-90cm) in functie van P-AL (mg/kg droge grond) in de bodemlaag 30-60 cm (P-AL 30-60cm) op 200 geselecteerde percelen



Figuur 127. P-AL (mg/kg droge grond) in de bodemlaag 60-90 cm (P-AL 60-90cm) in functie van P-AL (mg/kg droge grond) in de bodemlaag 0-30 cm (P-AL 0-30cm) op 200 geselecteerde percelen

Tabel 106. Verdeling van de 200 geselecteerde percelen in functie van de textuur

Textuur	Aantal percelen
Zand	117
Zandleem	61
Leem	6
Klei	16

Net als in de totale populatie lijkt ook op specifiek op zandtextuur de P-AL-waarde in de bodemlagen 30-60 en 60-90 cm te kunnen benaderd worden als zijnde de helft van de P-AL-waarde in de bodemlaag erboven zijnde 0-30 en 30-60 cm (Tabel 107, Tabel 108). In Figuur 128 (links-boven) blijkt ook op zandbodems de P-AL-waarde in de bodemlaag 30-60 cm statistisch significant gecorreleerd te zijn met de P-AL-waarde in de toplaag 0-30 cm. De lineaire fit verklaart 33% van de variantie. Ook de correlatie tussen de P-AL-waarde van de bodemlagen 60-90 en 30-60 cm op zandbodems is duidelijk. De correlatie is statistisch significant ( $p < 0,05$ ) en de lineaire fit verklaart 39% van de variantie (Figuur 128; links midden). Het verband tussen de P-AL-waarde in de toplaag van 0-30 cm en de P-AL-waarde in de onderlaag 60-90 cm is minder duidelijk. Deze correlatie is onder andere door het grotere aantal waarden beneden de bepalingsgrens niet statistisch significant ( $p = 0,20$ ) (Figuur 128; links-onder).

Tabel 107. Karakterisering P-AL (mg/kg droge grond) in het bodemprofiel tot 90 cm per bodemtype.

Bodemlaag	Gemiddeld	Zand	Zandleem	Leem	Klei
0-30 cm	304	307	310	251	286
30-60 cm	153	165	136	76	157
60-90 cm	76	85	58	37	91

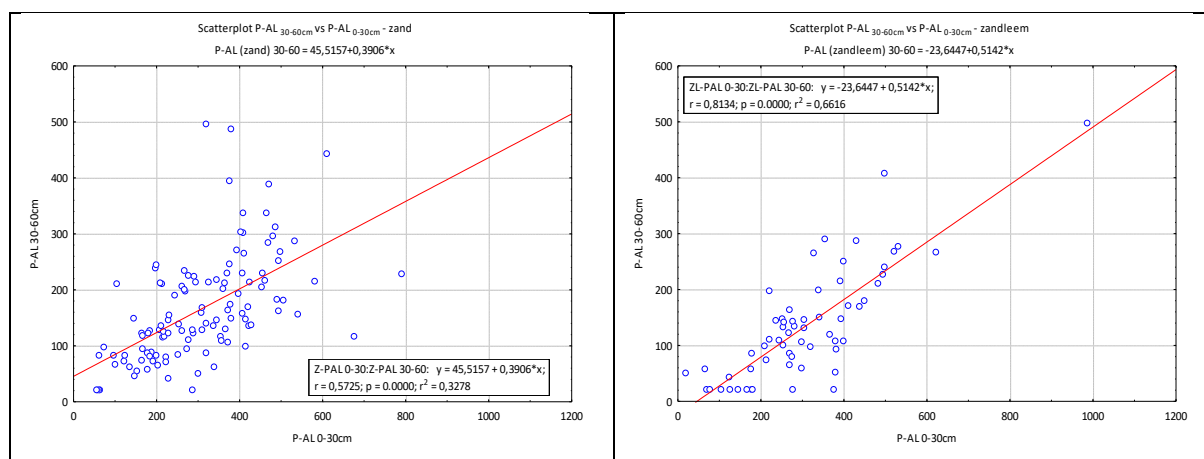
\* waarden onder de bepalingsgrens worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens

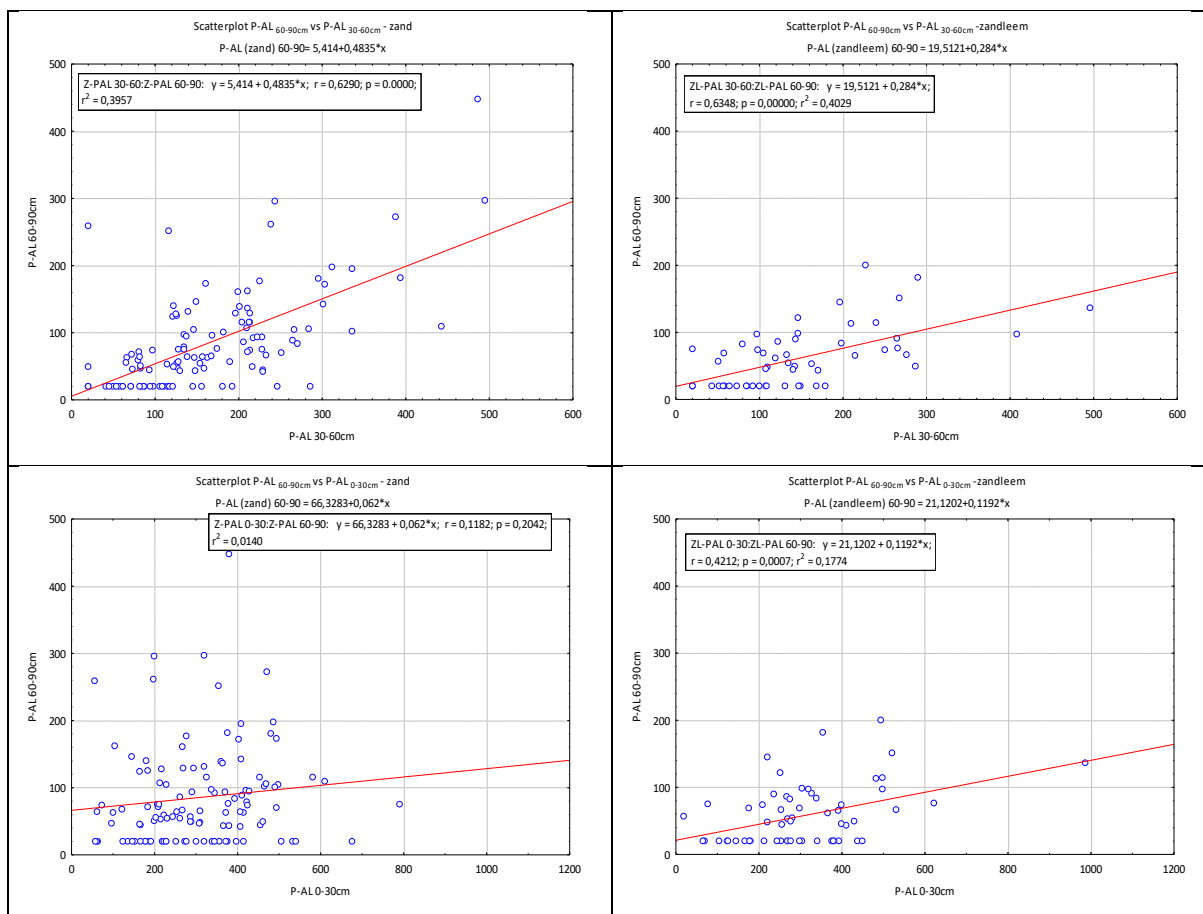
De P-AL-waarde in de bodemlaag 0-30 cm op zand- en zandleempercelen is vergelijkbaar (Tabel 107, Tabel 108 en Tabel 109). In de onderlagen 30-60 cm en 60-90 cm lijken de P-AL-waarden op zandpercelen hoger te liggen.

Tabel 108. Karakterisering P-AL (mg/kg droge grond) in het bodemprofiel tot 90 cm op zand.

Bodemlaag	Gemiddeld	Minimum*	Maximum	Stdev
0-30 cm	307	56	792	140
30-60 cm	165	20	495	95
60-90 cm	85	20	447	73

\* waarden onder de bepalingsgrens worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens





Figuur 128. P-AL (mg/kg droge grond) in de bodemlaag 30-60 cm (P-AL 30-60cm) in functie van P-AL in de bodemlaag 0-30 cm (P-AL 0-30cm) (boven); P-AL in de bodemlaag 60-90 cm (P-AL 60-90cm) in functie van P-AL in de bodemlaag 30-60 cm (P-AL 30-60cm) (midden); P-AL in de bodemlaag 60-90 cm (P-AL 60-90cm) in functie van P-AL in de bodemlaag 0-30 cm (P-AL 0-30cm) (onder) op zandpercelen(links) en zandleempercelen (rechts)

Op zandleembodems zijn de P-AL-waarden uit de verschillende bodemlagen significant gecorreleerd ( $p < 0,05$ ) (Figuur 128; rechts). De lineaire gefitte relatie tussen de P-AL-waarde in de bodemlaag 30-60 cm en de P-AL-waarde in de bodemlaag 0-30 cm verklaarde 66% van de variantie. De lineair gefitte relatie tussen de P-AL-waarde in de bodemlaag 60-90 cm en de P-AL-waarde in de bodemlaag 30-60 cm verklaarde 40% van de variantie. De P-AL-waarden in de bovenste en onderste 30 cm van het bodemprofiel tot 90 cm zijn statistisch significant gecorreleerd maar het lineaire model gefit door de puntenwolk verklaart slechts 18 % van de variantie.

Tabel 109. Karakterisering P-AL (mg/kg droge grond) in het bodemprofiel tot 90 cm op zandleem

Bodemlaag	Gemiddeld	Minimum*	Maximum	Stdev
0-30 cm	310	20	988	156
30-60 cm	136	20	496	98
60-90 cm	58	20	200	44

\* waarden onder de bepalingsgrens worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens

Om tevens inzicht te hebben in de hoeveelheid P die per hectare in het profiel wordt gemeten met het ammoniumlactaatextract is het P-AL-gehalte met behulp van het schijnbaar soortelijk gewicht omgerekend naar kg P/ha (Tabel 110). Voor de zandpercelen is voor de bodemlaag 0-30 cm, zoals bepaald in het BAM, gerekend met een dichtheid van  $1250 \text{ kg/m}^3$ . Voor de andere percelen werd voor de omrekening van het fosforgehalte in de bovenste 30 cm een dichtheid van  $1450 \text{ kg/m}^3$  gebruikt.

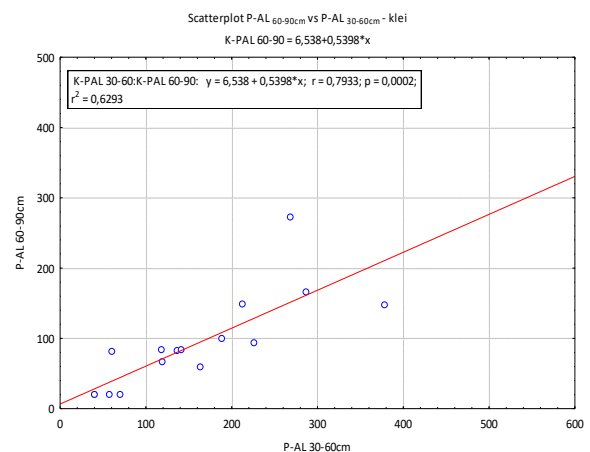
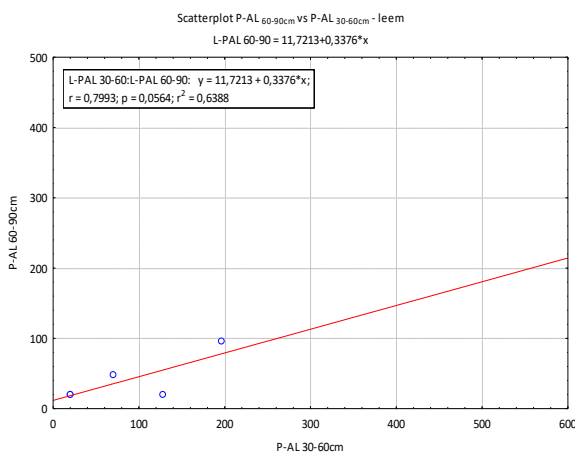
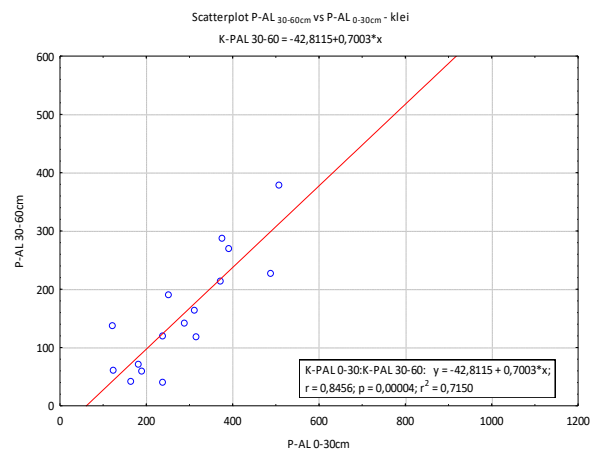
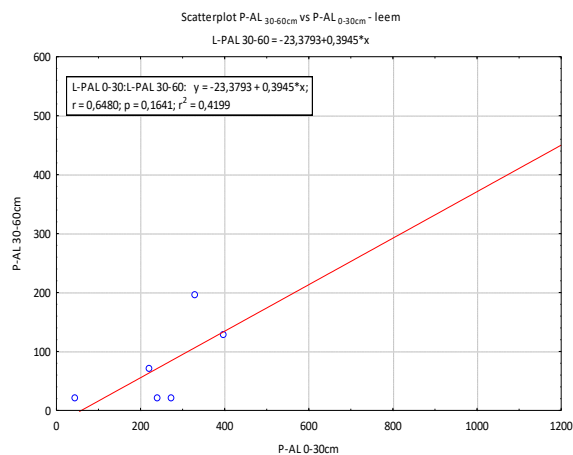


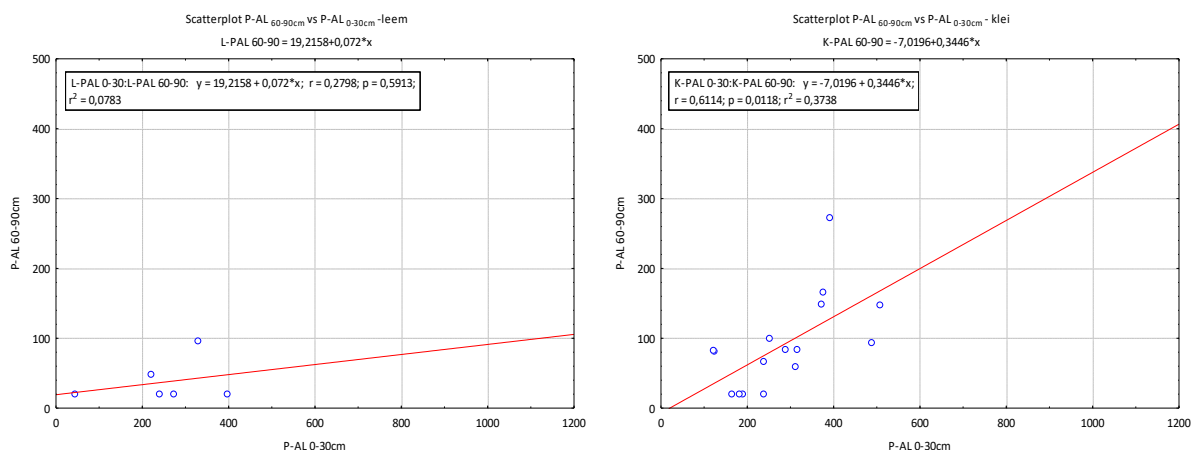
Voor de onderliggende bodemlagen, dieper dan 30 cm, is zonder onderscheid in bodemtextuur een dichtheid van 1500 kg/m<sup>3</sup> gehanteerd.

Tabel 110. Fosforreserve bepaald met het ammoniumlactaatextract (kg P/ha) in het bodemprofiel tot 90 cm per bodemtype

Bodemlaag	Gemiddeld	Zand	Zandleem	Leem	Klei
0-30 cm	1216	1150	1346	1093	1242
30-60 cm	688	744	610	341	707
60-90 cm	342	384	261	168	411
0-90 cm	2246	2278	2217	1602	2360

Uit Tabel 110 blijkt dat gemiddeld 54% van de totale P-reserve in het profiel tot 90 cm zich situeert in de bovenste 30 cm. Het aandeel in de bovenste bodemlaag varieert van gemiddeld 50% op zandpercelen tot 68% op de leempercelen. Dit impliceert het belang van de fosfor in de onderlagen. Op de zandpercelen bijvoorbeeld zit in de laag 30-90 gemiddeld nog evenveel fosfor als in de bovenste 30 cm.





Figuur 129. P-AL (mg/kg droge grond) in de bodemlaag 30-60 cm (P-AL 30-60cm) in functie van P-AL in de bodemlaag 0-30 cm (P-AL 0-30cm) (boven); P-AL in de bodemlaag 60-90 cm (P-AL 60-90cm) in functie van P-AL in de bodemlaag 30-60 cm (P-AL 30-60cm) (midden); P-AL in de bodemlaag 60-90 cm (P-AL 60-90cm) in functie van P-AL in de bodemlaag 0-30 cm (P-AL 0-30cm) (onder) op leempercelen(links) en kleipercelen (rechts)

## 22.2 P-OX

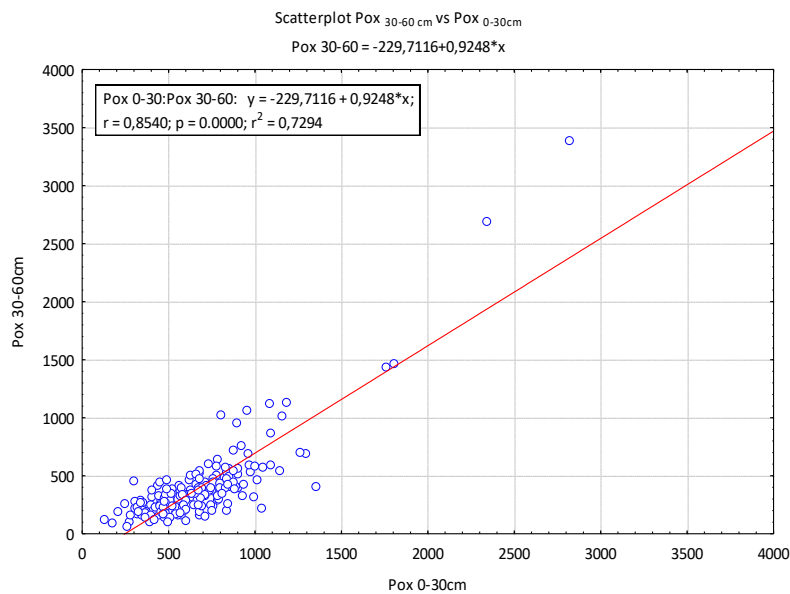
Op de 200 percelen werd in de bodemlaag van 0-30 cm gemiddeld 670 mg P/kg (Tabel 111) gemeten. In de bodemlaag eronder van 30-60 cm bedraagt het P-oxalaatgehalte gemiddeld 388 mg P/kg. In de onderlaag van 60-90 cm wordt gemiddeld 223 mg P/kg gemeten.

Tabel 111. Karakterisering P-oxalaat (mg/kg) in het bodemprofiel tot 90 cm

Bodemlaag	Gemiddeld	Minimum*	Maximum	Stdev
0-30 cm	670	133	2821	319
30-60 cm	388	56	3385	347
60-90 cm	223	12	1699	233

\* waarden onder de bepalingsgrens (P-oxalaat: 25 mg/kg) worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens (12 mg/kg)

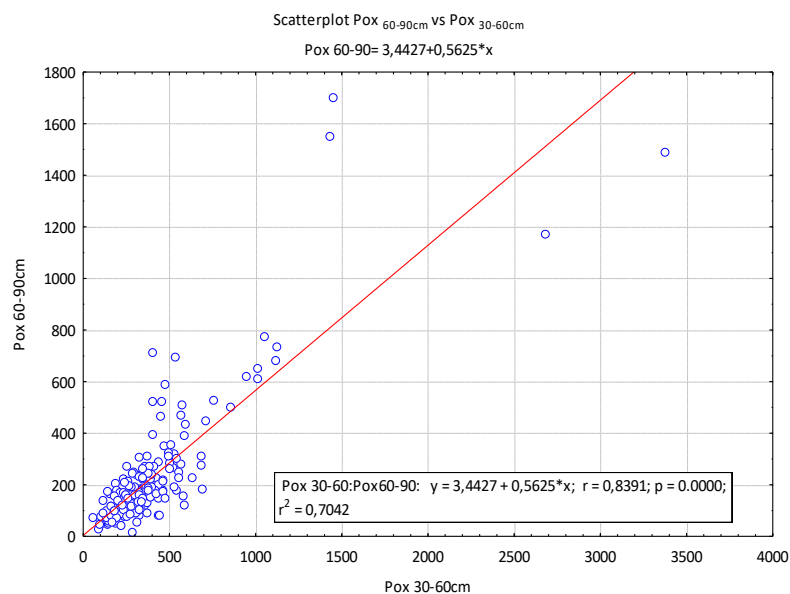
Op de 200 geselecteerde percelen blijkt een sterke en statistisch significante correlatie tussen het P-oxalaatgehalte in de bodemlagen 0-30 cm en 30-60 cm (Figuur 130). De lineaire fit verklaart 73% van



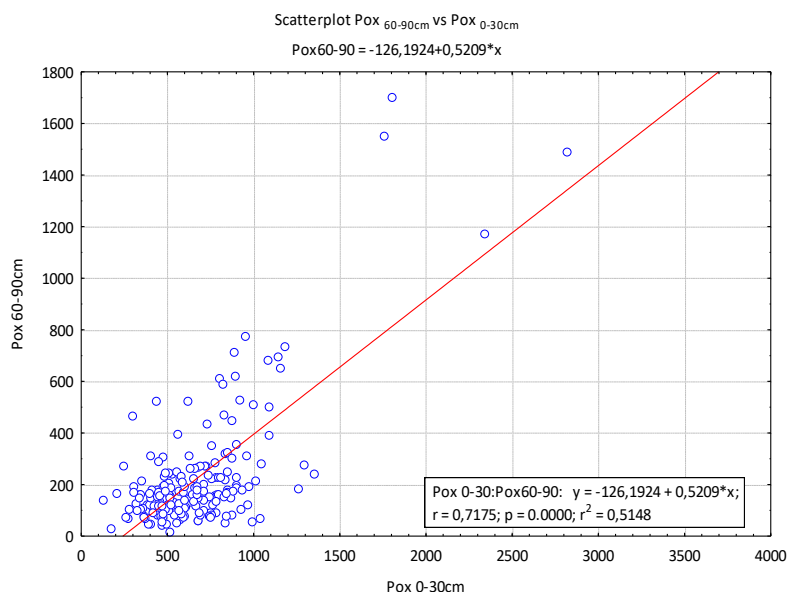
de variantie.

Figuur 130. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 30-60 cm (Pox 30-60cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 0-30 cm (Pox 0-30cm) op 200 geselecteerde percelen

Het P-oxalaatgehalte in de bodemlaag 60-90 cm is statistisch significant gecorreleerd met de P-oxalaatgehaltenes in de bodemlagen 0-30 cm (Figuur 132) en 30-60 cm (Figuur 131). De lineaire fit door de puntenwolken verklaart respectievelijk 51 en 70% van de variantie.



Figuur 131. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 60-90 cm (Pox 60-90cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 30-60 cm (Pox 30-60cm) op 200 geselecteerde percelen



Figuur 132. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 60-90 cm (Pox 60-90cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 0-30 cm (Pox 0-30cm) op 200 geselecteerde percelen

Op de zandpercelen werden gemiddeld hogere P-oxalaatwaarden gemeten in de bovenste 60 cm dan op de andere bodemtexturen (Tabel 112). De verhoudingen tussen de P-oxalaatgehaltes in de verschillende lagen zijn vergelijkbaar op zand- en zandleempercelen.

Tabel 112. Karakterisering P-oxalaat (mg/kg) in het bodemprofiel tot 90 cm per bodemtype

Bodemlaag	Gemiddeld	Zand	Zandleem	Leem	Klei
0-30 cm	670	725	611	543	518
30-60 cm	388	422	357	301	307
60-90 cm	223	239	192	254	208

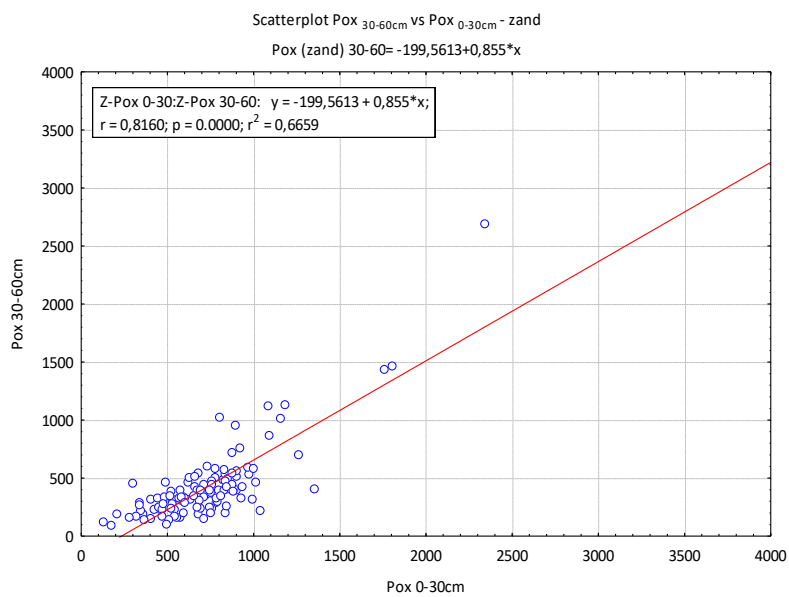
\* waarden onder de bepalingsgrens worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens

Op de zandpercelen werden in de bodemlaag 0-30 cm P-oxalaatwaarden van 133 tot 2344 mg/kg gemeten. Het gemiddelde P-oxalaatgehalte in de bodemlaag 30-60 cm ligt gemiddeld 300 mg/kg lager maar het maximale gehalte in deze laag lag zelfs hoger dan het maximale gehalte gemeten in de bovenste bodemlaag (Tabel 113).

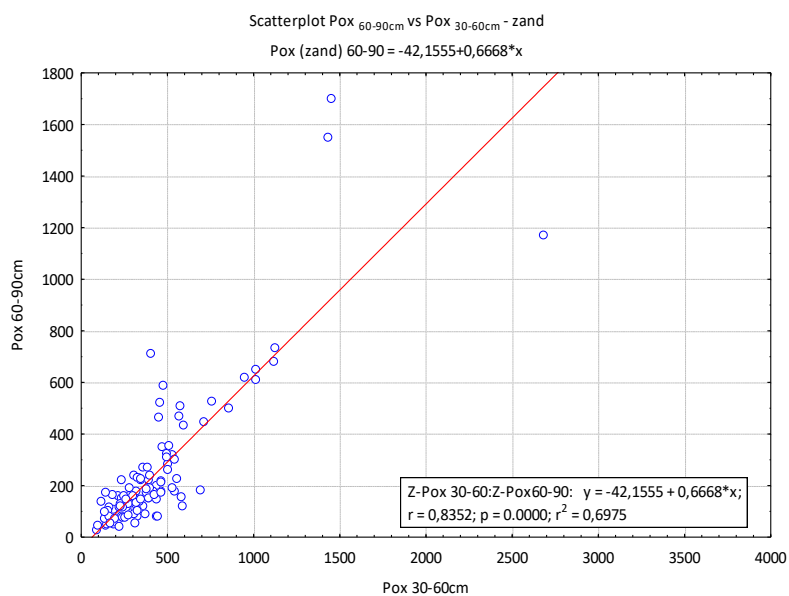
Tabel 113. Karakterisering P-oxalaat (mg/kg) in het bodemprofiel tot 90 cm op zand

Bodemlaag	Gemiddeld	Minimum*	Maximum	Stdev
0-30 cm	725	133	2344	310
30-60 cm	422	90	2691	322
60-90 cm	239	28	1699	257

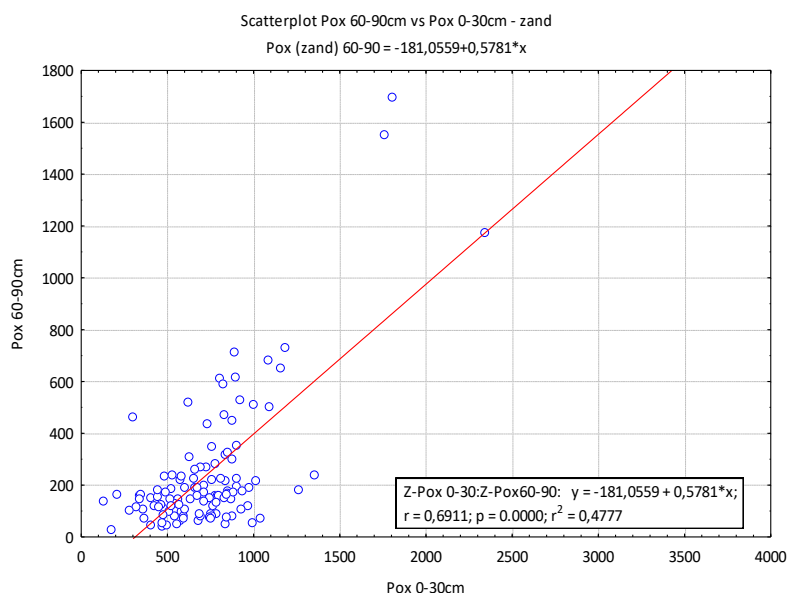
\* waarden onder de bepalingsgrens worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens



Figuur 133. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 30-60 cm (Pox 30-60cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 0-30 cm (Pox 0-30cm) op zandpercelen



Figuur 134. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 60-90 cm (Pox 60-90cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 30-60 cm (Pox 30-60cm) op zandpercelen



Figuur 135. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 60-90 cm (Pox 60-90cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 0-30 cm (Pox 0-30cm) op zandpercelen

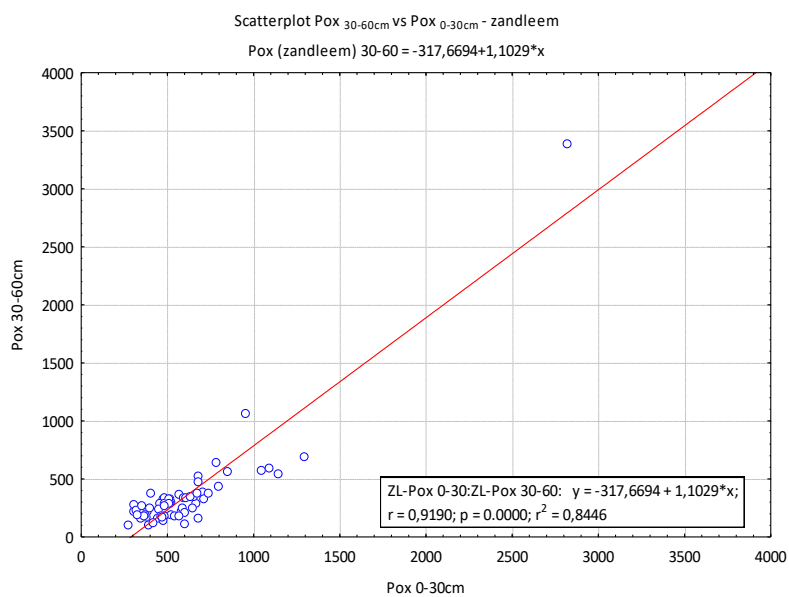
Op de geselecteerde zandleempercelen varieerde het P-oxalaatgehalte in de bodemlaag 0-30 cm van 276 tot 2821 mg P/kg en bedroeg gemiddeld 611 mg P/kg (Tabel 114). In de bodemlagen 30-60 en 60-90 cm werd in het oxalaatextract gemiddeld 357 en 192 mg P/kg gemeten met maximale waarden van respectievelijk 3385 en 1485 mg P/kg.

Tabel 114. Karakterisering P-oxalaat (mg/kg) in het bodemprofiel tot 90 cm op zandleem

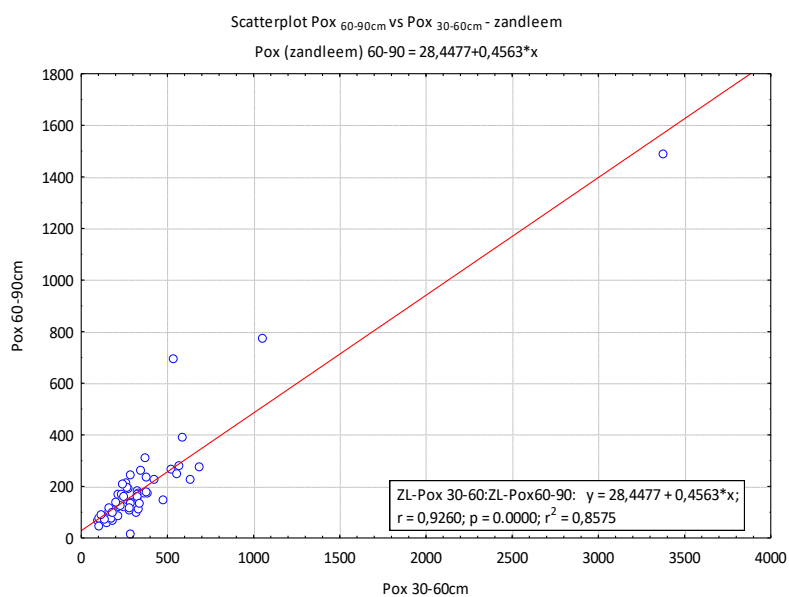
Bodemlaag	Gemiddeld	Minimum*	Maximum	Stdev
0-30 cm	611	276	2821	357
30-60 cm	357	96	3385	428
60-90 cm	192	12	1485	211

\* waarden onder de bepalingsgrens worden vervangen door de helft van de bepalingsgrens

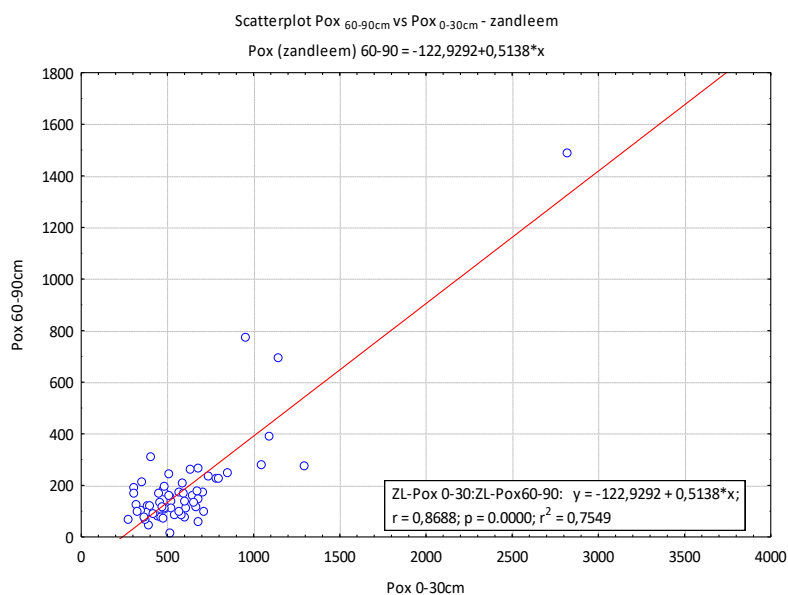
Ook op de zandleempercelen is bevestigd dat de P-oxalaatgehaltenes in de 2 bovenste bodemlagen van 30 cm significant gecorreleerd zijn ( $p < 0.05$ ) (Figuur 136). De lineaire fit verklaart 84% van de variantie. Het P-oxalaatgehalte in de onderlaag van 60-90 cm is eveneens op zandleempercelen significant gecorreleerd met de P-oxalaatgehaltenes in de bodemlagen erboven (Figuur 131 en Figuur 132). Een lineaire fit kan de relatie tussen het P-oxalaatgehalte in de bodemlaag 60-90 cm en het P-oxalaatgehalte in de bodemlagen 0-30 cm of 30-60 cm goed benaderen. De lineaire fit met het P-oxalaatgehalte van de bovenlaag verklaart 75% van de variantie (Figuur 132).



Figuur 136. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 30-60 cm (Pox 30-60cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 0-30 cm (Pox 0-30cm) op zandleempercelen



Figuur 137. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 60-90 cm (Pox 60-90cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 30-60 cm (Pox 30-60cm) op zandleempercelen



Figuur 138. Pox (mg/kg) in de bodemlaag 60-90 cm (Pox 60-90cm) in functie van Pox (mg/kg) in de bodemlaag 0-30 cm (Pox 0-30cm) op zandleempercelen

Ook de hoeveelheid P die per hectare in het profiel wordt gemeten met het oxalaatextract is begroot (Tabel 115). Hiervoor is het P-oxalaatgehalte met behulp van het molair gewicht en het schijnbaar soortelijk gewicht omgerekend naar kg P/ha.

Tabel 115. Fosforreserve bepaald met het oxalaatextract (kg P/ha) in het bodemprofiel tot 90 cm per bodemtype.

Bodemlaag	Gemiddeld	Zand	Zandleem	Leem	Klei
0-30 cm	2652	2720	2656	2355	2246
30-60 cm	1747	1893	1600	1357	1383
60-90 cm	998	1072	858	1138	935
0-90 cm	5397	5686	5114	4849	4565

Met het oxalaatextract wordt gemiddeld 5397 kg P per ha in het bodemprofiel tot 90 cm gemeten, meer dan dubbel zoveel als met het ammoniumlactaatextract. Van de totale hoeveelheid Pox in het profiel situeert zich gemiddeld 49 % in de bovenste 30 cm, gaande van 48% op zandpercelen tot 52% op zandleempercelen. Wanneer de hoeveelheid fosfor in het profiel wordt bepaald met het oxalaatextract is de fosforreserve beneden 30 cm nog belangrijker. Daar situeert zich nog 48 tot 52% van de totale reserve in het profiel tot 90 cm of 8% minder tot 3% meer dan in de bovenlaag 0-30 cm.

### 22.3P-CaCl<sub>2</sub> 0,01 M

De hoeveelheid fosfor in het bodemprofiel tot 90 cm bepaald met het CaCl<sub>2</sub> 0,01M-extract ligt duidelijk op een lager niveau dan bij de voorgaande extractiemethodes (Tabel 116).

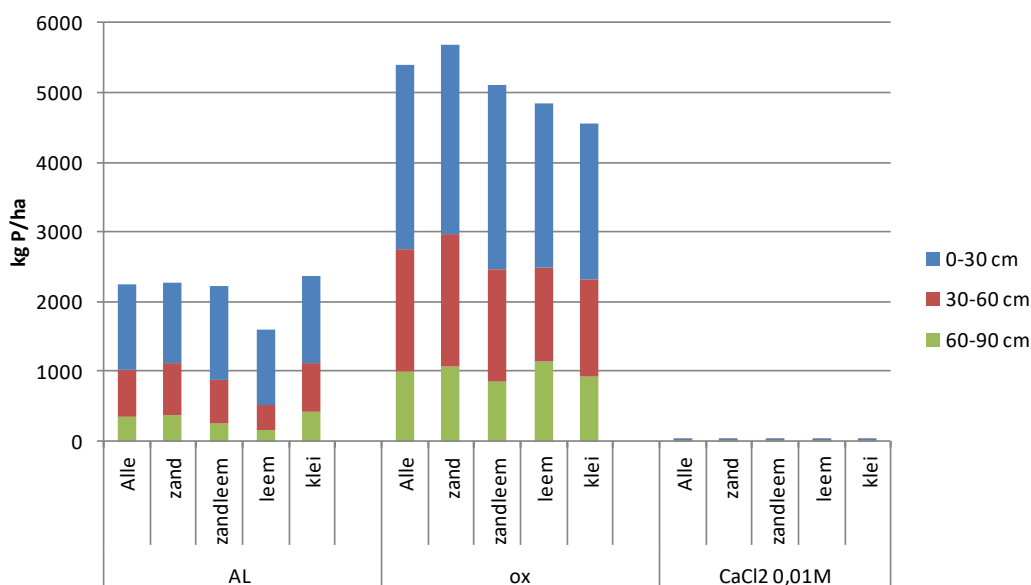


Tabel 116. Fosforreserve bepaald met het CaCl<sub>2</sub> 0,01M-extract (kg P/ha) in het bodemprofiel tot 90 cm per bodemtype

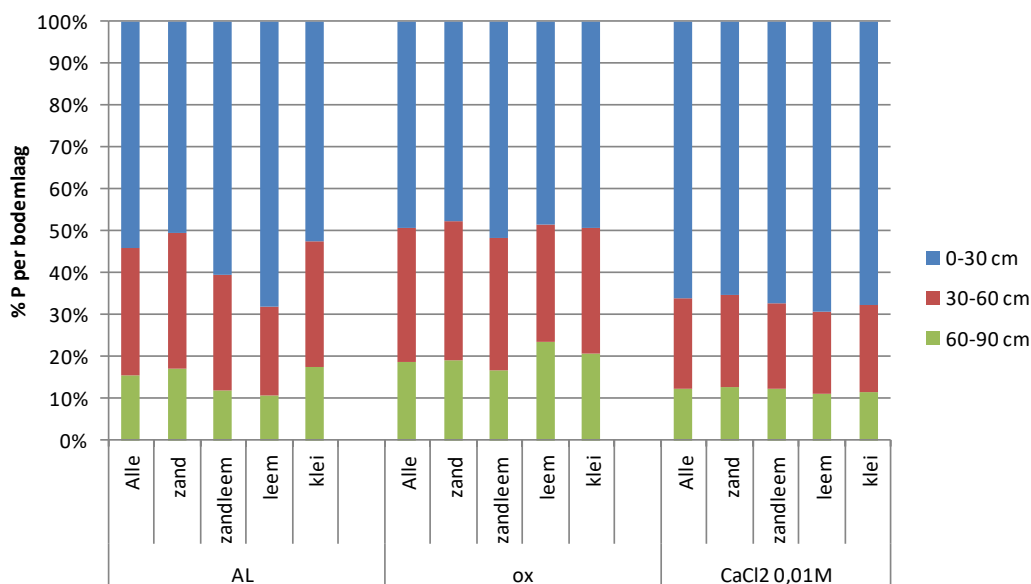
Bodemlaag	Gemiddeld	Zand	Zandleem	Leem	Klei
0-30 cm	15	15	13	17	24
30-60 cm	5	5	4	5	7
60-90 cm	3	3	2	3	4
0-90 cm	23	21	19	25	35

Met het CaCl<sub>2</sub> 0,01 M extract wordt gemiddeld slechts 23 kg P/ha gemeten in het bodemprofiel tot 90 cm. Het aandeel dat gemeten wordt in de bovenste laag is groter dan bij ammoniumlactaat- of oxalaatextract, en bedraagt gemiddeld 65%. De fosforreserve onder 30 cm bepaald met het CaCl<sub>2</sub> 0,01 M-extract is zowel absoluut als relatief ten opzichte van de totale inhoud in het bodemprofiel minder belangrijk. Toch blijft de reserve onder 30 cm met gemiddeld 35% van de totale reserve in het profiel niet onbelangrijk.

Een overzicht van de hoeveelheid fosfor die in functie van de extractiemethode per bodemtype en per bodemlaag in het profiel tot 90 cm werd gemeten op de 200 geselecteerde percelen wordt getoond in Figuur 139. Een overzicht van de verdeling van de fosfor over het profiel in functie van de extractiemethode en het bodemtype blijkt tevens uit Figuur 140.



Figuur 139. Hoeveelheid fosfor (kg P/ha) bepaald per bodemlaag (0-30, 30-60 en 60-90 cm) in functie van het bodemtype (alle= ganse populatie, zand, zandleem, leem, klei) en de extractiemethode (AL= ammoniumlactaat, ox= oxalaat, CaCl<sub>2</sub> 0,01M)



Figuur 140. Verdeling van de fosfor in het bodemprofiel over de verschillende bodemlagen (0-30, 30-60 en 60-90 cm) in functie van het bodemtype (alle= ganse populatie, zand, zandleem, leem, klei) en de extractiemethode (AL= ammoniumlactaat, ox= oxalaat, CaCl<sub>2</sub> 0,01M)

Met het oxalaatextract wordt zoals verwacht meer P gemeten maar ook het belang van de reserve in de bodem beneden 30 cm is groter. Doch met alle extractiemethodes blijkt het belang van de diepe P-reserve.

## 22.4 INVLOED BEMESTING OP FOSFORGEHALTES

De fosforbeschikbaarheid in een bodem wordt voornamelijk bepaald door de bemestingsgeschiedenis, meer bepaald door de bodembalans van de voorbije decennia. Van de bemonsterde percelen is enkel een bodembalans van de laatste 3 jaren, 2012 tem 2014 ( $P_{\text{balans}} '12-'14$ ), ter beschikking. De bodembalans wordt berekend als de aangevoerde P-bemesting verminderd met de afgevoerde P-hoeveelheid via gewasafvoer.

De fosforbalans van de afgelopen 3 jaar voor staalname had in geen van de bodemlagen een significant effect op de fosforbeschikbaarheid ( $P\text{-AL}$ ,  $P_{\text{ox}}$  noch  $P\text{-CaCl}_2$ ).

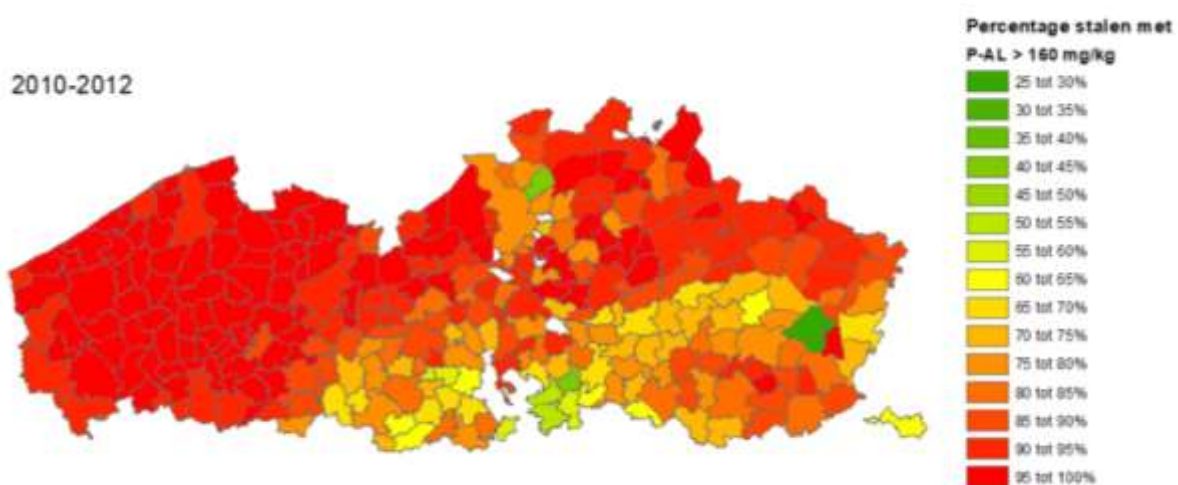
## 22.5 BESLUIT

In het bodemprofiel beneden 30 cm zit een behoorlijke fosforreserve. De fosfor is in de diepere lagen zoals verwacht sterker gebonden dan in de bovenste laag wat blijkt uit het lagere aandeel in de onderlagen wanneer de hoeveelheid fosfor wordt bepaald met het CaCl<sub>2</sub> 0,01M-extract. Doch met de gangbare AL-extractie is bepaald dat in het profiel beneden 30 cm gemiddeld slechts 16% P minder beschikbaar is dan in de bovenste 30 cm van het profiel. Op de geselecteerde percelen was de invloed van de recente bemesting of bodembalans op de fosforbeschikbaarheid beperkt.

## 23 DWP 3.5: EROSIE- VERSUS UITSPOELINGSVERLIEZEN

Fosforverliezen treden op via uitspoeling alsook door oppervlakkige afstroming en erosie. In dit DWP worden de risico's op verliezen via beide posten in Vlaanderen vergeleken.

In eerste instantie wordt gekeken naar het risico op uitloging. Hiervoor wordt rekening gehouden met de kritische bodemfosforwaarde voor uitloging zoals bepaald in DWP 2.3, zijnde 160 mg P/kg. Per gemeente in Vlaanderen werd voor de periode 2010-2012 het gemiddelde P-AL-gehalte van de laag 0-23 cm berekend. Deze gemiddelde P-AL-waarde werd bepaald op basis van de P-AL-waarden gemeten in de laag 0-23 cm bij de standaardgrondanalyses (BEMEX-expertsysteem van de BDB) in die gemeente. In totaal omvat de gebruikte dataset 23128 metingen uit 2010, 28807 uit 2011 en 25855 uit 2012. Voor elke gemeente werd het percentage stalen met een P-AL gehalte hoger dan de drempelwaarde van 160 mg P/kg berekend voor de periode 2010-2012 (Figuur 141). Gemeentes waar minder dan 10 stalen beschikbaar waren werden uit de berekening weggelaten.

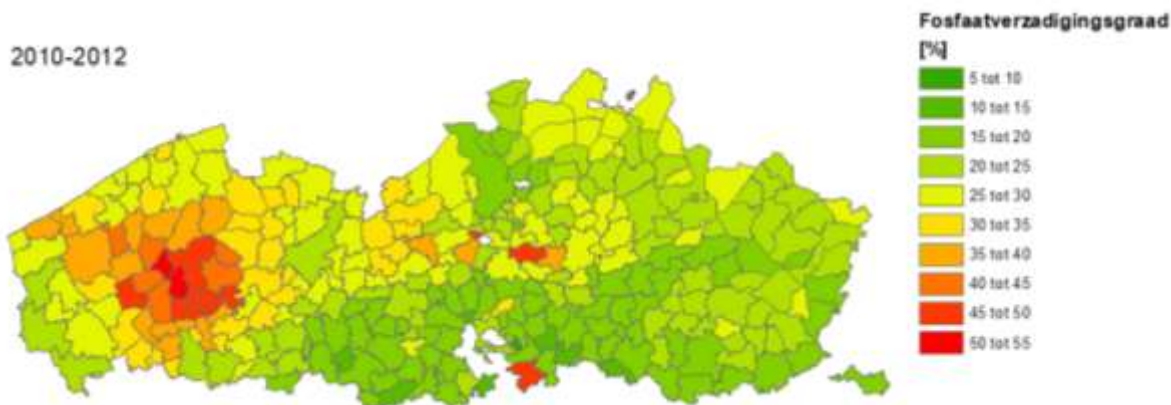


Figuur 141. Percentage stalen per gemeente met een P-AL-gehalte > 160 mg/kg op basis van de standaardgrondanalyse, voor de periode 2010-2012

Op basis van de regressie berekend in DWP 2.3 voor 605 bodems werd het gemiddelde P-AL-gehalte per gemeente omgerekend naar fosfaatverzadigingsgraad ( $FVG_{0-90cm}$ ; Figuur 142):

$$\text{indien } P\text{-AL} < 364 \text{ mg P/kg} \quad P\text{-AL} = 11,779 * FVG + 9,6635$$

$$\text{indien } P\text{-AL} \geq 364 \text{ mg P/kg} \quad P\text{-AL} = 7,8442 * FVG + 127,95$$

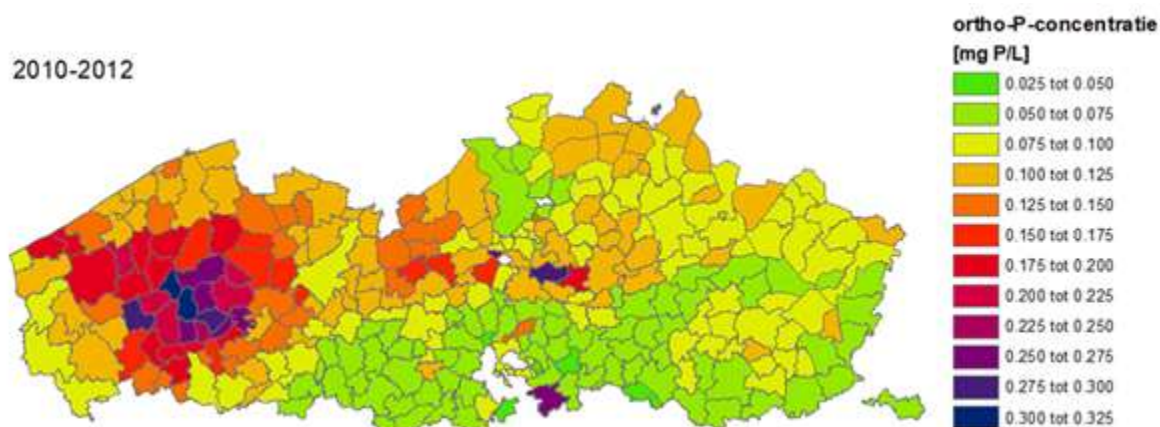


Figuur 142. Berekende gemiddelde fosfaatverzadigingsgraad (%; 0-90cm) per gemeente voor de periode 2010-2012 (noot: dit betreffen berekende waarden obv gemeten P-AL-waarden (BDB) en algemene relaties tussen P-AL<sub>0-30cm</sub> en FVG<sub>0-90cm</sub>, deze data mogen niet als gemeten waarden gebruikt worden)

De gemiddelde FVG<sub>0-90cm</sub> per gemeente werd gerelateerd aan de concentratie P die op lange termijn kan uitloggen (maximale waarde ter hoogte van de referentiediepte, hier 90 cm) volgens

$$FVG = \frac{\gamma.K.c}{1+\gamma.K.c} \quad (\text{Schoumans, 2004})$$

Voor de bodemspecifieke  $\gamma$  en K parameters werden de waarden  $\gamma = 3$  en  $K = 35 \text{ mol m}^{-3}$  genomen, volgens Schoumans & Chardon (2015). De resultaten zijn weergegeven in Figuur 143.



Figuur 143. Berekende gemiddelde P-concentratie per gemeente die op lange termijn kan uitloggen (maximaal), voor de periode 2010-2012 (noot: dit betreffen berekende waarden obv de gemeten P-AL-waarden (BDB) en algemene relaties tussen P-AL<sub>0-30cm</sub> en FVG<sub>0-90cm</sub>, en de theoretische relatie tussen FVG en de ortho-P-concentratie die op lange termijn maximaal kan uitloggen op de referentiediepte, hier 90 cm. Deze waarden zijn dus geenszins gemeten orthofosforconcentraties)

Let wel, de in Figuur 143 weergegeven o-P-concentraties zijn geen reële concentraties maar maximale concentraties die op termijn op de referentiediepte (hier 90 cm, zie luik 2, DWP 2.3) mogelijk zijn (Schoumans and Chardon, 2015). Huidige fosforconcentraties in het grondwater zijn vooral gerelateerd aan het voorkomen van natuurlijke processen (veel organisch materiaal, fosfaatnodules) (Landmaatschappij, 2018). Voor de fosforconcentratie in het oppervlaktewater is de vastlegging van fosfor door ijzeroxides in het sediment dan weer heel belangrijk. De fosfor/ijzer-verhouding in de sedimenten en de opgeloste zuurstofconcentratie in het water zijn veel meer dan erosiegevoeligheid, puntbronnen en fosforgehaltes in riviersedimenten bepalend voor de gemeten fosforconcentraties in het oppervlaktewater (Smolders *et al.*, 2017).

Het hierboven berekende uitspoelingsrisico werd vervolgens opgeschaald naar het niveau van stroombekkens door voor elk bekken het gemiddelde te nemen voor de gemeentes die in dat bekken liggen (Figuur 144). Gemeentes die zich in meerdere stroombekkens bevonden werden aan het bekken toegekend waarin het grootste aandeel van hun areaal zich bevond. Deze berekening er van uit dat de stalen in de databank van Bodemkundige Dienst van België representatief zijn voor de landbouwpercelen in Vlaanderen (qua teelt, bemesting, etc.).



Figuur 144. Berekende gemiddelde P-concentratie per stroombekken die op lange termijn kan uitloggen, voor de periode 2010-2012 (noot: dit betreffen berekende waarden obv de gemeten P-AL-waarden (BDB) en algemene relaties tussen P-AL<sub>0-30cm</sub> en FVG<sub>0-90cm</sub>, en de theoretische relatie tussen FVG en de ortho-P-concentratie die op lange termijn maximaal kan uitloggen op de referentiediepte, hier 90 cm. Deze waarden zijn dus geenszins gemeten orthofosforconcentraties)

In tweede instantie werd ook gekeken naar het afspoelingsrisico. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een deelmodel van NEMO. NEMO is een ruimtelijk gedistribueerd model met resolutie 50m x 50m dat de nutriëntenvrachten van N en P vanuit de landbouw naar het oppervlaktewater berekent. De oppervlakkige **afspoeling** wordt door NEMO berekend volgens een aangepaste versie van de RUSLE-vergelijking (Revised Universal Soil Loss Equation) voor Vlaanderen. Voor fosfor wordt onderscheid gemaakt tussen organisch gebonden P en gesorbeerde P. De modeloutput kan op bekken- of deelbekkenschaal berekend worden, zodat voor Vlaanderen een afspoelingsrisicokaart voor P verkregen werd. De gemiddelde fosforverliezen door erosie werden per stroombekken getoond in Figuur 145. De fosforvracht naar het oppervlaktewater via erosie uit NEMO betreft hier de som van de organische fosforvracht en fosforvracht gesorbeerd aan bodempartikels.



Figuur 145. Fosforvracht naar het oppervlaktewater via erosie (som van de organische fosforvracht en fosforvracht gesorbeerd aan bodempartikels) uit NEMO, gemiddelde voor de periode 2010-2012

Een vergelijking tussen Figuur 144 en Figuur 145 toont dat gebieden met een hoog uitspoelingsrisico niet noodzakelijk samenvallen met gebieden met een hoog afspoelingsrisico.

## 24 DWP3.6: BEMESTINGS- EN MANAGEMENTTECHNIEKEN<sup>2</sup>

### 24.1 VELDPROEF VLACO EN UGENT (PROFESSOR DIRK REHEUL)

Sinds 2010 loopt een veldproef op een zandleemperceel in Melle met tamelijk hoge P-AL-waarde, onder beheer van UGent (professor Dirk Reheul). Er zijn 8 P-trappen (van 0 tot 41 kg P/ha) en 7 behandelingen met 37 kg P/ha toegepast via verschillende organische bemestingsvormen (digestaat, dierlijke mest en hun fracties, compost). Deze proef wordt besproken in bijlage 1 van luik 2, en geeft input aan DWP 2.1 wat betreft benodigde P-AL voor optimale gewasopbrengsten, en aan de literatuurstudie van DWP 3.6 wat betreft de verschillen in bemestingstypes (zie bijlage 4).

### 24.2 LITERATUURSTUDIE

Voor DWP3.6 werd een literatuurstudie opgemaakt rond bemestings- en managementtechnieken voor duurzaam fosforgebruik (bijlage 4). Bemestingstype en bodemmanagement kunnen op verschillende manieren de fosforbeschikbaarheid, de gewasopbrengst en de fosforverliezen vanuit bodems beïnvloeden. Zo is duidelijk dat de fosforbeschikbaarheid verhoogd wordt door fosforbemesting, maar dat deze daarna langzaam daalt in de tijd door fosforvastlegging in de bodem. Het bemestingstijdstip kan echter enkel een invloed hebben op de opbrengst als een opbrengstverhoging mogelijk is via bemesting. In enkele veldexperimenten wordt vastgesteld dat voorjaarsbemesting soms hogere opbrengst geeft dan bemesting het jaar voordien. Via **rijenbemesting** kan fosfor dicht bij de plant gebracht worden en kan efficiënter bemest worden (dosis kan gereduceerd worden) in het geval de rijafstand voldoende groot is en fosforbemesting nodig is voor een grotere opbrengst. In de literatuur wordt soms een hogere opbrengst bij rijenbemesting versus volveldsbemesting waargenomen. Voor startfosfor bij maïs is dit soms ook het geval, maar vaak wordt een minder goede start bij afwezigheid van startfosfor in latere fases weggewerkt. Effecten van rijenbemesting op fosforverliezen zijn niet gekend. Ook met dierlijke mest kan rijenbemesting uitgevoerd worden, maar moet opgelet worden voor structuurschade.

Het **toepassen** van voldoende **N en K** kan fosforuitmijning maximaliseren. **Fosforvastleggende componenten** doen de totale P-voorraad in de bodem niet dalen, maar kunnen de beschikbaarheid voor verliezen wel sterk reduceren. Toepassingsmogelijkheden zijn biochar, en talrijke calcium-, ijzer- en aluminiumhoudende componenten. Er zijn hiermee reeds veel labostudies en enkele veldexperimenten uitgevoerd, die telkens wijzen op sterk verminderde fosforbeschikbaarheid en/of -verliezen. Er werden nog geen negatieve gevolgen voor het gewas vastgesteld. Ook **bekalken** kan eventueel fosforverliezen beperken, maar hier zijn de resultaten veel onzekerder door een combinatie van een pH- en calciumeffect en het belang van de startcondities in de bodem. Daarom werd een algemeen bekalkingsadvies voor Vlaamse bodems afhankelijk van de bodem-pH en de fosforbeschikbaarheid in de bodem afgeleid. Uit bemestingsproeven van BDB werd duidelijk dat het kritisch fosforgehalte voor gewasopbrengst lager is bij gunstige bodem-pH dan bij ongunstige bodem-pH. Bij waargenomen fosforgebrek van het gewas kan het aanpassen van de bodem-pH dan een snellere en efficiëntere manier zijn dan extra fosforbemesting, om een optimale opbrengst te bekomen.

Er zijn verschillende **types fosforbemesting**: kunstmest, dierlijke, andere organische vormen, ... Aangezien fosfor niet in alle bemestingstypes even (snel) beschikbaar is, is de bemestende waarde op korte termijn (jaar van bemesting) soms lager dan deze van snelwerkende kunstmest als TSP. Op basis van proeven uit de literatuur en uitgevoerd door ILVO werden kunstmestequivalentwaarden voor

---

<sup>2</sup> De oorspronkelijk voorgestelde demoproeven werden vervangen door extra bemestingsproeven (DWP 2.1 in luik 2) en informatie naar landbouwers toe (zie luik 4). De Code voor goede fosforbemestingspraktijk (oorspronkelijk DWP 3.7) is verplaatst naar luik 4.

verschillende bemestingstypes afgeleid. Op lange termijn wordt vastgesteld dat de bemestende waarde voor verschillende types zowel op het vlak van verhogen van fosforbeschikbaarheid als opbrengst, gelijkaardig is. In een veldproef van UGent werden ook nog geen (duidelijke) verschillen in fosforbeschikbaarheid en opbrengst bij verschillende bemestingstypes waargenomen na acht jaar. Soms worden hogere fosforverliezen vastgesteld bij bemesting met stalmest, digestaat en drijfmest in vergelijking met kunstmest, wat gelinkt kan worden aan effecten via organische zuren en calcium.

## 25 REFERENTIES LUIK 3

- Aarts, H.F.M., den Boer, D.J., van Middelkoop, J.C., Oenema, J., 2008. Landbouwkundige gevolgen van het aanscherpen en differentiëren van fosfaatgebruiksnormen voor de melkveehouderij.
- ADHB, 2017. Nutrient Management Guide (RB209).
- Alblas, J., van der Schoot, J.R., 2000. Pw-getal zegt niet alles... Kennisakker.nl.
- Berecz, K., Balázs, J., Németh, I., Fülek, G., 2005. Studying the direct and residual effect of long-term fertilization using ammonium lactate and hot water extraction methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36, 203-213.
- Blake, L., Johnston, A.E., Poulton, P.R., Goulding, K.W.T., 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil* 254, 245-261.
- Boon, R., 1974. Verslag over de opzoekingen 74: deel II, hoofdstuk 2 (NPK Kempen 1970-1974). Bodemkundige Dienst van België, Heverlee.
- Boon, R., 1976. Vergelijkende studie over bemesting met drijfmest enerzijds en scheikundige NKP meststoffen anderzijds (Reppel 1002) (1972-1976). Bodemkundige Dienst van België, Heverlee.
- Boon, R., 1977. Verslag proefveld 1027 - Geetbets NPK Mg-proef (1974-1977). Bodemkundige Dienst van België, Heverlee.
- D'Hose, T., Ruyschaert, G., Viaene, N., Debode, J., Nest, T.V., Van Vaerenbergh, J., Cornelis, W., Willekens, K., Vandecasteele, B., 2016. Farm compost amendment and non-inversion tillage improve soil quality without increasing the risk for N and P leaching. *Agriculture Ecosystems & Environment* 225, 126-139.
- de Haan, J.J., van Geel, W., 2013. Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen 2013. Wageningen.
- Denef, K., Roobroeck, D., Wadu, M., Lootens, P., Boeckx, P., 2009. Microbial community composition and rhizodeposit-carbon assimilation in differently managed temperate grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 144-153.
- Djordjic, F., Bergstrom, L., Grant, C., 2005. Phosphorus management in balanced agricultural systems. *Soil Use and Management* 21, 94-101.
- Djordjic, F., Borling, K., Bergstrom, L., 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality* 33, 678-684.
- Ehlert, P.A.I., Dekker, P.H.M., van der Schoot, J.R., Visschers, R., van Middelkoop, J.C., van der Maas, A.A., Pronk, A.A., van Dam, A.M., 2009. Fosforgehalten en fosfaatvoercijfers van landbouwgewassen. Eindrapportage., Wageningen.
- Ehlert, P.A.I., van Wijk, C.A.P., Dekker, P.H.M., 2003. Fosfaatbalansen op perceelsniveau. Scan van de resultaten van vier veeljarige veldproeven op bouwland. Lelystad.
- Ekholm, P., Turtola, E., Gronroos, J., Seuri, P., Ylivainio, K., 2005. Phosphorus loss from different farming systems estimated from soil surface phosphorus balance. *Agriculture Ecosystems & Environment* 110, 266-278.
- Federolf, C.P., Westerschulte, M., Olf, H.W., Broll, G., Trautz, D., 2016. Enhanced nutrient use efficiencies from liquid manure by positioned injection in maize cropping in northwest Germany. *European Journal of Agronomy* 75, 130-138.
- Johnston, A.E., Lane, P.W., Mattingly, G.E.G., Poulton, P.R., Hewitt, M.V., 1986. Effects of soil and fertilizer-P on yields, of potatoes, sugar-beet, barley and winter-wheat on a sandy clay loam soil at Saxmundham, Suffolk. *Journal of Agricultural Science* 106, 155-167.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Fixen, P.E., Curtin, D., 2014. Phosphorus: Its efficient use in agriculture. *Advances in Agronomy*, Vol 123 123, 177-228.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., White, R.P., 2013. Plant-available soil phosphorus. Part II: the response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam. *Soil Use and Management* 29, 12-21.
- Landmaatschappij, V., 2018. Mestrapport 2018. Vlaamse Landmaatschappij, Brussel.
- Legrand, G., Roisin, C., Bries, J., Destain, J.-P., 2012. PK bemesting in de biet: Bedenkingen op de lange termijn! , De Bietplanter. vzw CBB, Brussel, pp. 7-8.
- Lookman, R., Freese, D., Merckx, R., Vlassak, K., van Riemsdijk, W.H., 1995. Long-term kinetics of phosphate release from soil. *Environmental Science & Technology* 29, 1569-1575.
- Maas, E.V., 1985. CROP TOLERANCE TO SALINE SPRINKLING WATER. *Plant and Soil* 89, 273-284.
- Messiga, A.J., Ziadi, N., Plenet, D., Parent, L.E., Morel, C., 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use and Management* 26, 354-364.
- Nawara, S., 2018. PhD thesis: The availability of phosphorus in a soil depleting scenario. KU Leuven, Leuven.
- Nawara, S., Van Dael, T., Merckx, R., Amery, F., Elsen, A., Odeurs, W., Vandendriessche, H., McGrath, S., Roisin, C., Jouany, C., Pellerin, S., Denoroy, P., Eichler-Lobermann, B., Borjesson, G., Goos, P., Akkermans, W., Smolders, E., 2017. A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe. *European Journal of Soil Science* 68, 873-885.
- Nelissen, V., Ruyschaert, G., Manka'Abusi, D., D'Hose, T., De Beuf, K., Al-Barri, B., Cornelis, W., Boeckx, P., 2015. Impact of a woody biochar on properties of a sandy loam soil and spring barley during a two-year field experiment. *European Journal of Agronomy* 62, 65-78.
- Poulton, P.R., Johnston, A.E., White, R.P., 2013. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. *Soil Use and Management* 29, 4-11.
- Reijneveld, J.A., Verloop, J., Hilhorst, G.J., 2003. Sanering van zandgrond met een hoge fosfaattoestand. Resultaten van een veldexperiment op proefbedrijf De Marke. Wageningen.
- Research, R., 2012. Guide to the classical and other long-term experiments. 1st print 2006. 52.



- Sattari, S.Z., Bouwman, A.F., Giller, K.E., van Ittersum, M.K., 2012. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, 6348-6353.
- Schoumans, O., 2004. Inventarisatie van de fosfaatverzadiging van landbouwgronden in Nederland. Wageningen.
- Schoumans, O.F., Chardon, W.J., 2015. Phosphate saturation degree and accumulation of phosphate in various soil types in The Netherlands. *Geoderma* 237-238, 325-335.
- Schröder, J.J., Ten Holte, L., Brouwer, G., 1997. Response of silage maize to placement of cattle slurry. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 45, 249-261.
- Smolders, E., Baetens, E., Verbeeck, M., Nawara, S., Diels, J., Verdriev, M., Peeters, B., De Cooman, W., Bakens, S., 2017. Internal loading and redox cycling of sediment iron explain reactive phosphorus concentrations in lowland rivers. *Environmental Science & Technology* 51, 2584-2592.
- Tits, M., Elsen, A., Deckers, S., Boon, W., Bries, J., Vandendriessche, H., 2016. Bodemvruchtbaarheid van de akkerbouw- en weilandpercelen in België en Noordelijk Frankrijk (2012-2015). Bodemkundige Dienst van België.
- van der Salm, C., Chardon, W.J., Koopmans, G.F., van Middelkoop, J.C., Ehlert, P.A.I., 2009. Phytoextraction of phosphorus-enriched grassland soils. *Journal of Environmental Quality* 38, 751-761.
- van der Salm, C., van Middelkoop, J.C., Ehlert, P.A.I., 2017. Changes in soil phosphorus pools of grasslands following 17yrs of balanced application of manure and fertilizer. *Soil Use and Management* 33, 2-12.
- van Geel, W., 2012. Verhoging benutting stikstof en fosfaat door rijenbemesting. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving*, Lelystad.
- van Middelkoop, J., 2007. Tien jaar fosfaatevenwichtsbemesting op grasland: bodemvruchtbaarheid daalt langzaam. V-focus.
- 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? *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 106, 93-111.
- van Wijk, C., de Haan, J.J., Ehlert, P.A.I., van den Berg, W., 2013. Lange termijn effecten van fosfaatbalansen op bouwland; fosfaatrapporten proefveld Lelystad. Wageningen.
- Vanden Nest, T., Ruyschaert, G., Vandecasteele, B., Cougnon, M., Merckx, R., Reheul, D., 2015. P availability and P leaching after reducing the mineral P fertilization and the use of digestate products as new organic fertilizers in a 4-year field trial with high P status. *Agriculture Ecosystems & Environment* 202, 56-67.
- Vandendriessche, H., Geypens, M., Bries, J., 1994. Effecten van de beperking van de P-bemesting op de gewasproductie en de bodemvoorraad. Studie- en vervolmakingsdag 'Gebruik van reststoffen in de land- en tuinbouw'. K.V.I.V., pp. 57-70.
- Vanderdeelen, J., Boon, R., Piot, R., Baert, L., 1985. Phosphorus and potassium balance of long-term fertilizer trials on two Belgian loamy soils. *Pédologie* 35, 191-204.
- Verlinden, G., Callens, D., 2005. Eindrapport van resteffluenten van de mestverwerking. Deel 1: Literatuurstudie. p. 37.

## 26 BELEIDSADVIEZEN

### 26.1 METHODE VOOR METEN VAN FOSFORBESCHIKBAARHEID IN DE BODEM

In Vlaanderen wordt momenteel de P-AL-methode gebruikt voor het bepalen van de fosforbeschikbaarheid in de bodem. In deze methode wordt een bodemstaal geëxtraheerd in ammoniumlactaat en azijnzuur bij pH 3,75. De geëxtraheerde fosforhoeveelheid is een maat voor de fosforcapaciteit van de bodem, dit is de fosforbeschikbaarheid op langere termijn. De veld- en serreproeven van dit project hebben aangetoond dat er geen andere fosfortesten beter scoren dan P-AL voor het bepalen van de fosforbeschikbaarheid voor het gewas. Wat betreft het inschatten van de fosforverliezen uit de bodem via uitloging scoorde de fosfaatverzadigingsgraad iets beter dan P-AL, maar bij overweging van alle evaluatiecriteria (kostprijs, robuustheid, vertrouwdheid, prestatiekenmerken, maat voor fosforbeschikbaarheid,...) kwam P-AL als beste fosfortest uit de bus. De meerwaarde voor het meenemen van een extra fosfortest, zoals P-CaCl<sub>2</sub>, een maat voor de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid (=intensiteit), bleek beperkt te zijn zowel op het vlak van inschatting van de fosforbeschikbaarheid voor het gewas, als voor de inschatting van de verandering van P-AL bij toevoegen of afvoer van fosfor aan/uit de bodem. Bijgevolg wordt geadviseerd om bij de momenteel gangbare meetmethode voor fosforbeschikbaarheid in de bodem in Vlaanderen, P-AL, te blijven.

### 26.2 STREEFZONE

In dit project werd een streefzone voor P-AL in de bodem opgesteld. De ondergrens van de streefzone is de minimale of kritische P-AL voor de gewassen, namelijk de P-AL waarbij er minder dan 5% kans is dat de gemiddelde gewasopbrengst daalt door fosforgebrek. Een daling wordt daarbij gedefinieerd als meer dan 5% oogstverlies ten opzichte van het maximum. Uit verschillende Vlaamse bemestingsproeven werd een P-AL-ondergrens van 110 mg P/kg afgeleid. Deze waarde is geldig voor bodems met een gunstige bodem-pH. Bij suboptimale bodem-pH is een hogere P-AL nodig voor goede opbrengsten, maar werken aan een optimale bodem-pH is dan een snellere en meer duurzame werkwijze dan extra fosforbemesting. Resultaten gaven aan dat er geen opsplitsing van deze kritische waarde tussen verschillende texturen dient te gebeuren. Wel kunnen de waarden sterk verschillen van gewas tot gewas, zo is de kritische P-AL voor maïs flink hoger (gemiddeld voor 95% relatieve opbrengst is 154 mg P/kg nodig) en voor tarwe flink lager (gemiddeld voor 95% relatieve opbrengst is 58 mg P/kg nodig). Aangezien P-AL niet van jaar tot jaar gewijzigd kan worden, wordt geadviseerd één kritische P-AL voor alle akkerbouwgewassen aan te houden.

De bovengrens van de streefzone is de maximale P-AL waarbij de fosforverliezen naar het milieu (grond- en oppervlaktewater) aanvaardbaar zijn. Deze is gerelateerd aan de milieugrens van 0,1 mg oP/L voor oppervlaktewater (variaties voor verschillende types waterlichamen) zoals afgeleid voor de KaderRichtlijn Water. Deze fosforconcentratie zal niet overschreden worden in uitlogend bodemwater indien de fosfaat-verzadigingsgraad in de 0-90 cm laag (indien de grondwatertafel gelijk of dieper is dan 90 cm) niet hoger is dan 25%. De FVG is voor 90% van de individuele bodems niet hoger dan 25% indien P-AL in de 0-30 cm laag niet hoger is dan 160 mg P/kg. De milieuveilige bovengrens van 160 mg P/kg is afgeleid voor bodems met een gemiddelde hoogste grondwaterstand van 90 cm of dieper. Uit kolomproeven bleek dat er geen significante verschillen zijn tussen verschillende bodemtexturen in uitlogende fosforconcentraties bij een bepaalde P-AL. Er kon voor een beperkt deel van de Vlaamse bodems, namelijk voor kalkrijke zandgronden en veenbodems, geen milieukritische P-AL-waarde vastgelegd worden.

Tussen de onder- en bovengrens voor P-AL kan een streefzone voor Vlaanderen gedefinieerd worden waarbij P-AL zowel voor landbouw als voor milieu aanvaardbaar is: 110-160 mg P/kg.

## 26.3 BEMESTINGSADVIEZEN

Slechts een beperkt deel van de Vlaamse bodems bevindt zich momenteel reeds in de streefzone voor P-AL. Idealiter evolueren deze bodems richting streefzone door meer of minder fosfor te bemesten dan er afgevoerd wordt met het gewas. Aangezien niet alle fosfor die deelneemt aan de bodem-plant-cyclus, gemeten wordt door P-AL in de toplaag, moet er relatief meer fosfor aan- of afgevoerd worden dan op basis van berekeningen met P-AL alleen. Bovendien blijkt uit bodemanalyses dat gemiddeld 46% van de fosfor gemeten door P-AL in de 0-90 cm laag, zich in de onderste 60 cm bevindt.

Uit labo-, serre- en veldproeven blijkt dat de mate waarin P-AL verandert in de tijd afhankelijk is van de startwaarde van P-AL en van de tijdsduur waarin de verandering plaatsvindt, maar minder van de bodemeigenschappen (textuur, ijzergehalte,...). Bijgevolg kon een model en opzoektabel opgesteld worden met daarin startwaarde voor P-AL, bodemfosforbalans, tijd en gerelateerde verandering in P-AL. Met deze gegevens kan de benodigde tijd en cumulatieve fosforbalans voor een gewenste verandering in P-AL richting streefzone berekend worden. Zo is duidelijk dat voor dalingen van meer dan 100 mg P/kg meestal meer dan 10 jaar nodig is, zelfs indien helemaal geen fosforbemesting meer wordt toegepast. In dat geval is wel voldoende voorziening van andere nutriënten nodig om een goede gewasgroei toe te laten. Bij gebruik van dierlijke en andere organische mest, waarbij nog altijd fosfor wordt toegepast, zal een eventuele daling nog veel langer duren. Voor bodems met P-AL boven de streefzone is fosforkunstmest bijgevolg niet af te raden. Fosfor uit kunstmest en andere mesttypes verandert P-AL in dezelfde mate op lange termijn (geen werkingscoëfficiënten in rekening brengen). Met een alternatief model waarin rekening gehouden wordt met snelle en traag beschikbare fosfor, worden bij beperkte uitmijning startend vanaf een fosforrijke bodem geen sterke daling van P-AL of fosfortekorten verwacht. Zelfs bij nulbemesting kan het meer dan 100 jaar duren voor er opbrengstdalingen door fosfortekort waargenomen worden.

Bij bodems met een P-AL lager dan de streefzone is een positieve fosforbalans nodig om P-AL op te krikken. Deze extra fosforbemestingshoeveelheid mag niet te klein zijn (best groter dan 10 kg P/ha/jr, afhankelijk van de beginwaarde voor P-AL) omdat P in de tijd ook gedeeltelijk gefixeerd wordt in een niet-gemeten fractie. Voor bodems met een te lage P-AL zijn ook extra maatregelen aan te raden: streven naar optimale bodem-pH en goed bodemmanagement, focussen van fosforbemesting op fosforgevoelige teelten, toepassen van rijenbemesting en beperkt ploegen. Afhankelijk van het mesttype is de fosforwerking op korte termijn soms kleiner dan deze van snelwerkende kunstmest.

Voor bodems die zich reeds in de streefzone bevinden, is het belangrijk om P-AL te onderhouden. Door fosforfixatie is de aan te raden fosforbalans licht positief: van +3 kg P/ha/jaar voor de ondergrens tot 13 kg P/ha/jaar voor de bovengrens van de streefzone. Met een alternatief model waarin rekening gehouden wordt met snelle en traag beschikbare fosfor, wordt bij lichte uitmijning startend vanaf de bovengrens van de streefzone wel maar een beperkte daling van de fosforopname door tarwe in de eerste 75 jaar gemodelleerd. Wordt daarentegen volledig gestopt met bemesting, dan wordt er na 45 jaar opbrengstvermindering verwacht voor het weinig fosforgevoelige tarwegewas, indien aangenomen wordt dat tarwe fosfor opneemt uit de bovenste 45 cm.

Het ontwikkelde bemestingsadvies houdt niet expliciet rekening met gemeten fosforgehaltes in diepere bodemlagen. Toch wordt fosfor in de diepere lagen impliciet in rekening gebracht. Immers, het advies is gebaseerd op data van veldproeven waarbij vastgesteld werd dat gemiddeld slechts 27% van de netto toegevoegde fosforhoeveelheid teruggevonden wordt in de P-AL-fractie van de bovenlaag, of slechts 27% van de netto ontmijnde fosfor verdwenen bleek uit de P-AL fractie van de bovenlaag. Deze cijfers komen terug in het bemestingsadvies. Bovendien, als de onderlagen aangerijkt zijn dan is de bovenlaag ook fosforrijk en is het advies (veel) lager dan de onttrekking. Bij deze geadviseerde negatieve bodembalans zal bijgevolg ook de diepere bodemfosfor uitgemijnd worden.

## 26.4 ANDERE NUTRIËNTEN EN KOOLSTOF

In de bodem is niet alleen fosfor aanwezig. Ook andere nutriënten zoals N en K, en organische stof hebben belangrijke functies voor bodem en gewas. In geval van te hoge P-AL zal de snelste daling richting streefzone gerealiseerd kunnen worden indien geen enkele fosforbemesting wordt toegepast. Een belangrijke keerzijde van de medaille is dat andere nutriënten dan niet via dierlijke mest maar via kunstmest moeten toegepast worden (economisch verlies), en dat er geen aanvoer van organische stof via bemesting mogelijk is. Na te streven fosforbalansen moeten dan een evenwicht vinden tussen voldoende fosforuitmijning (negatieve fosforbalans) en voldoende aanvoer van nutriënten en koolstof via dierlijke en organische mest. Daarbij zijn de bemestingstypes met een hoge N/P- en effectieve C/P-verhouding het meest interessant. Runderstalmest en compost zijn daarvan voorbeelden, waarbij compost de voorkeur geniet gezien bij dit mesttype vaak minder fosforverliezen worden vastgesteld in vergelijking met stalmest. Waar wel nog fosforbemesting vereist is (P-AL niet boven de streefzone), heeft de toepassing van fosfor via organische mesttypes als voordeel ten opzichte van kunstmest dat er ook andere nutriënten en organische stof aangevoerd worden. Deze laatste heeft ook extra voordelen voor de fosforbeschikbaarheid door de positieve invloed op bodemstructuur (beworteling en diffusie van fosfor in de bodem).

## 26.5 RISICO OP EROSIË EN UITLOGING IN VLAANDEREN

Fosforverliezen treden op via uitspoeling alsook door oppervlakkige afstroming en erosie. Op basis van de grote databank van gemeten P-AL-waarden in Vlaanderen in 2010-2012 (BDB), varieert de berekende maximale uitlogende fosforconcentratie op lange termijn sterk tussen Vlaamse gemeentes (0,031 – 0,321 mg o-P/l). Voor de stroombekkens in West-Vlaanderen worden de hoogste waarden vastgesteld. Het afspoelingsrisico voor P, berekend door het NEMO model, is daarentegen het hoogst voor het Bovenscheldebekken en het Demerbekken. Momenteel zijn fosforconcentraties in het grondwater vooral door natuurlijke processen bepaald (voorkomen van organisch materiaal en fosfaatnodule). Voor het oppervlaktewater zijn vooral de verhouding van de gehalten van fosfor over ijzer in het sediment en opgeloste zuurstofconcentraties bepalend voor de gemeten fosforconcentraties.

## 26.6 ONDERZOEKSNODEN

In dit project werden kritische P-AL-waarden afgeleid voor akkerbouwgewassen. Er werden geen bemestingsproeven uitgevoerd op weides waardoor geen kritische P-AL voor weides kon afgeleid worden. Deze afleiding zal ook enigszins anders moeten verlopen dan deze voor akkerbouwgewassen. Ten eerste wordt voor graslanden door sommigen een andere staalnamediepte gehanteerd in vergelijking met akkerbouw. Ten tweede is het fosforgehalte in gras, in tegenstelling tot het fosforgehalte in de meeste akkerbouwgewassen, wel belangrijk. Indien gebruikt in het voederrantsoen moet erover gewaakt worden dat er voldoende fosfor wordt voorzien. Naast de opbrengst moet in de proeven bijgevolg ook het fosforgehalte en de fosforopname door het gewas geëvalueerd worden. Het bemestingsadvies voor grasland in Nederland is daarom verschillend naargelang het beoogde fosforgehalte in het gras (Bussink *et al.*, 2011).

## 27 COMMUNICATIE

### 27.1 PERSBERICHT

Na afloop van het project zal een persbericht uitgestuurd worden door VLM. Het consortium heeft hiervoor een draft-tekst opgesteld.

### 27.2 CODE GOEDE LANDBOUWPRAKTIJK

Er werd een code van goed fosforbestedingspraktijk opgesteld op basis van literatuuronderzoek en de resultaten van dit fosforproject (zie bijlage 5). Daarbij wordt ingegaan op de achtergrond van fosfor in de bodem (begrippen en belang van de fosforvoorraad in de bodem), de streefzone voor fosforgehaltes (P-AL), bemestingsadviezen bij te hoog, te laag of gunstig fosforgehalte, goede management- en bemestingspraktijken. Deze praktijkgids voor landbouwers zal op de website van VLM beschikbaar zijn. Er zal naar deze brochure verwezen worden in het persbericht.

### 27.3 PRESENTATIES VOOR LANDBOUWERS EN ANDERE GEÏNTERESSEERDEN

Er is een presentatie opgesteld, gerelateerd aan de code voor goede fosforbestedingspraktijk, die gebruikt kan worden voor voorlichtingssessies. Deze presentatie is op 4 september 2018 reeds gegeven door Fien Amery op de Eerste Vlaamse Mestdag, georganiseerd door VCM en o.a. VLM (in iets andere vorm, gezien nog niet alle projectresultaten beschikbaar waren), en in bijgewerkte vorm op 6 december 2018 door Fien Amery op een CVBB-opleidingsdag.

### 27.4 WEBINAR VOOR LANDBOUWERS (ONDER VOORBEHOUD)

Er wordt wellicht begin 2019 in samenwerking met Farmcafé een webinar georganiseerd rond duurzame fosforbesteding. In deze webinar zal een presentatie gegeven worden, gevolgd door een vragenronde met vragen die landbouwers live insturen van achter hun computer/multimedia.

### 27.5 VOORLICHTINGSSESSIES

Er worden na afloop van het project twee voorlichtingssessies rond fosfor en de projectresultaten gegeven. Een eerste gaat door op de studienamiddag georganiseerd door VLM op Agriflanders op vrijdag 11 januari 2019. Daarnaast wordt later in 2019 een voorlichtingssessie georganiseerd voor VLM-medewerkers.

### 27.6 ARTIKEL OP MAAT VAN LANDBOUWERS VOOR MAP-MAN

Er is een artikel gemaakt rond duurzame fosforbesteding in het kader van de MAP-man-campagne. Dit artikel zal gepubliceerd worden in Boer & Tuinder en andere vakbladen.

## 28 REFERENTIES

- Barber, S.A., 1984. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., van der Draai, H., Temminghoff, E.J.M., 2011. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 2 grasland. Wageningen.

## 29 BIJLAGE 1: VELDPROEF 'DIGESTAATPROEF' VAN UGENT/VLACO (DIRK REHEUL)

### 29.1 INLEIDING

Sinds 2010 ligt in Melle een fosforveldproef aan onder beheer van UGent (professor Dirk Reheul). Naast vergelijking van effecten van verschillende fosforbestedingsdosissen met kunstmest, worden ook effecten van gelijke fosforbestedingsdosissen maar met verschillende bemestingstypes op de opbrengst en fosforopname nagegaan.

Tabel 117. Behandelingen in de veldproef in Melle

Behandeling	Bemestingsvorm	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> j <sup>-1</sup> )
P1	TSP	0
P2	TSP	15
P3	TSP	30
P4	TSP	45
P5	TSP	60
P6	TSP	75
P7	TSP	85
P8	TSP	95
GDZ	Gedroogd digestaat van organische afval en energiegewassen	85
GFT	Compost van gft-afval	85
EFF	Behandeld effluent van mechanische scheiding van digestaat van organisch afval, energiegewassen en drijfmest	85
Mm	Rundermest	85
GDM	Gedroogd digestaat van organische afval, energiegewassen en drijfmest	85
OBA	Biothermisch gedroogd organisch afval	85
DF	Dikke fractie van mechanische scheiding van digestaat van organisch afval, energiegewassen en drijfmest	85

### 29.2 OPZET

De veldproef is gelegen in Melle op een zandleembodem met 1,4% organische koolstof en pH-KCl van 6,2. In een compleet gerandomiseerd blokdesign met drie herhalingen (plot 8 x 8 meter) liggen sinds 2010 15 behandelingen aan: 8 met verschillende dosissen tripelsuperfosfaat en 7 organische bemestingsvormen met eenzelfde P-dosis (Tabel 117). Jaarlijks wordt 200 kg N ha<sup>-1</sup> en 207 kg K ha<sup>-1</sup> voorzien voor de kunstmestbehandelingen. Voor de behandelingen met organische bemesting werd de N- en K-dosis vanuit de organische bemesting aangevuld met NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> en KCl tot totaal 200 kg N ha<sup>-1</sup> en 207 kg K ha<sup>-1</sup>. Per jaar wordt één gewas geteeld, er wordt een vierjarige rotatie aangehouden. De

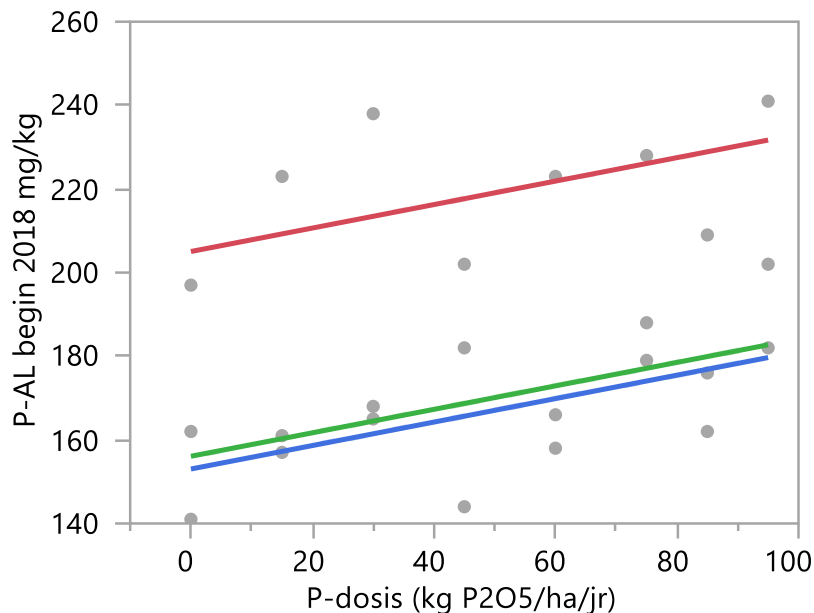
geteelde gewassen van 2010 tot 2018 waren achtereenvolgens maïs (2010), aardappelen (2011), voederbiet (2012), zomerhaver (2013), maïs (2014), aardappelen (2015), voederbiet (2016), zomertarwe (2017) en maïs (2018). Meer details zijn te vinden in Vanden Nest et al. (2015).

## 29.3 RESULTATEN

### 29.3.1 Fosforgehalte in de bodem

In 2011 was de gemiddelde P-AL 212 mg P/kg over het ganse proefveld. Er was een blokeffect aanwezig waarbij P-AL telkens significant hoger was in blok I. Er werden zowel begin 2011 als begin 2018 geen significante verschillen gevonden tussen de P-AL-waarden van de verschillende behandelingen (ANOVA). Ook P-CaCl<sub>2</sub> was niet verschillend tussen de behandelingen begin 2017.

Wanneer enkel de behandelingen met kunstmest geselecteerd werden, werd in het mixed model met random blokeffect een significante toename van P-AL met de jaarlijkse bemestingsdosis waargenomen (Figuur 146). Deze resultaten worden gebruikt voor de analyse van veranderingen in P-AL op lange termijn (DWP 3.2, luik 3).



Figuur 146. P-AL (mg P/kg), gemeten in maart 2018 in de digestaatproef, nam significant toe met de jaarlijkse bemestingsdosis gegeven aan de verschillende behandelingen ( $p=0,004$ ). P-AL lag hoger in blok 1 (rode lijn) dan in blok 2 (groen) en blok 3 (blauw).

### 29.3.2 Opbrengsten

Vermarktbaar opbrengsten van de verschillende behandelingen werden telkens vergeleken met deze van P7 als referentie (Dunnett's test). Waargenomen verschillen waren meestal klein, vooral in het begin van de proef. In 2011 was de aardappelopbrengst van P4 (gemiddeld 18291 kg ha<sup>-1</sup>) significant groter dan deze van P7 (15216 kg ha<sup>-1</sup>) door een onverklaarbare uitschieter van P4. Van 2010 tot en met 2014 werd er ook nooit een significant effect van de P-bemestingsdosis (enkel kunstmesttrap) waargenomen op de opbrengst.

In 2015 was de aardappelopbrengst van P1 (10032 kg ha<sup>-1</sup>) significant lager dan deze van P7 (11342 kg ha<sup>-1</sup>). Dat jaar was er ook een significant effect van de P-bemestingsdosis (enkel kunstmesttrap) op de opbrengst ( $p=0,003$ ). Ook in latere jaren werd een significant effect van de P-bemestingsdosis (enkel kunstmesttrap) op de opbrengst waargenomen: bij bieten in 2016 ( $p=0,015$ ), wintertarwe in 2017 niet ( $p=0,055$ ) en maïs in 2018 wel ( $p=0,015$ ). Ondanks dat P-AL ook toeneemt met de P-



bemestingsdosis (zie 29.3.1) werd nog geen significant effect van P-AL op de opbrengst waargenomen. De waarden voor P-AL liggen in of net boven de streefzone, en toch zijn er opbrengsttoenames mogelijk bij extra fosfobemesting. Deze resultaten worden gebruikt in DPW 2.1 voor de afleiding van de kritische P-AL voor opbrengstverliezen.

De nog steeds vrij hoge fosforbeschikbaarheid in het proefoppervlak kan verklaren waarom er na meer dan acht jaar nauwelijks verschillen in opbrengsten tussen de behandelingen waargenomen worden. Pas indien er tussen de kunstmesttrappen duidelijke verschillen worden gevonden in opbrengst, zal het mogelijk zijn om de bemestende waarde voor fosfor van de organische meststoffen te evalueren.

### 29.3.3 Koolstofgehalte en pH

Begin 2018 werden er significante verschillen in organische koolstofgehalte gevonden tussen de behandelingen ( $p=0,0025$ ). Zo was in de Dunnett's test het OC-gehalte in de behandeling met GFT (1,44% OC) significant hoger dan deze van de controle P7 (1,31% OC). Toepassing van compost gaf dus aanleiding tot een hoger koolstofgehalte in de bodem.

Op het vlak van pH-KCl waren er in 2018 geen verschillen tussen de behandelingen ( $p= 0,43$ ).

## 30 BIJLAGE 2: MONITORINGSPROEVEN

### 30.1 KADERING

In 2016 en 2017 werden monitoringsproeven uitgevoerd voor de kritische P-AL voor gewassen in Vlaanderen. Daarbij werd nagegaan of het fosforgehalte gemeten in het gewas onder kritische getabelleerde waarden viel. Indien dit het geval was, kan gesteld worden dat de P-AL gemeten in het perceel onvoldoende is (onder de kritische waarde voor P-AL). Deze informatie zou bijgevolg kunnen bijdragen om de initiële kritische P-AL, afgeleid uit de veldproeven uit omliggende regio's, te valideren voor Vlaanderen. Deze monitoringsproeven leverden echter weinig bruikbare informatie op. Soms werden bij zeer hoge P-AL nog lager dan kritische fosforgehaltes in het gewas opgemeten, en omgekeerd. Mogelijk zijn er andere factoren dan P-AL bepalend voor het fosforgehalte in het gewas. Daarom werd na 2017 beslist om deze monitoringsproeven niet verder uit te voeren. De bespreking van deze proeven is hieronder te vinden.

### 30.2 ALGEMEEN

Er wordt voor de veldmonitoring *niet* gekozen voor opbrengstanalyses aangezien deze sterk afhankelijk zijn van andere factoren als vochtigheid, weersomstandigheden, pH, bodembeheer,.... Er wordt gekozen voor plantfosforgehaltes omdat wordt vastgesteld dat fosforgehaltes in het gewas relatief minder variaties vertonen dan de gewasopbrengst in functie van de fosforbeschikbaarheid over verschillende locaties heen (Colomb *et al.*, 2007). De drempelwaarde voor gewasrespons zal aangepast worden als het gewasfosforgehalte systematisch bij een andere fosforbeschikbaarheidsindex dan de drempelwaarde suboptimaal wordt.

Elk jaar worden nieuwe percelen geselecteerd. In 2016 werd op de percelen zowel de fosforbeschikbaarheid (voorjaar, voor bemesten) als het fosforgehalte in het gewas bij oogst (zelfde locatie, met behulp van GPS) gemeten. Voor 2017 werd het protocol aangepast naar een gelijktijdige staalname (zie verder).

Er worden percelen geselecteerd waarop gras, maïs, wintertarwe, wintergerst, suikerbieten of aardappelen geteeld wordt zodat een validatie van de drempelwaarde voor deze gewassen mogelijk is. In elk perceel werd in een kleine strook (enkele m) in het voorjaar de fosforbeschikbaarheid gemeten (0-23 cm) en kort voor de oogst het fosforgehalte in een gewasstaal (met behulp van GPS).

### 30.3 KRITISCH FOSFORGEHALTE IN DE PLANT

Er wordt gecontroleerd of er bij fosforbeschikbaarheid beneden de initiële kritische P-AL voor gewasrespons (op basis van de langetermijn veldproeven uit omliggende regio's, zie Tabel 118) een suboptimaal fosforgehalte in het gewas wordt gemeten en of er bij fosforbeschikbaarheden boven de drempelwaarde een fosforgehalte in het gewas boven de kritische waarde wordt waargenomen. Kritische fosforgehaltes voor het gewas worden afgeleid op basis van literatuur. Hiervoor kunnen de rapporten over fosfaatgehaltes in Nederland (onder andere (Ehlert *et al.*, 2006; Ehlert *et al.*, 2009) en de tabelwaarden gebruikt in het ArcNEMO-model **niet** gebruikt worden omdat deze algemene of gemiddelde fosforgehaltes in de gewassen betreffen. Kritische fosforgehaltes worden uit verschillende publicaties gehaald, hoofdzakelijk gecompileerd in Reuter & Robinson (1997). Voor heel wat gewassen zijn de gegevens vrij beperkt voor de latere groeistadia (dicht bij de oogst). Deze gegevens werden daarom aangevuld met kritische fosforgehaltes afgeleid uit de langetermijn veldproeven van DWP 1.3 en studies gevonden in de literatuur. Het kritische fosforgehalte is als volgt af te leiden uit langetermijn veldproeven: deze ligt tussen het fosforgehalte gemeten in de behandeling met de hoogste relatieve opbrengst die significant lager is dan 100% en het fosforgehalte gemeten in de behandeling met de

laagste bemesting of bodemfosforgehalte met een relatieve opbrengst die niet significant verschilt van 100%. De afgeleide kritische fosforgehaltes zijn te vinden in Tabel 119, afgeleid uit de tabellen achteraan deze bijlage.

Tabel 118. Kritische fosforbeschikbaarheid (95% relatieve opbrengst) algemeen en specifiek voor wintertarwe, suikerbiet, wintergerst, maïs en aardappel voor zowel P-AL als P-CaCl<sub>2</sub>, op basis van veldproeven van DWP 1.3 buiten Vlaanderen (Nawara et al., 2017) Het 95% betrouwbaarheidsinterval staat tussen haakjes

Gewas	Kritische P-AL (mg P/kg)	Kritische P-CaCl <sub>2</sub> (mg P/kg)
Algemeen	73 (64-81)	1,7 (1,5-1,9)
Wintertarwe	69 (62-75)	1,7 (1,6-1,9)
Suikerbiet	77 (49-104)	1,2 (0,7-1,8)
Wintergerst	75 (48-102)	1,2 (0,7-1,7)
Maïs	46 (35-57)	1,2 (0,9-1,5)
Aardappel	200 (150-260)	7,8 (5,5-10,2)

Tabel 119. Kritische fosforgehaltes afgeleid uit literatuuronderzoek voor 6 gewassen

Gewas	Kritisch fosforgehalte bij oogst		Kritische fosforgehalte tijdens groeiseizoen		
	Gehalte (%)	Plantdeel	Staalname-moment	Gehalte (%)	Plantdeel
Maïs	0,25	Graan	Bloei	0,25	Blad rond kolf
	0,14-0,15	Ganse plant			
Wintertarwe	0,30-0,35	Graan	Maart	0,28	Volledige scheut
Wintergerst	0,19	Graan	Maart	0,30	Volledige scheut
Aardappelen	0,16	Knol	Vroege bloei	0,30	Jongste volwassen blad
Suikerbieten	<0,13	Wortel	September	0,18	Blad
Gras	0,25	Blad	Kort voor eerste snede	0,25	Blad

## 30.4 MONITORINGSPROEVEN 2016

### 30.4.1 Materiaal en methoden 2016

Er worden percelen geselecteerd met P-AL rond de kritische fosforbeschikbaarheid en met pH-KCl en %C in de streefzone of net daar buiten. De percelen en hun eigenschappen geselecteerd voor de validatieproeven in 2016 zijn weergegeven in Tabel 120. ILVO staat in voor de proeven op percelen 1 tot en met 6, terwijl BDB de overige percelen (7-13) voor zijn rekening neemt.

Tabel 120. Percelen geselecteerd voor monitoringsproeven in 2016

Nr	Gewas	Gemeente	Grondsoort	P-AL* (mg P/kg)	pH-KCl	%C
1	Wintertarwe	Herfelingen	Leem	88	6,3	1,3
2	Maïs	Ophasselt	Leem	65	6,5	1,04
3	Aardappel	Brakel	Lichte leem	121	6,0	1,2
4	Wintergerst	Moorsel	Lichte leem	58	6,3	1,1
5	Suikerbiet	Galmaarden	Leem	71-132**	6,6	1,3
6	Gras	Merelbeke	Zandleem	101-60**	5,8	1,6
7	Wintertarwe	Waanrode	Lichte leem	122	6,4	1,4
8	Maïs	Achel	Zand	82	5,6	2,9
9	Aardappel	Kanne	Leem	116	7,2	12
10	Wintergerst	Duisburg	Leem	118	7,2	0,8
11	Suikerbiet	Tongeren	Lichte leem	121	6,0	1,2
12	Gras	Rillaar	Lichte leem	134	5,7	1,0
13	Maïs	Lille	Zand	63	5,1	2,0

\* Specifiek gemeten in het proefoppervlak

\*\* Perceel werd op 2 punten bemonsterd (2 afzonderlijke proefvlakken)

In elk perceel werd in een kleine strook (enkele m<sup>2</sup>, uitgezet met RTK-GPS) in het voorjaar de fosforbeschikbaarheid gemeten (0-23 cm) en kort voor de oogst het fosforgehalte van het gewas. Belangrijk is daarbij om dat deel van het gewas te bemonsteren waarvan kritische fosforgehaltes beschikbaar zijn (Tabel 119). Het fosforgehalte wordt gemeten na drogen bij 70°C en correctie voor het restvochtgehalte (meting bij 105°C). Er wordt gecontroleerd of er bij een fosforbeschikbaarheid beneden de voorlopig vastgelegde drempelwaarde voor gewasrespons een fosforgehalte in het gewas beneden de kritische waarde wordt gemeten en of er bij fosforbeschikbaarheden boven de drempelwaarde een fosforgehalte in het gewas boven het kritische fosforgehalte wordt waargenomen.

De werkwijze gehanteerd in 2016 heeft enkele nadelen. Vaak zijn er minder literatuurgegevens van kritische fosforgehaltes beschikbaar bij het oogsttijdstip (zie tabellen achteraan de bijlage). Daarnaast zijn er twee staalnamemomenten nodig. Tussen deze twee momenten is er fosforbemesting mogelijk. Daarom werd voorgesteld om het protocol voor 2017 te veranderen. De staalname van bodem en gewas zou dan samen gebeuren op het moment waarvan de meeste consistente literatuurgegevens van kritische fosforgehaltes beschikbaar zijn (afhankelijk van het gewas, zie Tabel 119). Er zou daarbij op twee verschillende plekken van het perceel een staal (gewas+bodem) genomen worden. De variatie in fosforbeschikbaarheid binnen één perceel werd reeds meerdere keren opgemerkt. Op deze manier zouden ook meer data beschikbaar zijn voor analyse.

### 30.4.2 Resultaten 2016

In 2016 werden de gewasstalen telkens kort voor de praktijkooft genomen (Figuur 147). Het gemeten fosforgehalte van de stalen wordt in Tabel 121 vergeleken met het kritisch fosforgehalte voor gewasgroei (zie Tabel 119).



Figuur 147. Staalname van oogstrijpe wintergerst (6 juli 2016)

Tabel 121. Waargenomen en kritische (zie Tabel 119) fosforgehaltes in de monitoringsproeven van 2016.

Gewas	Perceel nr	Fosforgehalte gewas (%)		Fosforbeschikbaarheid bodem				
		Gemeten	Kritisch	P-AL (mg P/kg)	P-Ox (mg P/kg)	FVG (%)	P-Olsen (mg P/kg)	P-CaCl <sub>2</sub> (mg P/kg)
Wintertarwe	1	0,42	0,30-0,35 (graan)	88				2,2
	7	0,38		122	341	25	51	1.4
Maïs	2	0,24	0,25 (graan)	65				2,1
	8	-		82	-	-	-	-
	13	0,31		63	554	19	34	1.5
Aardappel	3	0,14	0,16 (knol)	121				2,4
	9	0,12		116	263	25	37	3.12
Wintergerst	4	0,38	0,19 (graan)	58				1,7
	10	0,46		118	245	26	26	<1,0
Suikerbiet	5a	0,41	0,12-0,18 (blad)	71				1,7
	5b	0,29		132				2,1
	11	0,29		121	353	28	47	2.8
	5a	0,14	<0,13 (wortel)	71				1,7
	5b	0,15		132				2,1
	11	0,18		121	353	28	47	2.8
Gras	6a	0,34	0,25 (blad)	101				3,5
	6b	0,34		60				3,9
	8	0,14		82	257	20		<1,0
	12	0,22		134	381	25	52	1.7

In de wintertarwe lag het fosforgehalte in de korrel op beide monitoringvelden boven het gestelde kritische fosforgehalte. Dit strookt met de gemeten P-AL-waarden van 88 en 122 mg P/kg die boven de voorlopig vastgestelde drempelwaarde voor wintertarwe van 69 mg P/kg lagen. Op perceel 7 werd ook P-Ox, FVG, P-Olsen en P-CaCl<sub>2</sub> bepaald. De gemeten P-Ox, FVG en P-Olsen lagen net als de gemeten P-AL boven de voorlopig vastgestelde drempelwaarde voor wintertarwe. P-CaCl<sub>2</sub> bedroeg 1,4 mg P/kg en lag net onder de gestelde kritische waarde van 1,7 mg P/kg. Op perceel 1 werd ook P-CaCl<sub>2</sub> bepaald, hier waren zowel de plant- als bodemwaarde niet kritisch.

Op perceel 8 te Achel werd maïs gezaaid, echter omwille van de extreme regenval mislukte de teelt en werd de maïs ondergeploegd. Op de overige maïspercelen, percelen 2 en 13, lag het P-AL-gehalte boven de voor maïs gestelde kritische waarde van 46 mg P/kg. Op perceel 2 lag het fosforgehalte gemeten in de korrel net onder het kritische fosforgehalte van 0,25 %. Voor P-CaCl<sub>2</sub> was P-CaCl<sub>2</sub> wel duidelijk boven de voorlopig vastgestelde kritische waarde. Op perceel 13 werden ook andere bodem P-testen gebruikt. P-Ox en P-Olsen lagen duidelijk boven de drempelwaarde. FVG en P-CaCl<sub>2</sub> lagen op

of net boven de drempelwaarde. Alle testen strookten met een plantfosforgehalte boven de kritische waarde.

Beide aardappelmonitoringvelden toonden een P-AL-waarde onder de drempelwaarde van 200 mg P/kg. Dit resulteerde op beide velden ook in een deficiënt fosforgehalte in de knollen. Ook alle andere bodem P-testen toonden een fosforbeschikbaarheid lager dan de gestelde drempelwaardes.

De gerstmonitoringvelden toonden uiteenlopende P-AL-waarden, onder en boven de drempelwaarde van 100 mg P/kg. Toch lag het fosforgehalte in de korrel op beide locaties ruim boven de kritische waarde van 0,19%. Op perceel 10 lagen de resultaten van de overige fosforbodentesten steeds onder de drempelwaardes in tegenstelling tot de P-AL-waarde. Op perceel 4 lag P-CaCl<sub>2</sub> in tegenstelling tot P-AL boven de kritische drempelwaarde.

In de suikerbieten werden geen fosforgehaltes lager dan de kritische waarde gemeten, noch in de wortel bij de oogst, noch in het loof op een eerder tijdstip. Op perceel 5 werden bladeren bemonsterd op 1 september en op perceel 11 werden bladstalen genomen op 9 augustus. De voldoende hoge plantfosforgehaltes stroken met de P-AL-waarde en P-CaCl<sub>2</sub>-waarde hoger dan de drempelwaarde op perceel 5b en 11. Op perceel 5a lag de P-AL-waarde wel onder de drempelwaarde. Op perceel 11 bevestigden ook de overige P-bodentesten de P-AL-waarde en het hogere plantfosforgehalte door boven de voorlopig gestelde drempelwaardes te liggen.

De grasmonitoringpercelen toonden een P-AL-range van 60 tot 134 mg P/kg. Ook de plantfosforgehaltes toonden een zekere spreiding doch het verloop was niet in overeenstemming met het verloop in P-AL-waarde. In de meerjarige proeven werd geen gras opgevolgd en uit de resultaten van de potproef kunnen geen kritische drempelwaarden voor gras afgeleid worden. Daarom worden de gemiddelde kritische P-waarden als referentiepunt gebruikt. Uitgaande van de voorlopige gemiddelde drempelwaarde voor P-AL van 73 mg/kg was er slechts één grasperceel waar een deficiënt fosforgehalte kon verwacht worden, perceel 6b. Op dit perceel was het fosforgehalte nochtans hoger dan het kritische fosforgehalte voor gras. Het relatief hoge fosforgehalte in het gras op perceel 6 (a en b) is beter gereflecteerd in de relatief hoge P-CaCl<sub>2</sub>-waarden dan in de relatief lage P-AL-waarden. Op percelen 8 en 12 lag het fosforgehalte wel onder het kritische fosforgehalte hoewel de fosforbeschikbaarheid bepaald in AL-extract hoger was dan de gemiddelde drempelwaarde. Op perceel 8 lagen de gemeten FVG en P-CaCl<sub>2</sub> wel onder de gemiddelde drempelwaarde.

In Tabel 122 blijkt dat in 61 tot 78 % van de waarnemingen een fosforgehalte hoger dan het kritische P-gehalte strookte met een fosforbeschikbaarheid groter dan de drempelwaarde of een suboptimaal fosforgehalte strookte met een fosforbeschikbaarheid lager dan de drempelwaarde. In gerst en gras was er minder overeenstemming tussen de bodem- en plantwaarnemingen. Vooral voor P-AL dienen de kritische drempelwaardes wellicht nog aangepast. Voor P-CaCl<sub>2</sub> lijkt dit het minst aan de orde. Hierbij dient nogmaals opgemerkt te worden dat voor gras geëvalueerd werd ten opzichte van de gemiddelde kritische P-waarden. Wanneer de waarnemingen op de graspercelen niet worden meegenomen, wijzigt ook de score van de verschillende meetmethodes (P-AL: 71 %; P-Ox: 83 %; FVG: 67 %; P-Olsen: 83 %; P-CaCl<sub>2</sub>: 79 %).

Tabel 122: Duiding fosforgehaltes en fosforbeschikbaarheden ten opzichte van het kritische fosforgehalte en de voorlopige kritische P-AL-waarden (Tabel 118) in de monitoringsproeven van 2016

Gewas	Perceel nr	Fosforgehalte gewas (%)		Fosforbeschikbaarheid bodem				
		Gemeten	Kritisch	P-AL (mg P/kg)	P-Ox (mg P/kg)	FVG (%)	P-Olsen (mg P/kg)	P-CaCl <sub>2</sub> (mg P/kg)
Wintertarwe	1	>	0,30-0,35 (graan)	>				>
	7	>		>	>	>	>	<
Maïs	2	<	0,25 (graan)	>				>
	13	>		>	>	=	>	>=
Aardappel	3	<	0,16 (knol)	<				<
	9	<		<	<	<	<	<
Wintergerst	4	>	0,19 (graan)	<				>
	10	>		>	<	<	<	<
Suikerbiet	5a	>	0,12-0,18	<				>
	5b	>		>				>
	11	>		>	>	>	>	>
	5a	>	<0,13 (wortel)	<				>
	5b	>		>				>
	11	>		>	>	>	>	>
Gras	6a	>	0,25 (blad)	>				>
	6b	>		<				>
	8	<		>	>	<		<
	12	<		>	>	>	>	>=
<b>Aantal waarnemingen</b>				18	8	8	7	18
<b>Aantal</b>	waarnemingen bodem en gewas overeenstemmend			11	5	5	5	14
<b>%</b>				61 %	63 %	63 %	71 %	78 %

## 30.5 MONITORINGSPROEVEN 2017

### 30.5.1 Materiaal en methoden 2017

Er worden percelen geselecteerd met P-AL rond de kritische fosforbeschikbaarheid en met pH-KCl en %C in de streefzone of net daar buiten. De percelen en hun eigenschappen geselecteerd voor de monitoringsproeven in 2017 zijn weergegeven in Tabel 123.



Op elk perceel worden twee uiteen liggende kleine stalname-oppervlaktes (enkele m<sup>2</sup>) gekozen. In elk stalname-oppervlak wordt een bodemstaal genomen (0-23 cm) waarop de fosforbeschikbaarheid (P-AL en P-CaCl<sub>2</sub>) wordt bepaald. In dezelfde oppervlakte wordt ook een gewasstaal genomen. Het moment van stalname en gewasdeel is in tegenstelling tot 2016 niet bij oogst, maar tijdens het groeiseizoen en verschillend per gewas (zie Tabel 119). In vergelijking met 2016 zijn er veel meer stalen genomen (meer percelen en telkens 2 per perceel). Het fosforgehalte wordt gemeten na drogen bij 70°C (of bij 105°C) en correctie voor het restvochtgehalte (meting bij 105°C). Er wordt gecontroleerd of er bij fosforbeschikbaarheid beneden de initiële kritische bodemfosforgehaltes (Tabel 118) een suboptimaal fosforgehalte in het gewas wordt gemeten en of er bij fosforbeschikbaarheden boven de drempelwaarde een fosforgehalte in het gewas boven de kritische waarde wordt waargenomen. Kritische fosforgehaltes voor het gewas werden afgeleid op basis van literatuur (zie 7.3) en zijn terug te vinden in Tabel 119.

### 30.5.2 Resultaten 2017

De resultaten van de monitoringsproeven worden weergegeven in Tabel 123. Er werden geen duidelijke relaties gevonden tussen de P-beschikbaarheid in de bodem (noch voor P-AL, noch voor P-CaCl<sub>2</sub>) en het P-gehalte in het gewas. Soms, zoals voor maïs, waren P-gehaltes in het gewas op een bodem in de BDB-streefzone lager dan P-gehaltes in het gewas op een bodem in BDB-fosforklasse 'zeer laag' of 'laag'. Voor wintergerst en gras werden nooit lagere dan kritische P-gehaltes gevonden, ondanks de soms zeer lage fosforbeschikbaarheid in de bodem. Mogelijk is niet alleen fosfor maar zijn andere factoren (beperkt vochtgehalte, andere elementen...) limiterend. Daarnaast is het mogelijk dat de kritische fosforbeschikbaarheid afgeleid uit de literatuur (Tabel 119) voor onze streken en rassen minder correct is. Ook is het mogelijk dat het fosforgehalte in de plant varieert in de tijd. Zo werd recent in een Deense studie vastgesteld dat fosforgehaltes in gerst sterk variëren op korte tijd (Carstensen, 2017). Zo werd voor zomergerst waargenomen dat fosforgehaltes in het blad op een lage P-bodem hoger dan 3 g/kg waren 28 dagen na zaaien, maar onder 2 g/kg daalden tussen dag 35 en dag 46, om op dag 56 weer meer dan 2 g/kg te bedragen. Hoewel er geen verschillen in fosforgehaltes op dag 28 en dag 56 waren tussen behandelingen met en zonder fosforbemesting, werd in de opbrengst wel degelijk een fosforrespons op bemesting waargenomen.

Omwille van bovenstaande is het moeilijk om met deze data aan de slag te gaan om de kritische P-AL en P-CaCl<sub>2</sub> voor Vlaanderen verder te verfijnen. Er werd daarom aan de stuurgroep voorgesteld om in 2018 geen monitoringsproeven op te volgen, maar twee extra bemestingsproeven aan te leggen. Het akkoord van de stuurgroep werd gegeven.

Tabel 123. Resultaten van de monitoringsproeven van 2017: locatie, bodemeigenschappen, P-beschikbaarheid (P-AL en P-CaCl<sub>2</sub>) en P-gehalte van het gewas uitgedrukt ten opzichte van absolute droge stofgehalte (gedroogd bij 105°C, gemeten en kritieke referentiewaarde, zie Tabel 119). Kritische waarden voor P-beschikbaarheid in bodem: zie Tabel 118, voor gras werd de algemene waarde genomen.

Locatie	textuur	pH-KCl	%OC	gewas	P-AL (mgP/kg)	P-CaCl <sub>2</sub> * (mgP/kg)	P-gewas gemeten (%P/ads)	P-gewas kritisch (%P/ads)
Poperinge2	zandleem	5,2	3,62	aardappelen	77	2,1	0,25	0,3
Tervuren2	leem	7,5	1,5	aardappelen	90	1,8	0,34	0,3
Assenede1	zand	6	1,86	aardappelen	96	1,3	0,28	0,3
Assenede 2	zand	6	1,86	aardappelen	96	1,5	0,28	0,3
Tervuren1	leem	7	1,19	aardappelen	108	1,9	0,33	0,3
Kessel-Lo1	zandleem	5,9	0,7	aardappelen	177	3,7	0,28	0,3
Kortenberg2	leem	5,9	1,18	aardappelen	206	5,6	0,32	0,3
Kessel-Lo2	zandleem	6	1,06	aardappelen	210	3,5	0,25	0,3
Kortenberg1	leem	6,3	1,14	aardappelen	229	4,6	0,41	0,3
Vleteren1	zandleem	6,2	0,94	aardappelen	247	5	0,25	0,3
Vleteren2	zandleem	6,2	0,94	aardappelen	349	5,8	0,27	0,3
Poperinge 1	zandleem	5,2	3,62	aardappelen	360	6,1	0,34	0,3
Tervuren1	leem	5,5	1,7	gras	<40	2,4	0,25	0,25
Huldenberg2	leem	5,5	2,4	gras	63	3,6	0,33	0,25
Huldenberg1	leem	5,1	1,8	gras	64	3,2	0,29	0,25
Tervuren2	leem	5,6	1,9	gras	73	2,8	0,30	0,25
Beervelde 1.1	zand	5,2	3,93	gras	109	3,4	0,37	0,25
Beervelde 1.2	zand	5,2	3,93	gras	110	3	0,30	0,25
Beervelde 2.1	zand	4,9	2,47	gras	141	1,9	0,32	0,25
Beervelde 2.2	zand	4,9	2,47	gras	303	3,7	0,34	0,25
Brecht2.2	zand	5,7	1,72	maïs	31	0,9	0,25	0,25
Brecht1.1	zand	5,4	2,41	maïs	33	1,1	0,24	0,25
Brecht1.2	zand	5,4	2,41	maïs	34	1,4	0,24	0,25
Brecht2.1	zand	5,7	1,72	maïs	47	1,0	0,24	0,25
Schoonaarde1	zandleem	5,1	1,5	maïs	69	1,3	0,21	0,25
Tielt-Winge1	zandleem	6,1	1,07	maïs	78	1,1	0,22	0,25
Tielt-Winge2	zandleem	6,3	0,94	maïs	78	1,3	0,23	0,25
Diest1	zandleem	5,7	1,7	maïs	88	<0,97	0,26	0,25
Diest2	zandleem	5,9	1,23	maïs	95	1,0	0,27	0,25

<b>Schoonaarde2</b>	zandleem	5,1	1,5	maïs	97	1,5	0,20	0,25
<b>GlabbEEK2</b>	leem	6,5	1,4	maïs	136	1,2	0,25	0,25
<b>Lierde2</b>	leem	6,1	0,9	maïs	136	2,9	0,17	0,25
<b>Lierde1</b>	leem	6,1	0,9	maïs	150	3,5	0,19	0,25
<b>GlabbEEK1</b>	leem	6,2	1,4	maïs	154	1,1	0,27	0,25
<b>RiemstB1</b>	leem	5,1	0,93	suikerbiet	47	1,6	0,17	0,18
<b>Bekkevoort2</b>	leem	6	1,7	suikerbiet	57	1,5	0,27	0,18
<b>RiemstB2</b>	leem	7,1	1,2	suikerbiet	98	2,0	0,16	0,18
<b>RiemstA1</b>	leem	6,3	1,22	suikerbiet	107	2,4	0,26	0,18
<b>Diest1</b>	zand	5,3	2,8	suikerbiet	117	1,3	0,25	0,18
<b>Bekkevoort1</b>	leem	6,3	1,4	suikerbiet	120	1,2	0,26	0,18
<b>RiemstA2</b>	leem	7	1,5	suikerbiet	140	2,8	0,22	0,18
<b>Diest2</b>	zand	5,2	2,5	suikerbiet	142	2,0	0,23	0,18
<b>Grt-Bijgaarden2</b>	leem	6,9	1,84	suikerbiet	228	3,6	0,37	0,18
<b>Mannekensvere2</b>	Polder	7,7	1,54	suikerbiet	232	1,9	0,28	0,18
<b>Grt-Bijgaarden1</b>	leem	6,9	1,84	suikerbiet	235	3,4	0,34	0,18
<b>Mannekensvere1</b>	Polder	7,7	1,54	suikerbiet	326	2,4	0,24	0,18
<b>Rommersom1</b>	leem	6,2	0,92	wintergerst	41	1,21	0,34	0,3
<b>Ninove2</b>	leem	6,3	1,63	wintergerst	55	1,2	0,49	0,3
<b>Rommersom2</b>	leem	6,2	0,71	wintergerst	84	<0,97	0,39	0,3
<b>Leuven2</b>	zandleem	6,3	1,4	wintergerst	117	<0,97	0,42	0,3
<b>Leuven1</b>	zandleem	6,3	1,8	wintergerst	123	<0,97	0,40	0,3
<b>Gingelom2</b>	leem	6,5	0,75	wintergerst	198	2,4	0,51	0,3
<b>Ninove1</b>	leem	6,3	1,63	wintergerst	244	5,2	0,69	0,3
<b>Gingelom1</b>	leem	7,0	1,34	wintergerst	278	4,9	0,61	0,3
<b>Ekeren B2</b>	zand	4,8		wintertarwe	32	1,5	0,25	0,28
<b>Ekeren B1</b>	zand	4,8		wintertarwe	49	1,2	0,24	0,28
<b>Boutersem1</b>	leem	6,2	1,35	wintertarwe	56	<0,97	0,32	0,28
<b>DiestA2</b>	zand	4,3	1,20	wintertarwe	78	1,7	0,39	0,28
<b>Boutersem2</b>	leem	6,4	1,36	wintertarwe	81	<0,97	0,40	0,28
<b>Bekkevoort2</b>	zandleem	6,3	1,1	wintertarwe	81	<0,97	0,15	0,28
<b>Bekkevoort1</b>	zandleem	6,2	0,8	wintertarwe	85	1,2	0,16	0,28
<b>DiestA1</b>	zand	4,9	1,35	wintertarwe	91	1,5	0,31	0,28
<b>Ekeren A2</b>	zand	5,6	1,86	wintertarwe	113	2,2	0,38	0,28
<b>DiestB1</b>	zand	5,6	1,88	wintertarwe	125	<0,97	0,27	0,28

<b>DiestB2</b>	zand	5,4	1,73	wintertarwe	142	<0,97	0,31	0,28
<b>Ekeren A1</b>	zand	5,6	1,86	wintertarwe	155	2,1	0,37	0,28

\*Waarden P-CaCl<sub>2</sub> <0,97 mg/kg: onder detectielimiet van BDB; waarden >0,97-<2 mg/kg: boven detectielimiet, onder rapportagegrens BDB (ILVO: rapportagegrens 0,8 mg/kg)

## 30.6 TABELLEN KRITISCHE FOSFORGEHALTES

Tabel 124. Resultaten van studies naar fosforgehalte in maïs

Maïs		Concentratie (%)						Land	Referentie
Groeistadium	Plantendeel	Onvoldoende	Marginaal	Kritisch	Voldoende	Hoog			
40-60 cm grootte	Volledige scheut			0,22 – 0,26			VS	(Reuter & Robinson, 1997)	
6 bladeren	Volledige scheut			0,5			Canada	(Reuter & Robinson, 1997)	
5-6 bladeren	Volledige scheut			0,48-0,53			VS	(Stammer, 2015)	
5-6 bladeren	Volledige scheut			0,34			VS	(Mallarino, 1996)	
40 – 45 dagen na zaaien	Bladeren			0,26 – 0,29			Benin	(Dagbenonbakin et al., 2013)	
40 – 45 dagen na zaaien	Bladeren			0,23 – 0,30			Nigeria	(Dagbenonbakin et al., 2013)	
40-60 cm grootte	Jongste (bovenste) volwassen bladschijf				0,35-0,6		Duitsland	(Reuter & Robinson, 1997)	
Voor de pluimvorming	Jongste (bovenste) volwassen bladschijf			0,26			VS	(Reuter & Robinson, 1997)	
Bloeminitiatie	Jongste (bovenste) volwassen bladschijf			0,26			Pakistan	(Reuter & Robinson, 1997)	
Pluimvorming	Blad rond de kolf			0,25-0,32			VS	(Stammer, 2015)	
Pluimvorming	Blad rond de kolf			0,24			VS	(Mallarino, 1996)	
Pluimvorming	Blad rond de kolf				0,2		Nieuw-Zeeland	(Reuter & Robinson, 1997)	
Pluimvorming	Blad rond de kolf	< 0,29	0,3 – 0,32	0,33 – 0,34		> 0,35	Frankrijk	(Reuter & Robinson, 1997)	

<b>Overgang tussen pluimvorming en baardvorming</b>	Blad rond de kolf	< 0,16	0,16 – 0,24		0,25 – 0,45	0,46 - 0,8	Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Bloei</b>	Blad tegenover de kolf			0,25			Hongarije	(Csathó <i>et al.</i> , 2002)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf	< 0,15	0,16 – 0,24		0,25 – 0,4	0,41 – 0,5	VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf				0,25 – 0,4		Duitsland	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf	< 0,15	0,15 – 0,17		0,17 – 0,32	> 0,32	Nieuw-Zeeland	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf				0,22 – 0,23		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf			0,27			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf			0,23			Nigeria	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf			0,3			Nigeria	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf			0,23 – 0,25			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf			0,27			Thailand	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Pluim volledig gevormd</b>	Blad rond de kolf			0,25			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Pluim volledig gevormd</b>	Blad rond de kolf				0,25		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf			0,28 – 0,32			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf			0,28			VS	(Reuter & Robinson, 1997)

<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf	< 0,2			> 0,29		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf	0,22 – 0,32			0,27 – 0,62		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	Blad rond de kolf			0,18			Brazilië	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	2 <sup>e</sup> blad onder de kolf			0,23			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	6 <sup>e</sup> bladschijf boven de basis			0,32			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Baardvorming</b>	6 <sup>e</sup> bladschijf boven de basis	< 0,21	< 0,3		> 0,33		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Plant klaar om te oogsten</b>	Graan			0,29			Pakistan	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Plant klaar om te oogsten</b>	Graan			0,28			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
<b>Plant klaar om te oogsten</b>	Graan			0,30	0,32		Québec	(Messiga <i>et al.</i> , 2010)
<b>Plant klaar om te oogsten</b>	Shoot			0,14-0,15	0,18-0,21		Frankrijk	Plénets et al.
<b>Plant klaar om te oogsten</b>	Graan			0,188	0,226		Frankrijk	(Colomb <i>et al.</i> , 2007) + unpublished data
<b>Plant klaar om te oogsten</b>	Kolf				0,249		Vlaanderen	Vanden Nest, unpublished data
	Restplant				0,083			
	Volledige plant				0,176			

Tabel 125. Resultaten van studies naar fosforgehalte in suikerbieten

Suikerbieten		Concentratie (%)						Land	Referentie
Groei stadium	Plantendeel	Onvoldoende	Marginaal	Kritisch	Voldoende	Hoog			
Plant klaar om te oogsten	Volledige scheut				> 0,21		India	(Reuter & Robinson, 1997)	
Vegetatief stadium	Bladsteel van het jongste volwassen blad			0,12			VS	(Reuter & Robinson, 1997)	
Vegetatief stadium	Jongste volwassen bladschijf			0,18			VS	(Reuter & Robinson, 1997)	
Plant klaar om te oogsten	Bladschijf	< 0,23					VS	(Reuter & Robinson, 1997)	
Plant klaar om te oogsten	Bladsteel	< 0,16					VS	(Reuter & Robinson, 1997)	
Plant klaar om te oogsten	Wortels	< 0,17					VS	(Reuter & Robinson, 1997)	
Plant klaar om te oogsten	Suikerbiet zonder loof				0,30		Duitsland	(Jungk <i>et al.</i> , 1993)	
50 – 80 dagen na zaaien	Volwassen blad	< 0,45			0,45 – 1,10	> 1,1	VS	(Reuter & Robinson, 1997)	
50 – 60 dagen na zaaien	Volwassen blad				0,35 – 0,60		Duitsland	(Reuter & Robinson, 1997)	
Oogst	Wortel				0,129; 0,155; 0,176		België	Vanderdeelen <i>et al.</i> , 1985) + unpublished data	



Tabel 126. Resultaten van studies naar fosforgehalte in tarwe

Tarwe		Concentratie (%)					Land	Referentie
Groeistadium	Plantendeel	Onvoldoende	Marginaal	Kritisch	Voldoende	Hoog		
Meer dan 90 dagen na zaaien	Volledige scheut			0,23 ± 0,03			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
44 dagen na zaaien	Volledige scheut			0,28			Duitsland	(Reuter & Robinson, 1997)
1-knopenstadium	Volledige scheut			0,18 – 0,22			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
≤ 30 cm grootte	Volledige scheut			0,28			Pakistan	(Reuter & Robinson, 1997)
Laat uitlopen	Volledige scheut		0,16 – 0,2	0,2	> 0,2		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Pluimzwellling	Volledige scheut			0,3			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Eerste kafnaalden zichtbaar	Volledige scheut				0,15 – 0,3		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Eerste kafnaalden zichtbaar	Volledige scheut	< 0,15	0,15 – 0,2		0,21 – 0,5	> 0,5	VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Eerste kafnaalden zichtbaar	Volledige scheut	0,15 – 0,19			0,2 – 0,5	> 0,5	VS	(Reuter & Robinson., 1997)
Net voor aarvorming	Bovenste 2 bladeren	0,11 – 0,2			0,21 – 0,5	0,51 – 0,8	VS	(Reuter & Robinson., 1997)
1-knopenstadium	Jongste verschenen bladschijf met bladoortjes			0,21 – 0,25			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)

36 dagen na zaaien	Jongste volwassen bladschijf			0,39			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Midden tot laat uitlopen	Jongste volwassen bladschijf	< 0,24	0,24 – 0,29		0,3 – 0,5	0,6 – 0,7	Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Bloei initiatie	Jongste volwassen bladschijf			0,3			Pakistan	(Reuter & Robinson, 1997)
Uitlopen	Bladschijf	< 0,31	0,32 – 0,34		0,35 – 0,49	> 0,49	Sovjet-Unie	(Reuter & Robinson, 1997)
Bloeien	Bladschijf	< 0,22	0,23 – 0,24		0,25 – 0,34	> 0,4	Sovjet-Unie	(Reuter & Robinson, 1997)
Voor aarvorming	Bovenste bladschijf				0,2 – 0,4		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Bloeien	1 <sup>e</sup> en 2 <sup>e</sup> bladschijf onder vangblad	0,25	0,26 – 0,33	~ 0,34	0,34 – 0,36	> 0,36	Frankrijk	(Reuter & Robinson, 1997)
2 uitlopers	Oudste bladschijf						Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Plant klaar om te oogsten	Graan			0,18 – 0,2			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Plant klaar om te oogsten	Graan		0,25 – 0,5	~ 0,37	0,37 – 0,53		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Plant klaar om te oogsten	Graan		< 0,25	~ 0,4			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Plant klaar om te oogsten	Graan		0,15 – 0,19		0,20 – 0,29		Australië	(Reuter & Robinson., 1997)
Plant klaar om te oogsten	Graan			0,27 ± 0,02			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)

Plant klaar om te oogsten	Graan			0,22			Pakistan	(Reuter & Robinson, 1997)
Plant klaar om te oogsten	Graan	0,29 – 0,31			0,33		Nieuw-Zeeland	(Reuter & Robinson., 1997)
Plant klaar om te oogsten	Graan	< 0,25		0,25 – 0,3	0,3 – 0,5	> 0,36	Australië	Noack et al., 2014)
Plant klaar om te oogsten	Graan				0,33		Duitsland	(Jungk <i>et al.</i> , 1993)
Plant klaar om te oogsten	Graan			0,236-0,348-0,342-0,385	0,313-0,316-0,401-0,428		Frankrijk	(Colomb <i>et al.</i> , 2007) + unpublished data

Tabel 127. Resultaten van studies naar fosforgehalte in aardappelen

Aardappelen		Concentratie (%)						
Groeistadium	Plantendeel	Onvoldoende	Marginaal	Kritisch	Voldoende	Hoog	Land	Referentie
28 dagen na planten	Volledige scheut				0,72 – 0,81		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
35 dagen na planten	Volledige scheut				0,79 – 0,88		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Vroeg bloeien	Volledige scheut				0,48 – 0,62		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Vroeg bloeien	Jongste volwassen bladschijf	< 0,35			> 0,47		Canada	(Reuter & Robinson, 1997)
10 – 20 mm knol	Jongste volwassen blad				0,35 – 0,59		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Vroeg bloeien	Jongste volwassen blad			0,30	0,35 – 0,55		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Vroeg bloeien	Jongste volwassen blad			0,36 – 0,53			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Vroeg bloeien	Jongste volwassen blad	< 0,23	0,23 – 0,29		0,30 – 0,55	> 0,60	Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
42 dagen na verschijnen	Jongste volwassen blad				0,2 – 0,4		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
42 dagen na verschijnen	Jongste volwassen blad			0,25			Zuid-Afrika	(Reuter & Robinson, 1997)
Laat bloeien	Jongste volwassen blad			0,25			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
50 dagen na opkomst	Bladeren			0,182			Brazilië	(Rocha <i>et al.</i> , 1997)

50 dagen na opkomst	Stengels			0,130			Brazilië	(Rocha <i>et al.</i> , 1997)
50 dagen na opkomst	Knollen			0,249			Brazilië	(Rocha <i>et al.</i> , 1997)
50 dagen na opkomst	Blaadjes			0,226			Brazilië	(Rocha <i>et al.</i> , 1997)
Knollen half gegroeid tot oogst	Actieve bladeren			0,22			Canada	(Westermann and Kleinkopf, 1985)
Laat bloeien	Jongste volwassen blad	< 0,20	0,20 – 0,24		0,25 – 0,45	> 0,50	Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Knollen half gegroeid	Jongste volwassen blad				0,2 – 0,4		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Knollen half gegroeid	Jongste volwassen blad				0,1 – 0,3		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
60 mm knol	Jongste volwassen blad				0,37 – 0,45		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
74 dagen na planten	Jongste volwassen blad				0,32 – 0,33		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
100 mm knol	Jongste volwassen blad				0,26		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Knol ophoping	Jongste volwassen blad	< 0,15	0,15 – 0,25		> 0,50		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Vroeg bloeien	Volwassen blad	< 0,20	0,20 – 0,30		0,30 – 0,45		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Knol initiatie	Bladsteel van het jongste volwassen blad			0,38 – 0,45			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
40 – 45 dagen na verschijnen	Bladsteel van het jongste volwassen blad			0,29 – 0,35			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)

Knol ophoping	Bladsteel van het jongste volwassen blad	< 0,17	0,17 – 0,22		> 0,22		VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Volwassen knollen	Bladsteel van het jongste volwassen blad			0,14 – 0,17			VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Knol bij oogst	Knol				0,17		België	Vanden Nest, unpublished data
Knol bij oogst	Knol			0,134; 0,145	0,174; 0,193; 0,195		België	Vanderdeelen <i>et al.</i> , 1985) + unpublished data

Tabel 128. Resultaten van studies naar fosforgehalte in gerst

Gerst		Concentratie (%)					Land	Referentie
Groei stadium	Plantendeel	Onvoldoende	Marginaal	Kritisch	Voldoende	Hoog		
Eerste kafnaalden zichtbaar	Volledige scheut	< 0,15	0,15 – 0,19		0,2 – 0,5	> 0,5	VS	(Reuter & Robinson, 1997)
Bloei	Volledige scheut	< 0,15			0,2 – 0,3		Verenigd Koninkrijk	(Reuter & Robinson, 1997)
Midden tot laat uitlopen	Jongste volwassen bladschijf	< 0,24	0,24 – 0,29		0,3 – 0,5	0,6 – 0,7	Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Uitlopen	Bladeren	< 0,44	0,45 – 0,49		0,5 – 0,68	> 0,68	Sovjet-Unie	(Reuter & Robinson, 1997)
Vorming van de scheut	Bladeren	< 0,37	0,38 – 0,41		0,42 – 0,48	> 0,48	Sovjet-Unie	(Reuter & Robinson, 1997)
Bloei	Bladeren	< 0,27	0,28 – 0,3		0,31 – 0,42	> 0,42	Sovjet-Unie	(Reuter & Robinson, 1997)
50 dagen na zaaien	Volledig ontwikkelde groene bladschijf	< 0,17	0,21 – 0,25		0,26 – 0,27		India	(Reuter & Robinson, 1997)
Bloei	1 <sup>e</sup> en 2 <sup>e</sup> blad onder het vlagblad			0,3 – 0,35			Frankrijk	(Reuter & Robinson, 1997)
Plant klaar om te oogsten	Graan			0,19 – 0,26			Australië	(Reuter & Robinson, 1997)

Tabel 129. Resultaten van studies naar fosforgehalte in raaigras

Raaigras		Concentratie (%)					Land	Referentie
Groeistadium	Plantendeel	Onvoldoende	Marginaal	Kritisch	Voldoende	Hoog		
Vegetatief stadium	Volledige scheut	< 0,30	0,30 – 0,34		0,35 – 0,40	> 0,40	Nieuw-Zeeland	(Reuter & Robinson, 1997)
34 – 50 dagen na zaaien	Volledige scheut			0,33			Duitsland	(Reuter & Robinson, 1997)
49 – 105 dagen na verschijnen	Volledige scheut		0,21		0,44		Nieuw-Zeeland	(Smith <i>et al.</i> , 1985)
Variabel	Volledige scheut			0,20			Verenigd Koninkrijk	(Reuter & Robinson, 1997)
Eerste bloei	Volledig scheut boven 5 cm				0,35 – 0,50		Duitsland	(Reuter & Robinson, 1997)
Vegetatief stadium	Jongste volwassen bladschijf	0,13	0,18 – 0,21		0,25 – 0,55	0,60 – 0,75	Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
Jaar na zaaien	Jongste volwassen bladschijf			0,28			Verenigd Koninkrijk	(Reuter & Robinson, 1997)
Bloei	Blad	< 0,20			0,20 – 0,40		Australië	(Reuter & Robinson, 1997)
30-90 dagen na zaaien	Blad			0,29			België	Vanden Nest, unpublished data



## 31 BIJLAGE 3: LITERATUURSTUDIE DWP 3.1: VERANDERINGEN IN FOSFORBESCHIKBAARHEID

### 31.1 KADERING

In luik 1 van het VLM-project 'Milieukundig en economisch verantwoord fosforgebruik' wordt een methode geselecteerd die de fosforbeschikbaarheid voor het gewas en voor uitloging het best weergeeft. In luik 2 wordt een streefzone voor de fosforbeschikbaarheid, gemeten met deze methode, vastgesteld. Voor een milieukundig en economisch verantwoord fosforgebruik is het van belang dat de fosforbeschikbaarheid in een bodem naar deze streefzone evolueert. Het is daarbij de vraag welke fosfordosis (positief of negatief) nodig is om de fosforbeschikbaarheid te verhogen of te verlagen. Dit zal ook afhangen van de bodemeigenschappen, meer bepaald de fosforbuffereigenschappen. Het gedrag van fosfor in de bodem en de verandering van de fosforbeschikbaarheid in de tijd wordt in deze literatuurstudie onderzocht. Deze literatuurstudie zal ook aan de basis liggen van labo-, serre- en veldproeven waarin evoluties van fosforbeschikbaarheid bij verschillende fosforbemestingsdoses en bij verschillende bodems worden nagegaan.

Om fosfordoses te kunnen adviseren, is kennis nodig over het gedrag van fosfor in de bodem (zie deel 31.2). Er zal in deze literatuurstudie eerst ingegaan worden op de fosforbuffercapaciteit van een bodem (zie deel 31.3), en daarna op de fixatie en vrijstelling van fosfor in de bodem (zie deel 31.4). Kennis van deze eigenschappen zal helpen om evoluties van fosforbeschikbaarheid in de tijd te gaan voorspellen (deel 31.5).

### 31.2 INLEIDING: GEDRAG VAN FOSFOR IN DE BODEM

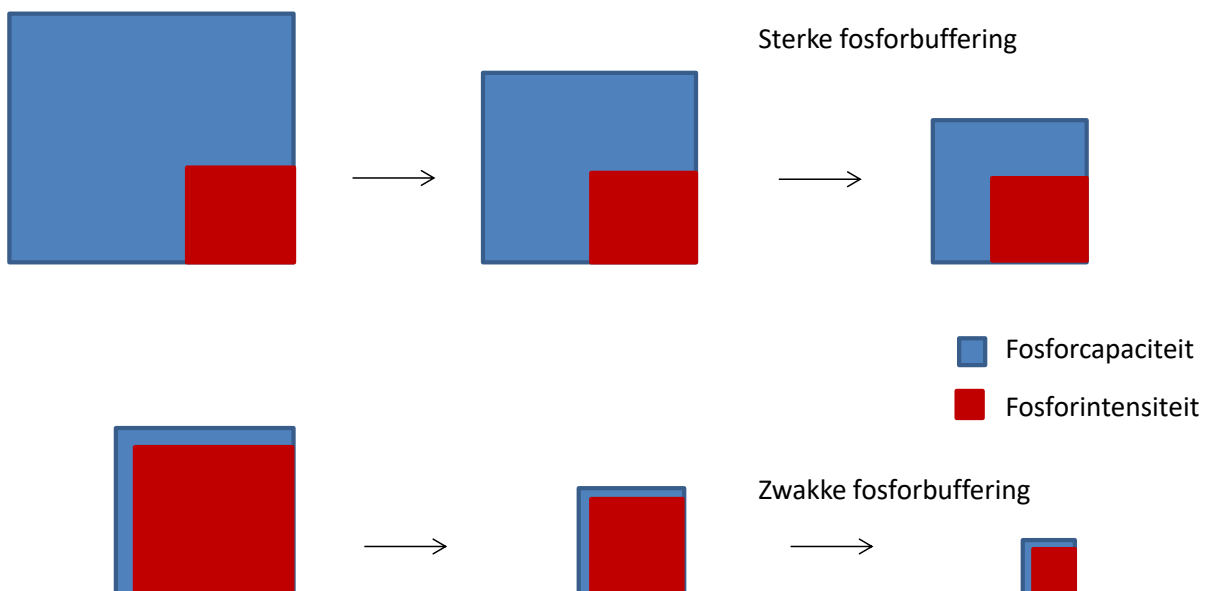
#### 31.2.1 Intensiteit en capaciteit

In de literatuurstudie van luik 1 werd ingegaan op de fosforbeschikbaarheid in de bodem. Planten nemen fosfor op via de bodemoplossing (het waterige deel van de bodem). Van de totale hoeveelheid fosfor in de bodem is er echter maar een zeer kleine fractie aanwezig in de bodemoplossing (de "**P-intensiteit**",  $I$ ), het overige deel is gebonden aan de vaste bodemfase door sorptie of precipitatie. Toch is de plantbeschikbare fractie groter dan alleen maar de hoeveelheid fosfor in de bodemoplossing omdat de fosfor aanwezig op de vaste bodemfase (deels) in oplossing kan komen. De fosforfractie die vanuit de vaste fase in oplossing kan komen, wordt ook wel de uitwisselbare P-fractie of **P-capaciteit** ( $Q$ ) genoemd. Er is ook een fosforfractie op de vaste bodemfase die moeilijker of zeer traag in oplossing kan gekomen, de zogenaamde gefixeerde fosforfractie. Toch zijn er aanwijzingen dat ook deze fractie op termijn kan vrijkomen, zodat het van de precieze definitie en/of meetmethode afhangt hoe groot de P-capaciteit is.

In luik 1 werden voorlopig zowel een P-intensiteits- als een P-capaciteitsmeting geselecteerd om blijvend op te volgen tijdens het ganse VLM-fosforproject, namelijk P-CaCl<sub>2</sub> en P-AL.

### 31.2.2 Fosforbuffercapaciteit

Bodemfosforextracties kunnen een maat zijn voor de fosforintensiteit, fosforcapaciteit of een complexe mengeling van beiden, maar niet voor de **relatie** tussen fosforintensiteit en –capaciteit (Holford and Mattingly, 1976). De verhouding tussen I en Q wordt bepaald door de **fosforbuffercapaciteit**. Deze relatie wordt vooral belangrijk voor het beschrijven van het gedrag van fosfor als er fosfor aan de bodem wordt toegevoegd (bemesten) of onttrokken (uitmijnen). Na (langdurige) netto bemesting of uitmijning wordt er doorgaans een toename respectievelijk afname in de fosforbeschikbaarheid waargenomen. Hoe groot deze verandering is, kan sterk verschillen van bodem tot bodem (Indiati and Sharpley, 1997). Bij een hoge buffercapaciteit verandert de intensiteit minder uitgesproken bij bemesten of uitmijnen dan bij een lage fosforbuffercapaciteit (Figuur 148). Het belang van en methodes voor het bepalen van de fosforbuffercapaciteit worden verder besproken (zie deel 31.3).



Figuur 148. Schematisch model voor veranderingen in fosforintensiteit (snel beschikbare fosfor, rood) en de fosforcapaciteit (voorraad, blauw) bij grotere fosforexport dan fosforinput in de bodem, voor een bodem met hoog (boven) of laag (onder) fosforbufferend vermogen (naar Murphy et al. (2013)).

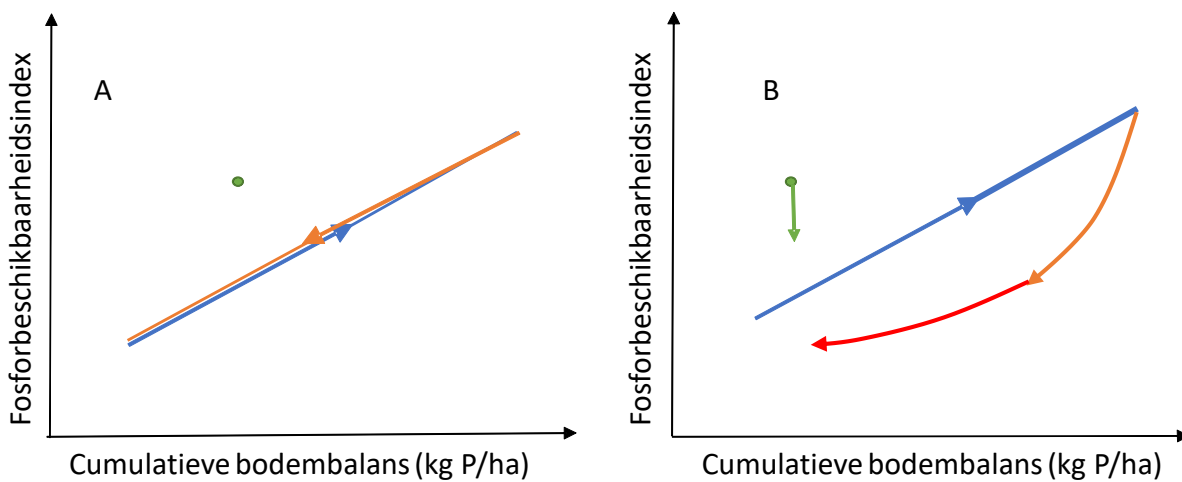
### 31.2.3 Fixatie

Naast de fosforbuffering moet er ook een tijdsaspect in rekening worden genomen voor het voorspellen van veranderingen in fosforbeschikbaarheid. Fosfor die aan bodem wordt toegevoegd, zal zich verdelen over I en Q, zoals bepaald door de fosforbuffercapaciteit van de bodem. Maar vaak wordt vastgesteld dat deze verdeling in de tijd verandert door voortschrijdende vastlegging van fosfor (Sisák *et al.*, 2002; Burkitt *et al.*, 2002a; Ehlert *et al.*, 2003b; de Ruijter *et al.*, 2009). Vaak wordt na een oorspronkelijke toename van de gemeten fosforbeschikbaarheid door bemesten, een afname in de tijd vastgesteld (Griffin *et al.*, 2003; Djodjic and Mattsson, 2013). Na een eerste relatief snelle daling van de fosforbeschikbaarheid (dagen-weken) kan een voortschrijdende vastlegging resulteren in een verdere trage daling (maanden-jaren) (De Smet *et al.*, 1998; Maguire *et al.*, 2001). Er wordt daarom soms uitgegaan van een 'twee-fractie-model' voor de vastlegging en desorptie van fosfor (Lookman *et al.*, 1995). Daarbij is er een labiele en een sterk gebonden P-pool die elk fosfor

volgens een verschillende kinetiek kunnen vrijgeven of vastleggen (Lookman *et al.*, 1995; Sattari *et al.*, 2012). In feite is dit twee-fractie-model een vereenvoudiging en is er in werkelijkheid een continuüm van snelle en trage processen (McGechan and Lewis, 2002).

Omgekeerd kan de vastgelegde fosforfractie ook terug vrijgemaakt worden bij fosforonttrekking uit de bodem. Bij onevenwicht tussen fixatie en vrijstelling is de evolutie van de fosforbeschikbaarheid in de tijd niet louter te verklaren vanuit de bodembalans (bemestingshoeveelheid min de exporthoeveelheid) (Figuur 149). Door dominantie van fixatie dan wel vrijstelling is er hysteresis mogelijk: de evolutie van de fosforbeschikbaarheid kan een verschillend parcours volgen in een opbouw- dan wel een afbouwproces van bodemfosforgehalte (bodembalans van de voorbije jaren positief of negatief).

Bovenstaande aspecten worden verder uitgewerkt in deze literatuurstudie (zie deel 31.4).



Figuur 149. Wijzigingen in fosforbeschikbaarheidsindex bij netto bemesting (opbouwend, blauw), netto uitmijning (afbouwend, oranje en rood) of evenwichtsbemesting (bemesting = gewasexport, groen). In geval A (links) is er geen significante netto fixatie of vrijstelling. In geval B (rechts) is dit wel het geval, zodat bij eenzelfde uitmijningshoeveelheid de fosforbeschikbaarheidsindex meer (netto fixatie, oranje in B) of minder (netto vrijstelling, rood in B) verandert dan in geval A. Bij netto fixatie is een daling van de fosforbeschikbaarheidsindex onder evenwichtsbemesting mogelijk (geval B, groen). Deze figuur wordt verder besproken onder 31.4.4

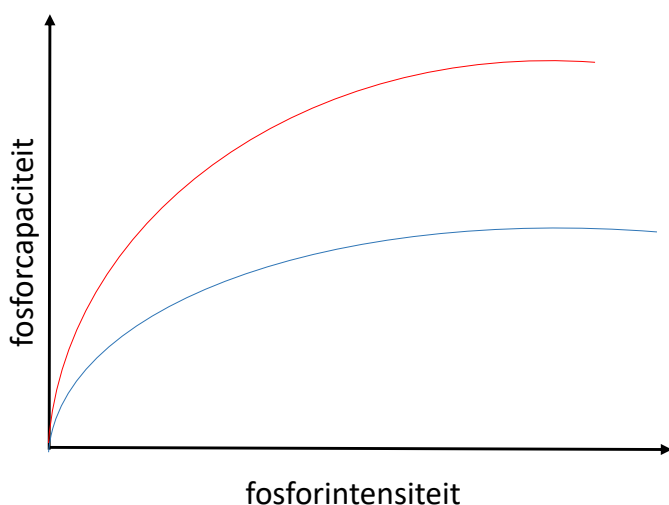
#### 31.2.4 Verschillen tussen bodems in fosforbuffercapaciteit en fixatie

Er zijn grote verschillen tussen bodems mogelijk wat betreft hun fosforbuffercapaciteit en snelheid voor fosforfixatie en -vrijgave. Dit komt vooral door verschillen in bodemsamenstelling en pH. Zo is er een belangrijke rol weggelegd voor aluminium, ijzer en calcium in de bodem. Dit wordt in delen 31.3 en 31.4 verder uitgewerkt. In deel 31.5 wordt dan de toepassing besproken: hoe verschillen in fosforbuffercapaciteit en fixatie tussen bodems ook resulteren in verschillen in evoluties van de fosforbeschikbaarheid.

## 31.3 FOSFORBUFFERCAPACITEIT

### 31.3.1 Concept fosforbuffercapaciteit

Er is geen eenduidig antwoord op de vraag hoeveel hoger of lager de bemestingsdosis dan de fosforgewasexport moet zijn om de fosforbeschikbaarheid te verhogen of te verlagen tot de gewenste streefwaarde. De benodigde fosforbemestingsdosis om de fosforbeschikbaarheidsindex met een bepaalde waarde te verhogen of te verlagen, wordt bepaald door de **fosforbuffercapaciteit** van de bodem. Bij een hoge buffercapaciteit verandert de intensiteit minder uitgesproken bij bemesten of uitmijnen dan bij een lage fosforbuffercapaciteit (Figuur 148). Met behulp van sorptie- en desorptie-experimenten kunnen fosforbuffercurves worden opgesteld (Figuur 150, zie ook 31.3.3). De verhouding tussen de verandering in fosforintensiteit en de verandering in fosforcapaciteit geeft informatie over de fosforbuffercapaciteit (richtingscoëfficiënt van de curves in Figuur 150). Deze fosforbuffercapaciteit kan verschillen tussen bodems door de bodemeigenschappen (zie 31.3.4). Ook voor één bodem kan de fosforbuffercapaciteit veranderen. Deze zal namelijk lager worden bij hogere fosforverzadiging van de bodem. Dit is te zien in Figuur 150: hoe hoger de fosforintensiteit en –capaciteit, hoe lager de richtingscoëfficiënt van de fosforbuffercurve. Dit is te verklaren doordat bij lage fosforconcentraties eerste de hoge affiniteitsplaatsen in de bodem worden bezet. Bij toenemende fosforconcentraties worden plaatsen ingenomen met steeds lagere affiniteit voor fosfor.



Figuur 150. Fosforbuffercurves: verandering van de fosforcapaciteit bij wijzigende fosforintensiteit voor een bodem met grote (rode lijn) en kleine (blauwe lijn) fosforbuffercapaciteit.

### 31.3.2 Belang van de fosforbuffercapaciteit

Om de heraanvulling van fosfor naar de bodemoplossing bij depletie door het gewas te kunnen voorspellen, is niet alleen informatie over de concentratie in oplossing (I) en over de hoeveelheid P op de vaste fase (Q) nodig, maar ook over de fosforbuffercapaciteit (Holford, 1997). Ook voor het voorspellen van de toename in I en Q bij bemesten, is informatie over de fosforbuffercapaciteit onontbeerlijk. Hoe hoger de fosforbuffercapaciteit, hoe

kleiner de toename in fosforbeschikbaarheid gemeten met intensiteitsmethodes (Ehlert *et al.*, 2003a) en capaciteitsmethodes (Indiati and Sharpley, 1997) indien fosfor aan de bodem wordt toegediend. Het is met andere woorden nodig om een idee te hebben van de fosforbuffercapaciteit van de bodem indien we een evolutie van de fosforbeschikbaarheidsindex naar de streefzone willen bekomen. Deze kan een idee geven van de (netto) hoeveelheid fosfor die aan de bodem moet toegevoegd of onttrokken worden om een bepaalde gewenste verandering in fosforbeschikbaarheid te bewerkstelligen. Daarnaast kan de fosforbuffercapaciteit informatie geven over de vrijgave van fosfor door de bodem bij plantopname, wat belangrijk is bij netto uitmijning van bodems.

Er is echter nog meer gedrag van P dat via de buffercapaciteit kan verklaard of beschreven worden. De buffercapaciteit is ook een parameter die de kritieke fosforbeschikbaarheid voor opbrengstdaling bepaalt: hoe hoger de buffercapaciteit, hoe lager de kritische fosforbeschikbaarheid voor gewasopbrengst (Holford, 1997; Ehlert *et al.*, 2003a; Pypers *et al.*, 2006). Het in rekening brengen van de fosforbuffercapaciteit kan daardoor de correlatie tussen relatieve gewasopbrengst en de bodemfosfortest gevoelig verbeteren (Morel *et al.*, 2000). Ook: hoe hoger de buffercapaciteit, hoe lager dan fosforopname door het gewas (Holford, 1997). De fosforbuffercapaciteit kan bijdragen aan de verfijning van de fosforbehoefte van het gewas en daarbij het risico op fosforverliezen beperken (Ehlert *et al.*, 2003a).

### 31.3.3 Bepalen van de fosforbuffercapaciteit

#### 31.3.3.1 Algemeen

De fosforbuffercapaciteit kan bepaald worden als de helling van de buffercurve, waarbij de gesorbeerde fosforhoeveelheid (Q) wordt uitgezet ten opzichte van de fosforconcentratie in oplossing (I) (Figuur 150). Daarvoor zijn verschillende punten op de curve nodig, waardoor Q en I voor dezelfde bodem moeten bepaald worden bij verschillende fosforhoeveelheid. Dit kan op verschillende manieren gebeuren.

#### 31.3.3.2 Creëren van verschillende (Q,I)-punten

Veelal wordt gebruik gemaakt van een bepaald bodemstaal waaraan verschillende fosforhoeveelheden worden toegevoegd (Holford, 1997). Meestal gebeurt dit door het bodemstaal in fosforoplossingen met verschillende initiële fosforconcentraties te schudden. Hierbij wordt de curve dus opgesteld via sorptie (niet desorptie) en is er relatief weinig tijd voor de sorptiereactie ten opzichte van de praktijksituatie. De curves die op deze manier kunnen worden opgesteld, worden ook wel sorptie-isothermen genoemd.

In plaats van fosfor toe te voegen, is het ook mogelijk om fosfor te verwijderen (desorptie). Dit kan bijvoorbeeld door het toevoegen van een fosforadsorbens aan de bodemsuspensie (Lookman *et al.*, 1995).

Over het algemeen gebeuren de bepalingen in bodemsuspensies. Het is echter ook mogelijk om fosfor toe te dienen aan bodemstalen met een praktijkrelevant bodemvochtgehalte. Omgekeerd kan ook fosfor in verschillende hoeveelheden verwijderd worden uit de bodem met behulp van gewasextractie (Koopmans *et al.*, 2004). Bij het werken met bodems in plaats van bodemsuspensies is het wel minder eenvoudig om I en Q te bepalen (zie 31.3.3.2). Nog dichterbij de praktijk staat het bepalen van de fosforbuffercurves met behulp van bodemstalen uit een lange termijn veldexperiment met verschillende fosforbestedingshoeveelheden (Ehlert *et al.*, 2003a). Naargelang de beschouwde fosforbestedingsdosis en de fosforgewasexporten kan de buffercurve opgesteld worden in een desorptie- en/of sorptiescenario.

### 31.3.3.3 Bepalen van I en Q

Hoe de buffercurve ook wordt opgesteld (van suspensies tot veldproeven), er moet ook een keuze gemaakt worden in hoe I en Q precies bepaald worden. Veelal wordt I bepaald als de fosforconcentratie in oplossing. Bij het gebruik van bodemsuspensies met verschillende initiële fosforconcentraties (zie hoger), is dit eenvoudig te meten. Werkt men met vaste bodemstalen, zal een bodemfosfortest die een maat is voor de fosforintensiteit moeten gebruikt worden. Mogelijkheden zijn een water- of CaCl<sub>2</sub>-extractie (Ehlert *et al.*, 2003a).

Indien gewerkt wordt met bodemsuspensies met verschillende initiële fosforconcentraties, wordt Q over het algemeen bepaald via de massabalans, namelijk uit het verschil in fosforconcentratie in oplossing voor en na schudden (Holford, 1997). De fosforhoeveelheid die uit de oplossing 'verdwenen' is tijdens het schudden, is vastgezet op de vaste fase. Dit is dus de hoeveelheid die **extra** gesorbeerd is bovenop de fosfor die reeds in de bodem aanwezig was. Om een y-as te kunnen opstellen met de totale gesorbeerde fosforhoeveelheid, dient de reeds aanwezige gesorbeerde fosfor te worden meegemeten, maar daarbij is het de vraag met welke fosfortest deze best wordt bepaald (zie luik 1). Er kan bijvoorbeeld gekozen worden voor de fosforhoeveelheid geëxtraheerd met FeO-papier (Ehlert *et al.*, 2003a).

Het is ook mogelijk om Q niet via de massabalans te bepalen, maar met een bodemfosfortest. Dit kan een chemische extractie zijn (Indiati and Sharpley, 1997), maar vaak wordt gebruik gemaakt isotopische technieken om de gesorbeerde fosforhoeveelheid in evenwicht met de oplossing te bepalen, dit is de E-waarde (Ehlert *et al.*, 2003a; Pypers *et al.*, 2006).

De manier waarop I en Q bepaald worden zal zijn weerslag hebben op de berekening van de fosforbuffercapaciteit, en hoe deze kan geïnterpreteerd worden.

### 31.3.3.4 Modellering

Er zijn verschillende manieren om sorptie-isothermen te beschrijven (Holford, 1997). Eén van deze is de Freundlich-vergelijking:

$$S = k \cdot c^n$$

met S de gesorbeerde P-hoeveelheid (mg kg<sup>-1</sup>), c de P-concentratie in oplossing (mg l<sup>-1</sup>) en k en n Freundlich-parameters. Met de Freundlich-vergelijking is het niet mogelijk om de maximale sorptiecapaciteit te bepalen. Dit is wel mogelijk met de Langmuir-vergelijking:

$$S = k \cdot T \cdot c / (1 + k \cdot c)$$

met k de affiniteitsindex en T de maximale sorptiecapaciteit. De buffercapaciteit is de afgeleide van deze functie (dS/dc). Bij c=0 is dit het product van k en T. Hieruit volgt dat de buffercapaciteit toeneemt bij hogere affiniteit en bij grotere maximale sorptiecapaciteit van een bodem.

### 31.3.3.5 Factoren om rekening mee te houden bij bepaling van de fosforbuffercapaciteit

Bepalingen van de fosforbuffercapaciteit hangen af van de gebruikte methode (sorptie versus desorptie, labo-omstandigheden versus praktijkrelevante omstandigheden,...) en van de meetmethodes voor I en Q (zie hoger).

De fosforbuffercapaciteit kan zowel onder sorptie- als onder desorptieomstandigheden bepaald worden. Sorptie-omstandigheden zijn relevanter voor de toename in fosforhoeveelheden na bemesting, terwijl desorptie-omstandigheden informatie kunnen geven over de nalevering van fosfor door de bodem na

fosforopname door het gewas. Mogelijk is de buffercapaciteit bepaald onder sorptie- of desorptieomstandigheden verschillend (Holford, 1997). Dit kan bijvoorbeeld doordat hysteresis optreedt. Echter, het is mogelijk dat deze hysteresis vooral een fenomeen is dat gecreëerd wordt door laboratoriumomstandigheden waardoor het wel relevant is om de buffercapaciteit onder sorptie-omstandigheden te meten indien men geïnteresseerd is in naleveringsmogelijkheden van de bodem (Holford, 1997). Het is ook mogelijk dat hysteresis vooral een fenomeen is dat waargenomen wordt bij niet-bemeste bodems (Barrow and Debnath, 2014). Meer details over hysteresis en de kinetiek van vastlegging en vrijgave van fosfor zijn te vinden in deel 31.4.

De meeste bepalingen van de buffercurve worden in een relatief korte tijdspanne uitgevoerd. Vaak wordt het bodemstaal gedurende 24 uur geschud, waarna Q en I worden bepaald. Het is dan de vraag of de buffercapaciteit, bepaald via deze methode, relevant is voor de verandering in fosforbeschikbaarheid in het veld over langere tijd. Hoewel Indiaty & Sharpley (1997) verdere sorptie van toegediende fosfor waarnamen in de tijd, bleek de bufferindex bepaald na 1 dag toch zeer goed gecorreleerd met deze bepaald na 90 dagen. Zelfs een beperkte schudtijd van 2 uur zou een accuraat beeld geven van de buffering van een bodem op langere termijn (Indiaty et al., 1999). Morel et al. (1996) stelden vast dat het bepalen van de buffercapaciteit minder afhankelijk was van de sorptietijd (0,4 – 10 dagen) indien Q bepaald werd als de E-waarde (de uitwisselbare fosforhoeveelheid zoals bepaald met isotopische technieken) dan met behulp van de massabalans (zie 31.3.3.3). Zij raden bijgevolg het meten van de E-waarde aan om tijdsafhankelijke berekening van fosforbuffercapaciteit te vermijden.

#### 31.3.3.6 Alternatief: éénpunts-bufferindex

Voor het opstellen van een buffercurve zijn meerdere punten nodig, wat niet werkbaar is in de praktijk voor routine-analyses. Daarom wordt de buffercapaciteit ook ingeschat op basis van één punt en dit wordt de éénpunts-bufferindex genoemd, vaak gedefinieerd als de verhouding van de gesorbeerde fosforhoeveelheid bij één bepaalde toegediende dosis over de logaritme van de fosforconcentratie in oplossing na sorptie (Holford, 1997; Börling *et al.*, 2001). Soms wordt hieraan nog de initiële fosforbeschikbaarheid toegevoegd (Burkitt *et al.*, 2002b). Er bestaan verschillende éénpunts-bufferindices, die verschillen in de initiële fosforconcentratie waarin het bodemstaal geschud wordt (Indiaty and Sharpley, 1997; Holford, 1997; Börling *et al.*, 2001).

Voor 10 Zweedse bodems waren de eenpunts-bufferindices sterk gerelateerd aan de sorptie-curves van de bodems (Börling *et al.*, 2001). Voor 90 Australische bodems was er een sterke correlatie tussen de fosforbuffercapaciteit, 'traditioneel' bepaald met sorptie-isothermen tussen 0,25 en 0,35 mg P/l in oplossing, en 11 verschillende éénpunts-bufferindices (Burkitt *et al.*, 2002b). De correlaties waren beter bij grote toegevoegde fosforhoeveelheden (zoals 1000 mg P kg<sup>-1</sup>) voor de bepaling van de éénpunts-bufferindices, en indien de initiële fosforbeschikbaarheid, gemeten met Olsen- of Colwell-extractie, bij de gesorbeerde fosforhoeveelheid werd opgeteld. Echter, als de initiële fosforbeschikbaarheid wordt opgeteld bij de gesorbeerde fosforhoeveelheid om de bufferindex te berekenen, wordt vaak een toename van de bufferindex bij toenemende fosforbemesting bekomen (Bolland and Allen, 2003). Dit is tegenstrijdig met de waarneming dat de fosforbuffercapaciteit daalt bij toenemende fosforhoeveelheid in een bodem (Figuur 150).

Recent werd een methode ontwikkeld om de fosforbufferindex te voorspellen met behulp van mid-infraroodspectroscopie (Forrester *et al.*, 2015).

### 31.3.3.7 Ruwe inschatting van de buffercapaciteit met behulp van intensiteits- en capaciteitstest

Er is nog een ander alternatief voor de tijdrovende bepaling van de buffercapaciteit met behulp van de buffercurve met meerdere punten. De sorptie-isotherm (buffercurve) en de bijhorende buffercapaciteit kan geschat worden op basis van een intensiteits- en een capaciteitsmeting (van Rotterdam-Los, 2010). Bij lage buffercapaciteit, namelijk bij hoge fosfaatverzadigingsgraad, is daarnaast ook een inschatting van het reactief oppervlak nodig. Dit is bijvoorbeeld mogelijk met metingen van het oxalaat extraheerbaar ijzer- en aluminiumgehalte (zie verder). Dit werd nagegaan voor 17 verschillende Nederlandse bodems. Als intensiteitsmeting wordt P-CaCl<sub>2</sub> voorgesteld, als capaciteitsmeting P-AL, P-Olsen of P<sub>ox</sub>. Er werd vastgesteld dat beneden bepaalde waarden voor de buffercapaciteit, geschat als de verhouding van de capaciteitsmeting over de intensiteitsmeting, de intensiteit snel daalt bij fosforopname door gewasgroei. Dit is een belangrijk gegeven gezien een bepaald niveau van fosforintensiteit nodig is om te voldoen aan de gewasvraag (~100 μmol kg<sup>-1</sup>). Echter, in daaropvolgende studies om combinaties van intensiteits- en capaciteitsmetingen te integreren in bemestingsadviezen, wordt niet meer gebruik gemaakt van het concept van buffercapaciteit, maar worden de intensiteits- en capaciteitsmeting enkel meegenomen in statistische analyse van het effect op opbrengst (Bussink *et al.*, 2011a; Bussink *et al.*, 2011b).

### 31.3.4 Bepalende factoren voor fosforbuffercapaciteit

Voor 75 Australische bodems was de fosforbuffercapaciteit, bepaald bij een fosforconcentratie in oplossing tussen 0,25 en 0,35 mg P/l, sterk verschillend binnen één bodemklasse en textuurklasse en was de gemiddelde fosforbuffercapaciteit van een bodem- of textuurklasse niet verschillend van andere bodem- en textuurklassen (Burkitt *et al.*, 2002b). Indien dit ook in Vlaanderen het geval zou zijn, betekent dit dat er geen algemene fosforbuffercapaciteit per bodemtextuur kan vastgesteld worden.

Voor 90 verschillende Australische bodems was de fosforbuffercapaciteit, bepaald bij een fosforconcentratie in oplossing tussen 0,25 en 0,35 mg P/l, slechts beperkt gerelateerd aan het kleigehalte ( $r^2=0,27$ ), en beter aan het oxalaat extraheerbaar ijzer- ( $r^2=0,42$ ) en aluminiumgehalte ( $r^2=0,72$ ) (Burkitt *et al.*, 2002b). Ook voor 25 andere Australische bodems was de fosforbuffercapaciteit vooral aan het oxalaat extraheerbaar aluminiumgehalte sterk gerelateerd, en in mindere mate aan het oxalaat extraheerbaar ijzergehalte, organisch koolstofgehalte, uitwisselbare zuurheid en de effectieve kationuitwisselingscapaciteit (Burkitt *et al.*, 2006). Een model, op basis van deze data ontwikkeld, slaagde er echter niet in om de fosforbuffercapaciteit van 28 andere bodems te voorspellen, wat het belang van modelvalidatie benadrukt.

Voor 103 Australische bodems was de fosforbuffercapaciteit zoals bekomen met sorptiecurves veel beter gecorreleerd met een eenpunts-bufferindex dan met het oxalaat extraheerbaar ijzer- en aluminiumgehalte (Allen *et al.*, 2001). Voor een inschatting van de fosforbuffercapaciteit van een bodem is het dus beter om de eenpunts-bufferindex dan het oxalaat extraheerbaar ijzer- en aluminiumgehalte te bepalen. Voor Nieuw-Zeelandse bodems was de fosforbuffercapaciteit niet duidelijk gelinkt aan de anionuitwisselingscapaciteit (Edmeades *et al.*, 2006)

Op basis van 601 Australische bodemstalen werd een methode ontwikkeld om de fosforbufferindex te voorspellen met behulp van mid-infrarood-spectroscopie (Forrester *et al.*, 2015). Hierbij was de hoeveelheid van vooral kaoliniet en gibbsiet voor hoge bufferindex en smectieten en illieten voor lage bufferindex bepalend voor de bufferindex. Het gehalte aan carbonaat en bodemorganische stof bepaalde de bufferindex minder sterk.



Hoe hoger het fosforgehalte (zowel gemeten met intensiteit- als capaciteitstesten), hoe lager de fosforbuffercapaciteit (Indiati and Sharpley, 1997; Ehlert *et al.*, 2003a; Edmeades *et al.*, 2006).

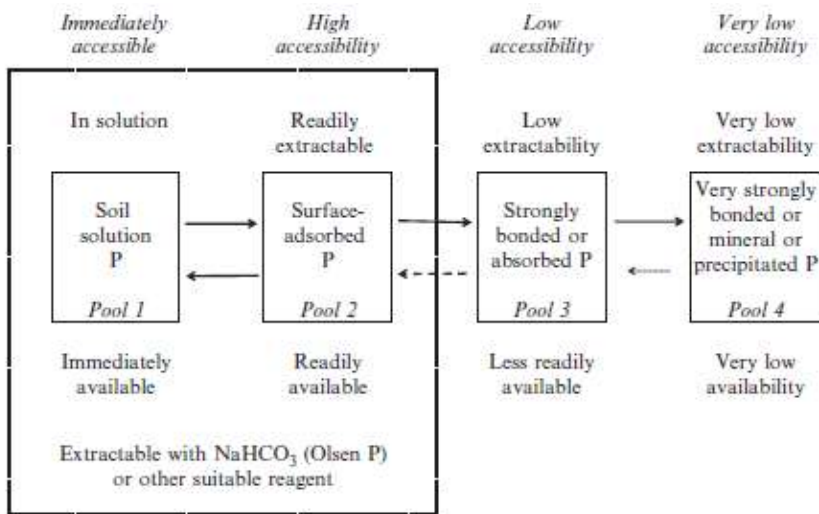
Hoe hoger het bodemorganisch stofgehalte in Ierse graslandbodems, hoe minder sorptiemogelijkheden voor fosfor werden waargenomen (Daly *et al.*, 2001). Ook voor andere Ierse bodems werd een licht negatieve correlatie tussen de buffercapaciteit en het organisch stofgehalte waargenomen, alsook een sterke positieve correlatie met de maximale bindingscapaciteit voor fosfor (T) en het oxalaat extraheerbaar aluminiumgehalte (Herlihy and McGrath, 2007). Correlaties met het oxalaat extraheerbaar ijzergehalte en vooral met pH waren minder duidelijk.

In de Noorderkempen is **oxalaat extraheerbaar aluminium** de belangrijkste P-bindende component (Lookman, 1995). Een regionale inventarisatie van fosfaatverzadigde zandige bodems wees op een grote variatie in het gehalte oxalaat extraheerbaar aluminium in Vlaanderen (1,9-135 mmol kg<sup>-1</sup>) (Baert *et al.*, 1997). Dit aluminiumgehalte is gerelateerd met de textuur: grof zandige bodems vertonen een zeer lage P-bindingscapaciteit terwijl eerder zand-lemige bodems hogere P-bindingscapaciteit vertonen. Ook voor bodems in Noord-Ierland, Ierland en de VS zijn oxalaat extraheerbaar aluminium en ijzer het best gerelateerd aan de fosforbindingscapaciteit (Maguire *et al.*, 2001). Voor bodems in Zweden was dit vooral het aluminiumgehalte (Aurell, 2000). Let wel: een hogere bindingscapaciteit wijst niet meteen op een hogere buffercapaciteit (belang van verzadiging van de bindingsplaatsen, zie 31.3.1).

## 31.4 FIXATIE- EN VRIJSTELLINGSSNELHEID

### 31.4.1 Concept fixatie

Vaak wordt kort na bemesten een toename in de gemeten fosforbeschikbaarheid waargenomen, waarna deze weer afneemt (Djordjic and Mattsson, 2013). Na de snelle daling in de eerste weken kan de vastlegging van fosfor nog jarenlang aan een minder snel tempo doorgaan (De Smet *et al.*, 1998; Maguire *et al.*, 2001). Dit wordt ook wel 'fixatie' genoemd. Er wordt soms uitgegaan van een 'twee-fractie-model' voor de vastlegging en desorptie van fosfor (Lookman *et al.*, 1995). Daarbij is er een labiele en een sterk gebonden P-pool die elk fosfor volgens een verschillende kinetiek kunnen vrijgeven of vastleggen (Lookman *et al.*, 1995; Sattari *et al.*, 2012). Soms wordt ook een model met vier fracties voorgesteld (Johnston *et al.*, 2014) (Figuur 151). Indien de transfersnelheid naar de gefixeerde fractie(s) niet even groot is als de snelheid van vrijgave (omgekeerde richting) kunnen evoluties in fosforbeschikbaarheid in de tijd waargenomen worden die niet volledig door de bodembalans kunnen verklaard worden (zie verder).



Figuur 151. Conceptueel model voor vormen van P in bodems, gecatalogeerd volgens toegankelijkheid (accessibility), extraheerbaarheid en plant beschikbaarheid (Johnston et al., 2014)

Zoals eerder besproken kan de vastlegging van fosfor door een bodem beschreven worden met sorptie-isothermen (zie 31.3.3.4). De punten van deze isothermen worden vastgesteld op een vast tijdstip na toedienen of onttrekking van fosfor. Er wordt met andere woorden geen rekening gehouden met de tijdsafhankelijkheid van de fosforvastlegging. Er bestaan echter wel tijdsafhankelijke of kinetische vergelijkingen van sorptie-isothermen, bijvoorbeeld de kinetische Freundlich- en Langmuir-vergelijking (aanpassingen van de vergelijkingen in 31.3.3.4, met inbegrip van de tijd) (McGechan and Lewis, 2002).

### 31.4.2 Bepalen van de fixatie- en vrijstellingsnelheid

Of een bodem fosfor fixeert dan wel vrijstelt, hangt vooral af van de bemestingsgeschiedenis. Is er recent nog fosfor toegediend, zal fixatie wellicht domineren. Dit kan echter beperkt of zelfs afwezig zijn bij goed bemeste bodems (Barrow and Debnath, 2014). Mogelijk zijn in deze bodems de bindingsplaatsen voor sterk gesorbeerde fosfor reeds gesatureerd. Anderzijds kan vrijstelling domineren indien de bodembalans reeds lange tijd negatief is. Om de fixatie- dan wel de vrijstellingsnelheid te meten, moeten de passende omstandigheden bijgevolg gecreëerd worden.

#### 31.4.2.1 Fixatiesnelheid

Na een eerste relatief snelle daling van de fosforbeschikbaarheid kan een voortschrijdende vastlegging resulteren in een verdere trage daling (De Smet *et al.*, 1998; Maguire *et al.*, 2001). Dit kan gemeten worden door na bemesten op verschillende tijdstippen de fosforbeschikbaarheid te meten. Om andere effecten uit te sluiten, wordt best zonder extra bemesting of gewasonttrekking gewerkt.

In de literatuur worden meerdere experimenten waargenomen waarin de fosforbeschikbaarheid gemeten door bodemfosfortesten na bemesten daalt in de tijd. Dougherty *et al.* (2011) bepaalden een 'halfwaardetijd' voor de bemesting uit de exponentiële daling van de fosforbeschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) in de tijd vanaf het tijdstip van bemesting tot 56 dagen later. In een Nederlands veldexperiment nam de fosforbeschikbaarheid (P-AL en P<sub>w</sub>) na bemesten af in de tijd (4,5 maand), maar niet tot het niveau van het onbemeste perceel waar de

fosforbeschikbaarheid op constant niveau bleef (de Ruijter *et al.*, 2009). Er werden gedurende één maand sterke afnames van P-Olsen waargenomen na toedienen van verschillende mesttypes aan bodem (Lee *et al.*, 2012). In Australische bodems werden afnames van P-Olsen en P-Colwell gedurende 2,5 jaar na bemesten waargenomen (Burkitt *et al.*, 2002a). Daardoor bleef de fosforbeschikbaarheid op een hoger niveau bij herhaaldelijk bijbemesten in de tijd, in vergelijking met het toepassen van de volledige bemestingsdosis in het begin. Mogelijk is fixatie minder uitgesproken bij organische bemesting dan bij kunstmest (Laboski and Lamb, 2003). Karpinets *et al.* (2004) ontwikkelden een model om evoluties in fosforbeschikbaarheid (verschillende testen) in de tijd te voorspellen, op basis van data van verschillende langetermijn veldexperimenten die evoluties in fosforbeschikbaarheid bij verschillende bodembalansen waarnamen.

De mate waarin fixatie zal waargenomen worden in een bodem, hangt af van de meetmethode voor fosforbeschikbaarheid (zie luik 1) (Johnston *et al.*, 2014). Relatief milde extracties zullen de gefixeerde fractie niet meemeten. Als deze gefixeerde fractie toeneemt in de tijd, zal er dus een relatief grote afname van de fosforbeschikbaarheid en relatief grote fixatie vastgesteld worden. Bij relatief harde extracties kan een deel van de gefixeerde fractie wel meegemeten worden, waardoor de fosforbeschikbaarheid minder of niet lijkt te dalen in de tijd door fixatie. Een fosforbeschikbaarheidsmeting is niet per se een goede afspiegeling van de reële fosforbeschikbaarheid voor de plant (zie luik 1). Om te onderzoeken of fixatie optreedt voor de werkelijke plantbeschikbare fosforfractie, moet het effect op de opbrengst of fosforopname in plaats van een bodemfosfortest nagegaan worden. Zo werd geen verschil in opbrengstverhoging geobserveerd tussen een half jaar versus kort voor zaaien bemesten voor gras in Engeland (Paynter and Dampney, 1991) en voor maïs en soya in de VS (Mallarino *et al.*, 2009). Zeventien jaar bemesten gaf op een Canadees perceel hogere maïsofbrengsten dan bij niet bemesten, maar het maakte geen verschil uit of de zelfde totale bemestingsdosis via jaarlijkse of tweejaarlijkse toepassingen werd toegediend, hoewel bij de laatste er in principe meer tijd mogelijk is voor fixatie (Messiga *et al.*, 2010). Ook de zaadopbrengst van vlas werd gelijk verhoogd wanneer de bemesting in het jaar voordien of het jaar zelf toegepast werd (Grant *et al.*, 2009). Voor soja in de VS waren er wel soms opbrengstverhogingen indien de bemestingsdosis in het jaar zelf in plaats van het jaar ervoor werd toegepast (Buah *et al.*, 2000). Voor wortelen in zandbodems werd ook een hogere opbrengst bekomen indien dezelfde bemestingsdosis verspreid tijdens het groeiseizoen wordt gegeven in plaats van vooraf in één keer (McPharlin and Lanzke, 2001). Mogelijk gaat het hier nog om de snelle initiële vastlegging van fosfor door de bodem, en niet om de tragere fixatiereacties.

#### **31.4.2.2 Vrijstellingssnelheid**

Om vrijstelling uit de gefixeerde fosforfracties te induceren, moet fosfor aan de bodem onttrokken worden. Door deze fosforonttrekking zal de fosforbeschikbaarheid dalen. Indien vrijstelling optreedt, zal de fosforbeschikbaarheid minder snel dalen dan op basis van de fosforonttrekking berekend kan worden. Ook hier zal het van de meetmethode voor de fosforbeschikbaarheid afhangen hoe groot de mogelijke vrijstelling kan zijn.

In veldexperimenten kan fosforonttrekking door het gewas uitgevoerd worden. In het labo kan deze vrijstellingssnelheid echter ook geobserveerd worden door fosfor met een chemisch sorbens (bijvoorbeeld ijzeroxiden) uit de bodem te onttrekken (Lookman *et al.*, 1995; De Smet *et al.*, 1998).

### 31.4.3 Bepalende factoren voor de fixatie- en/of vrijstellingskinetiek

Voor 35 kalkarme West-Vlaamse bodems was de snelheid van de initiële snelle desorptie van P vooral gelinkt aan de pH van de bodem: bij hogere pH werd een grotere desorptiesnelheid vastgesteld (De Smet *et al.*, 1998). De kinetiek van de tragere desorptie (diffusie-oplossing) was vooral gerelateerd aan het oxalaat extraheerbaar fosforgehalte.

In negen Australische bodems werd vastgesteld dat voor negen veldexperimenten de toename in fosforbeschikbaarheid (P-Olsen en P-Colwell) door bemesten daalde in de periode van 6 tot 30 maanden na bemesten (Burkitt *et al.*, 2002a). Deze daling in de tijd was groter bij bodems met een hogere buffercapaciteit en kon voor deze negen bodems voorspeld worden met fosforbuffercapaciteit gecombineerd met ofwel het organische koolstofgehalte of de uitwisselbare zuurheid van de bodem. Ook in labo-studies met zes Australische bodems werd vastgesteld dat de daling in fosforbeschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) in de tijd na bemesting veel sneller was voor bodems met een hogere fosforbuffercapaciteit (Dougherty *et al.*, 2011).

In enkele Zweedse bodems werd vastgesteld dat de verandering in P-AL en P-CaCl<sub>2</sub> na bemesten het kleinst zijn voor bodems met veel ijzer en aluminium (Djordjic and Mattsson, 2013). Bemeste bodems vertonen minder fixatie door mogelijke verzadiging van de sterke affiniteitssites (Barrow and Debnath, 2014).

### 31.4.4 Belang van fixatie en vrijstelling voor de evolutie van de fosforbeschikbaarheid

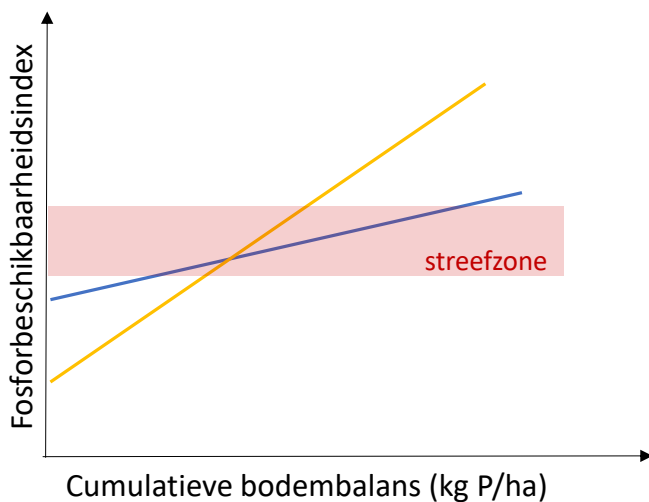
Indien er geen significante netto fixatie of vrijstelling optreedt, wordt de evolutie van de fosforbeschikbaarheid in de bodem volledig bepaald door de fosforbodembalans, i.e. de toegediende min de onttrokken fosfordosis. In dat geval moet de daling in fosforbeschikbaarheid bij een bepaalde negatieve bodembalans even groot zijn als de toename in fosforbeschikbaarheid bij een zelfde positieve bodembalans, en moet de fosforbeschikbaarheid bij evenwichtsbemesting gelijk blijven in de tijd (Figuur 149A). Dit werd bijvoorbeeld vastgesteld voor P<sub>w</sub>, P-Olsen en P-Mehlich in een Franse bodem (Messiga *et al.*, 2010). Als de fixatiesnelheid wel significant is, kan een daling van de fosforbeschikbaarheid bij evenwichtsbemesting (groene pijl in Figuur 149B) of een grotere afname van de fosforbeschikbaarheid bij negatieve bodembalans dan toename bij positieve bodembalans waargenomen worden (oranje pijl in Figuur 149B). Dit laatste was het geval bij een langetermijn veldproef in Engeland: een positieve bodembalans van 1217 kg P ha<sup>-1</sup> over 45 jaar resulteerde in een toename van P-Olsen met 167 kg P ha<sup>-1</sup>, terwijl een daaropvolgende negatieve bodembalans van 509 kg P ha<sup>-1</sup> gedurende 73 jaar resulteerde in een daling van P-Olsen met 182 kg P ha<sup>-1</sup> (Johnston *et al.*, 2014). Veldexperimenten in het Engelse Saxmundham toonden aan dat bij evenwichtsbemesting de eerste jaren een daling van P-Olsen kan waargenomen worden, zeker indien er kort voor nog grote fosforhoeveelheden werden toegepast. Er worden zelfs dalingen van P-Olsen bij positieve bodembalans waargenomen indien ervoor veel bemest werd. Na enkele jaren neemt de netto fixatiesnelheid echter af en blijft P-Olsen bij evenwichtsbemesting min of meer constant (Johnston *et al.*, 2014). Op verschillende Nederlandse veldproeven met evenwichtsbemesting werd soms geen en soms wel een daling van de fosforbeschikbaarheid (P<sub>w</sub> en P-AL) waargenomen (Aarts *et al.*, 2008; Ehlert *et al.*, 2008; Verloop *et al.*, 2010; van Middelkoop *et al.*, 2014). Op twee langetermijn veldexperimenten in Wallonië was op de ene zelfs een positieve bodembalans niet genoeg om P-AL constant te houden (Vandendriessche *et al.*, 1994), op de andere volstond evenwichtsbemesting wel voor een constant niveau van P-AL (Legrand *et al.*, 2012). Indien bij de eerste proef eenzelfde fixatie voor alle bodembalansen in rekening wordt gebracht, is de verandering van P-AL wel proportioneel aan de opgelegde bodembalans.

Het optreden van fixatie is ook vast te stellen als er een lagere fosforbeschikbaarheid wordt waargenomen bij het toedienen van een bemestingsdosis in één keer (initieel) in vergelijking met het spreiden van de bemesting in de tijd. In het eerste geval is er meer tijd voor fixatie beschikbaar. Dit werd bijvoorbeeld waargenomen in Australië voor P-Olsen en P-Colwell (Burkitt *et al.*, 2002a). Minder hoge opbrengst door het in één keer toepassen van bemesting in vergelijking met herhaaldelijk toepassen, wordt echter zelden waargenomen (Buah *et al.*, 2000; Grant *et al.*, 2009; Messiga *et al.*, 2010). Omgekeerd kan ook de vrijstellingssnelheid de overhand nemen: er kan een kleinere afname van de fosforbeschikbaarheid bij negatieve bodembalans dan toename bij positieve bodembalans waargenomen worden (rode pijl in Figuur 149B). Dit kan bijvoorbeeld in het geval dat er geen verder fixatie optreedt doordat bemesting reeds lange tijd achterwege gelaten is, maar er wel onttrekking van fosfor optreedt door gewasgroei. Dit werd vastgesteld in de eerder vermelde Engelse langetermijnproeven in Rothamsted: terwijl tijdens de eerste fase van uitmijning een grotere daling van P-Olsen werd waargenomen dan vooraf een toename bij bemesting, werd bij nog eens 27 jaar verdere negatieve bodembalans ( $-231 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) slechts een daling van P-Olsen van  $12 \text{ kg P ha}^{-1}$  vastgesteld (Johnston *et al.*, 2014). Uit dit en andere experimenten is ook duidelijk dat eerder toegediende fosfor die gefixeerd werd en niet in de plantbeschikbare fractie teruggevonden wordt (zoals gemeten met een bepaalde fosfortest), wel terug beschikbaar kan worden voor het gewas (Johnston *et al.*, 2014). De snelheid van vrijstelling kan wel te traag zijn voor een optimale gewasopbrengst.

## 31.5 WAARGENOMEN EVOLUTIES IN FOSFORBESCHIKBAARHEID IN DE TIJD

### 31.5.1 Gebruik van de fosforbuffercapaciteit of andere bodemeigenschappen om veranderingen in fosforbeschikbaarheid te voorspellen

Door het opstellen van curves van de evolutie van de fosforbeschikbaarheid in functie van de cumulatieve bodembalans (Figuur 152) kan berekend worden wat de benodigde fosforbemestingsdosis of uitmijningshoeveelheid is om de fosforbeschikbaarheidsindex met een bepaalde waarde te verhogen of te verlagen. Deze dosis is groter voor een bodem met een hogere fosforbuffercapaciteit. Dit is de informatie die we graag willen hebben om op termijn de Vlaamse bodems in de streefzone voor fosforbeschikbaarheid te krijgen.



Figuur 152. Evolutie van de fosforbeschikbaarheidsindex bij cumulatieve bodembalans voor bodem A (geel, beperkte fosforbuffercapaciteit) en bodem B (blauw, grote fosforbuffercapaciteit). Op deze manier kan de benodigde dosis (bemesting of uitmijning) berekend worden om de streefzone voor fosforbeschikbaarheidsindex te bereiken.

Meestal wordt er geen fosforbuffercapaciteit van een bodem gemeten. De voorbeelden hieronder maken duidelijk dat de evolutie van de fosforbeschikbaarheid in de tijd vaak sterk afhankelijk is van bodem tot bodem.

Indiati & Sharpley (1997) bepaalden de verandering in fosforbeschikbaarheid, gemeten met verschillende methodes (Olsen, Mehlich-3,  $P_{FeO}$ ,  $P_w$ ,...), na toedienen van verschillende fosforhoeveelheden, en dit voor 13 Italiaanse bodems. De mate waarin de fosforbeschikbaarheid toenam was voor alle testen sterk bepaald door de P-sorptie-index (SI) van de bodem. Deze eenpunts-bufferindex wordt bepaald door 1,5 g P per kg bodem toe te voegen in een vast : oplossing-verhouding van 1:20. De exponentiële relatie tussen verandering in bodemfosfortest en de SI had een  $R^2$  tussen 0,84 en 0,90, afhankelijk van de test. Ook voor 28 Portugese bodems was de toename in fosforbeschikbaarheid per bemestingsdosis sterk gerelateerd aan de SI ( $R^2$  voor P-AL: 0,72), terwijl er geen relaties gevonden werden met klei, CEC of affiniteitsconstante  $k$  van de Langmuir-isotherm (wel met  $Fe_{ox}$  en org C) (Indiati *et al.*, 1999).

Op 6 Australische veldproeven met negatieve bodembalans was de grootte van de daling in fosforbeschikbaarheid (P- $CaCl_2$ , P-Olsen en P-Colwell) gerelateerd aan de het oxalaat extraheerbaar aluminium en ijzer, totale P, organische C, FBV, buffercapaciteit en bodemtextuur (Coad *et al.*, 2014).

Voor vijf verschillende Zweedse bodems bleek de verandering in P-AL en P- $CaCl_2$  na bemesten het kleinst voor bodems met veel ijzer en aluminium (Djodjic and Mattsson, 2013).

Om evoluties in fosforbeschikbaarheid te kunnen voorspellen voor Finse bodems was naast de beginwaarde van fosforbeschikbaarheid en de bodembalans, ook het bodemtype belangrijk (Uusitalo *et al.*, 2016). Er werden verschillende voorspellende vergelijkingen gefit voor vier verschillende bodemtypes (klei, silt, organische bodems en grove mineralenbodems). De auteurs suggereren dat voor bodems met andere uitgangsmaterialen dan de Finse bodems, mogelijk andere indelingen geschikt zijn, zoals bijvoorbeeld volgens het ijzer- en aluminiumgehalte.

Ekholm et al. (2005) stelden vast dat de verandering in fosforbeschikbaarheid in 14 verschillende Finse proefvelden in relatie tot de bodemfosforbalans 8 keer groter was bij hoge versus lage initiële fosforbeschikbaarheid.

Daling van de fosforbeschikbaarheid (verschillende P-testen) in drie Australische graslandbodems na stoppen van fosforbemesting (16-26 jaar) was afhankelijk van de initiële fosforbeschikbaarheid en de fosforretentie, een P-sorptie-index (Dodd *et al.*, 2012). De bodem-pH was algemeen gezien weinig bepalend voor de snelheid van daling in fosforbeschikbaarheid.

Er werd voor enkele Nederlandse bodems vastgesteld dat veranderingen in bodemfosfor ( $P_{ox}$  en  $P_w$ ) bij verschillende P-bodembalansen moeilijk konden voorspeld worden met behulp van 5 verschillende sorptiemodellen (van der Salm *et al.*, 2016). Enkel bij bodemspecifieke parameterisatie (met duidelijke verschillen tussen uitmijning- of opbouwscenario's) werden betrouwbare resultaten verkregen. Modellen waarbij niet alleen evenwichts- maar tevens ook snelheidsbepalende sorptie (fixatie en vrijstelling) inbegrepen zijn, voorspellen waargenomen evoluties beter.

Samengevat zal voor het voorspellen van de evolutie van de fosforbeschikbaarheid vooral de initiële fosforbeschikbaarheid en de fosforbodembalans nodig zijn. Deze voorspellingen zullen duidelijk in accuraatheid kunnen toenemen indien er extra informatie beschikbaar is over de buffercapaciteit (Indiati *et al.*, 1999; Quintero *et al.*, 2003), of alternatief informatie over bodemeigenschappen die van belang zijn bij fosforsorptie/-desorptie (van der Salm *et al.*, 2016). Idealiter is er ook informatie over de bemestingsgeschiedenis, omdat sorptie en desorptie-eigenschappen verschillen bij opbouw-, evenwichts- of uitmijningsscenario's en dit implicaties heeft op de evolutie van de fosforbeschikbaarheid. Bovendien is er bij langere reactietijd meer fixatie mogelijk. Grafisch kan de benodigde informatie voorgesteld worden op Figuur 152:

- Fosforbodembalans (x-as)
- Fosforbuffercapaciteit(sindex) of bepalende bodemeigenschappen (helling curve)
- Tijd sinds laatste bemesting en/of tijdsduur van fosforbodembalans: curve kan door fixatie naar beneden verschuiven bij langere tijdsduur

Toch vinden sommige studies dat de evolutie van de fosforbeschikbaarheid voornamelijk bepaald wordt door de bodemfosforbalans en de initiële fosforbeschikbaarheid en minder door de bodemeigenschappen, zoals bij verschillende Ierse veldexperimenten (Schulte *et al.*, 2010). Dalingen van de fosforbeschikbaarheid bij negatieve bodembalans zouden wel groter zijn bij kalkrijke bodems dan bij kalkarme bodems (Herlihy *et al.*, 2004) en bij bodems met lagere totaal P-gehalte (Wall *et al.*, 2013).

### 31.5.2 Evolutie van P-AL en P-CaCl<sub>2</sub> in functie van de fosforbodembalans

Er zijn in de literatuur data te vinden betreffende de evolutie van de fosforbeschikbaarheid in veldproeven bij verschillende bodembalansen. Er wordt hieronder gefocust op de in luik 1 geselecteerde fosforbeschikbaarheidstesten P-AL en P-CaCl<sub>2</sub>. Voor elke test worden studies gezocht met volgende informatie:

- Begin- en eindwaarde van fosforbeschikbaarheid. Het is belangrijk dat de bodemstaalnames op hetzelfde veld of subplot worden uitgevoerd
- Tijdsduur van het veldexperiment

- Fosforbodembalans, dit is de fosforbemesting min de fosforafvoer door het gewas. Meestal zijn fosforafvoergegevens beschikbaar. Indien niet, wordt gewerkt met fosforafvoergegevens zoals gebruikt voor MAP5, eventueel aangepast voor lokale condities, of algemene fosforgehaltes (Ehlert *et al.*, 2009)
- diepte van de staalname
- bodemdichtheid (indien niet beschikbaar, wordt gewerkt met algemene waarden voor de gegeven bodemtextuur)
- Bodemeigenschappen indien beschikbaar: pH, textuur, buffereigenschappen,...

De oplistings van de studies met de gezochte gegevens is terug te vinden in Tabel 130 en Tabel 131. Deze tabellen zijn nog niet volledig en zullen nog verder aangevuld worden met data van:

- Literatuur
- ILVO- en BDB-veldproeven uit het verleden
- gegevens van veldproeven verkregen van UGent (professor Dirk Reheul en professor Kris Verheyen)
- twee veldstudies uit VK gebruikt in luik 1
- de serreproef uit luik 1
- de driejarige bemestingsproeven uit luik 2

De data uit Tabel 130 en Tabel 131 worden geanalyseerd en een model wordt opgemaakt in DWP 3.2. Daarbij zullen verschillende aanpakken geprobeerd en geëvalueerd worden:

- Empirische modellen: fitten van curves van fosforbeschikbaarheid versus cumulatieve fosforbodembalans (Figuur 152), eventueel op te splitsen per bodemgroep. Hierbij is zowel de aanpak gebruikt door Uusitalo *et al.* (2016) als deze gebruikt door Ekholm *et al.* (2005), als een eigen aanpak mogelijk.
- Een andere empirische aanpak is mogelijk door een exponentiële curve te fitten op data van bodems zonder fosforbemesting (Schulte *et al.*, 2010; Wall *et al.*, 2013)
- Een mechanistisch model zoals toegepast door Karpinets *et al.* (2004) is enkel mogelijk indien de 3 nodige parameters telkens per bodem gecalibreerd worden. Wellicht is deze aanpak praktisch moeilijk haalbaar voor voorspellingen voor alle Vlaamse bodems.

Tabel 130. Veldproeven waarbij de evolutie van P-AL in de tijd wordt nagegaan

referentie	Begin-P-AL (mg P/kg)	Eind-P-AL (mg P/kg)	Aantal jaar	Bodem-P-balans (kg P/ha/jr)	Diepte staalname (cm)	Land	Bodem-eigenschappen
(Verloop <i>et al.</i> , 2010)	328*	245*	17	-1	20	Nederland	Zand, 4,8%OC,



<b>(Aarts et al., 2008)</b>	47	76	5	-17	10	Nederland	Jonge zeeklei
	47	89		-9			
	47	110		0			
	47	132		+9			
	47	154		+17			
	93	81		-17	10		Zand
	93	89		-9			
	93	101		0			
	93	118		+9			
	93	135		+17			
	90	77		-17			Rivierklei
	90	88		-9			
	90	99		0			
	90	108		+9			
	90	116		+17			
	124	110		-17			Veen
	124	121		-9			
	124	129		0			
	124	137		+9			
	124	144		+17			
	57	52	4	+7	10	Nederland	Fosfaatfixerende rivierklei
	52	61		+7			
	57	52		+7			
	79	92		+22			
	79	92		+22			
	83	114		+22			

<b>(van Middelkoop et al., 2004; Ehlert et al., 2008)</b>	183	122	10	0	10	Nederland	Zand, pH 5,6, 2,%OC, Fe en Al gekend
	197	188		+18	10		Let op: voor alles ook waarden voor 17 jaar, enkel 0-5 cm in (van der Salm et al., 2017)
	166	114		0	10		Zand, pH 5,6, 2,3%OC, Fe en Al gekend
	153	148		+18			
	183	194		0			Jonge zeeklei, pH 7,1, 3,0%OC, Fe en Al gekend
	166	218		+18			
	140	120		0			Veen, pH 5,0, 26,7%OC, Fe en Al gekend
	162	199		+18			
<b>(Reijneveld, 2001)</b>	528	424	8	-30	20	Nederland	Zand, pH 5,2, 5%OS
	546	454	8	-20			
	520	493	8	-13			
<b>(Djodjic et al., 2005)</b>	40	32	21	-14	20	Zweden	Silty klei leem, 37%klei, pH 6,9
	53	43	21	-4			
	84	163	21	+27			
	39	10	26	-13			Zandleem, 19% klei, pH 7,5
	45	16	26	-1,5			
	80	145	26	+26			
	58	17	21	-9			Zandleem, 7% klei, pH 5,8
	47	18	21	-4			
	60	76	21	+27			

	39	22	22	-14			Klei, 59% klei, pH 6,9
	39	27	22	-1			
	39	76	22	+27			
	67	19	26	-14			Leem, 17% klei, pH 6,5
	80	46	26	-3			
	112	142	26	+26			
<b>(Vanderdeelen et al., 1985; Vandendriessche et al., 1994)</b>	163	?	23	-11	23	Wallonië	Leem, pH 7,6
	163	80	23	-21			
	163	130	23	+7			
	163	190	23	+36			
	163	220	23	+51			
	163	280	23	+72			
<b>(Alblas and van der Schoot, 2000; van Wijk et al., 2013)</b>	122	114	24	-17	30	Nederland	Kalkrijke zavel, 2,2%OS
	122	166	24	+12			
	122	218	24	+44			
	122	380	23	+107			
	118	153	6	+3			Idem, was al 18 jaar uitgemijnd
	170	144	7	-27			
	236	201	7	-28			
	354	284	6	-32			Idem, was al 18 jaar zwaar bemest
<b>(Legrand et al., 2012) + Nawara</b>	176	65	45	-26	23	Wallonië	Leem, pH-CaCl2 5,9, 1,6%OS

	176	145		0	23		
	176	229		+23	23		
<b>(Berecz et al., 2005)</b>	7	10	37	-8	25	Hongarije	Bruine bosbodem
	7	15		+13	25		
	7	42		+29	25		
	7	84		+46	25		
	7	128		+64	25		

\* Gemiddelde voor gans bedrijf

Tabel 131. Veldproeven waarbij de evolutie van P-CaCl<sub>2</sub> in de tijd wordt nagegaan

referentie	Begin-P-CaCl <sub>2</sub> (mg P/kg)	Eind-P-CaCl <sub>2</sub> (mg P/kg)	Aantal jaar	Bodem-P-balans (kg P/ha/jr)	Diepte staalname (cm)	Land	Bodem-eigenschappen
<b>(van Wijk et al., 2013)</b>	0,5	0,5	7	-23	30	Nederland	Kalkrijke zavel, 2,2%OS. Was al 18 jaar uitgemijnd
	0,8	1,0	6	+3			Kalkrijke zavel, 2,2%OS. Was al 18 jaar uitgemijnd
	1,4	0,7	7	-27			Kalkrijke zavel, 2,2%OS
	1,6	1,1	7	+3			
	2,6	1,7	7	-28			
	3,0	2,0	7	+31			
	5,3	3,2	7	-32			Idem, was al 18 jaar zwaar bemest
	6,2	5,9	6	+89			Idem, was al 18 jaar zwaar bemest

## 31.6 REFERENTIES

- Aarts, H.F.M., den Boer, D.J., van Middelkoop, J.C., Oenema, J. 2008. Landbouwkundige gevolgen van het aanscherpen en differentiëren van fosfaatgebruiksnormen voor de melkveehouderij. Plant Research International B.V., Wageningen.
- Alblas, J. & van der Schoot, J.R. 2000. Pw-getal zegt niet alles... Kennisakker.nl.
- Allen, D. G., Barrow, N. J. & Bolland, M. D. A. 2001. Comparing simple methods for measuring phosphate sorption by soils. *Australian Journal of Soil Research*, **39**, 1433-1442.
- Aurell, A. 2000. Evaluation of the P-AL method for fertilization of barley (*Hordum vulgare* L.), in relation to soil properties, especially P sorption. *Examensarbete - Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap, avd.för växtnäringslära*, **117**.
- Baert, L., Depuydt, S., De Smet, J., Hofman, G., Scheldeman, K., Vanderdeelen, J., Van Meirvenne, M., Lookman, R., Merckx, R., Schoeters, I., Vlassak, K., De Gryse, S., Hartmann, R., Seuntjes, P., Verplancke, H., Verschoore, P. 1997. Fosfaatverzadiging van zandige bodems in Vlaanderen. Meise, Vlaamse Landmaatschappij.
- Barrow, N. J. & Debnath, A. 2014. Effect of phosphate status on the sorption and desorption properties of some soils of northern India. *Plant and Soil*, **378**, 383-395.
- Berez, K., Balázs, J., Németh, I. & Füleky, G. 2005. Studying the direct and residual effect of long-term fertilization using ammonium lactate and hot water extraction methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **36**, 203-213.
- Bolland, M. D. A. & Allen, D. G. 2003. Phosphorus sorption by sandy soils from Western Australia: effect of previously sorbed P on P buffer capacity and single-point P sorption indices. *Australian Journal of Soil Research*, **41**, 1369-1388.
- Börling, K., Otabong, E. & Barberis, E. 2001. Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **59**, 39-46.
- Buah, S. S. J., Polito, T. A. & Killorn, R. 2000. No-tillage soybean response to banded and broadcast and direct and residual fertilizer phosphorus and potassium applications. *Agronomy Journal*, **92**, 657-662.
- Burkitt, L. L., Gourley, C. J. P., Hannah, M. C. & Sale, P. W. G. 2006. Assessing alternative approaches to predicting soil phosphorus sorption. *Soil Use and Management*, **22**, 325-333.
- Burkitt, L. L., Gourley, C. J. P. & Sale, P. W. G. 2002a. Changes in bicarbonate-extractable phosphorus over time when P fertiliser was withheld or reapplied to pasture soils. *Australian Journal of Soil Research*, **40**, 1213-1229.
- Burkitt, L. L., Moody, P. W., Gourley, C. J. P. & Hannah, M. C. 2002b. A simple phosphorus buffering index for Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, **40**, 497-513.
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., van der Draai, H., Temminghoff, E.J.M. 2011a. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 1 snijmais. 1246.1. Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., van der Draai, H., Temminghoff, E.J.M. 2011b. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 2 grasland. Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.
- Coad, J., Burkitt, L., Dougherty, W. & Sparrow, L. 2014. Decrease in phosphorus concentrations when P fertiliser application is reduced or omitted from grazed pasture soils. *Soil Research*, **52**, 282-292.
- Daly, K., Jeffrey, D. & Tunney, H. 2001. The effect of soil type on phosphorus sorption capacity and desorption dynamics in Irish grassland soils. *Soil Use and Management*, **17**, 12-20.
- de Ruijter, F.J., Smit, A.L., Meurs, E.J.J. 2009. Plaatsing als strategie voor een efficiëntere fosfaatbemesting. 2. Veldproeven. 3. Wageningen, Plant Research International B.V.

- De Smet, J., Vanderdeelen, J. & Hofman, G. 1998. Effect of soil properties on the kinetics of phosphate release. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **29**, 2135-2147.
- Djordjic, F., Bergstrom, L. & Grant, C. 2005. Phosphorus management in balanced agricultural systems. *Soil Use and Management*, **21**, 94-101.
- Djordjic, F. & Mattsson, L. 2013. Changes in plant-available and easily soluble phosphorus within 1 year after P amendment. *Soil Use and Management*, **29**, 45-54.
- Dodd, R. J., McDowell, R. W. & Condon, L. M. 2012. Predicting the changes in environmentally and agronomically significant phosphorus forms following the cessation of phosphorus fertilizer applications to grassland. *Soil Use and Management*, **28**, 135-147.
- Dougherty, W. J., Burkitt, L. L., Corkrey, R. & Harvey, D. M. 2011. The effect of soil P sorption properties and phosphorus fertiliser application strategy on 'incidental' phosphorus fertiliser characteristics: a laboratory study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **89**, 189-197.
- Edmeades, D. C., Metherell, A. K., Waller, J. E., Roberts, A. H. C. & Morton, J. D. 2006. Defining the relationships between pasture production and soil P and the development of a dynamic P model for New Zealand pastures: a review of recent developments. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, **49**, 207-222.
- Ehlert, P., Morel, C., Fotyma, M. & Destain, J. P. 2003a. Potential role of phosphate buffering capacity of soils in fertilizer management strategies fitted to environmental goals. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **166**, 409-415.
- Ehlert, P.A.I., Dekker, P.H.M., van der Schoot, J.R., Visschers, R., van Middelkoop, J.C., van der Maas, A.A., Pronk, A.A., van Dam, A.M. 2009. Fosforgehalten en fosfaatafvoercijfers van landbouwgewassen. Eindrapportage. 1773. Wageningen, Alterra.
- Ehlert, P.A.I., van Middelkoop, J.C., van der Salm, C., Dekker, P.H.M. 2008. Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op lange termijn. Stand van zaken 2007. 1665. Wageningen, Alterra.
- Ehlert, P.A.I., van Wijk, C.A.Ph., Dekker, P.H.M. 2003b. Fosfaatbalansen op perceelsniveau. Scan van de resultaten van vier veeljarige veldproeven op bouwland. Lelystad, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Sector AGV.
- Eklholm, P., Turtola, E., Gronroos, J., Seuri, P. & Ylivainio, K. 2005. Phosphorus loss from different farming systems estimated from soil surface phosphorus balance. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **110**, 266-278.
- Forrester, S. T., Janik, L. J., Soriano-Disla, J. M., Mason, S., Burkitt, L., Moody, P., Gourley, C. J. P. & McLaughlin, M. J. 2015. Use of handheld mid- infrared spectroscopy and partial least- squares regression for the prediction of the phosphorus buffering index in Australian soils. *Soil Research*, **53**, 67-80.
- Grant, C. A., Monreal, M. A., Irvine, R. B., Mohr, R. M., McLaren, D. L. & Khakbazan, M. 2009. Crop response to current and previous season applications of phosphorus as affected by crop sequence and tillage. *Canadian Journal of Plant Science*, **89**, 49-66.
- Griffin, T. S., Honeycutt, C. W. & He, Z. 2003. Changes in soil phosphorus from manure application. *Soil Science Society of America Journal*, **67**, 645-653.
- Herlihy, M., McCarthy, J., Breen, J. & Moles, R. 2004. Effects over time of fertiliser P and soil series on P balance, soil-test P and herbage production. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, **43**, 147-160.
- Herlihy, M. & McGrath, D. 2007. Phosphorus fractions and adsorption characteristics in grassland soils of varied soil phosphorus status. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **77**, 15-27.
- Holford, I. C. R. 1997. Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, **35**, 227-239.
- Holford, I. C. R. & Mattingly, G. E. G. 1976. Model for behavior of labile phosphate in soil. *Plant and Soil*, **44**, 219-229.

- Indiati, R., Neri, U., Sharpley, A. N. & Fernandes, M. L. 1999. Extractability of added phosphorus in short-term equilibration tests of Portuguese soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **30**, 1807-1818.
- Indiati, R. & Sharpley, A. N. 1997. Changes in some soil phosphorus availability parameters as induced by phosphorus addition and soil sorption properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **28**, 1565-1578.
- Johnston, A. E., Poulton, P. R., Fixen, P. E. & Curtin, D. 2014. Phosphorus: Its efficient use in agriculture. *Advances in Agronomy, Vol 123*, **123**, 177-228.
- Karpinets, T. V., Greenwood, D. J. & Ammons, J. T. 2004. Predictive mechanistic model of soil phosphorus dynamics with readily available inputs. *Soil Science Society of America Journal*, **68**, 644-653.
- Koopmans, G. F., Chardon, W. J., Ehlert, P. A. I., Dolfing, J., Suurs, R. A. A., Oenema, O. & van Riemsdijk, W. H. 2004. Phosphorus availability for plant uptake in a phosphorus-enriched noncalcareous sandy soil. *Journal of Environmental Quality*, **33**, 965-975.
- Laboski, C. A. M. & Lamb, J. A. 2003. Changes in soil test phosphorus concentration after application of manure or fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, **67**, 544-554.
- Lee, A., Prasad, M., Cassidy, J., Gaffney, M. T. 2012. Plant available nitrogen and phosphorus from composted waste materials. ORBIT2012: Global assessment for organic resources and waste management: Assessment of technologies for optimal organics management processes and enlightened environmental policies.
- Legrand, G., Roisin, C., Bries, J., Destain, J.-P. 2012. PK bemesting in de biet: Bedenkingen op de lange termijn! De Bietplanter [493], 7-8. Brussel, vzw CBB.
- Lookman, R. 1995. *Phosphate chemistry in excessively fertilised soils*. K.U.Leuven, Leuven.
- Lookman, R., Freese, D., Merckx, R., Vlassak, K. & van Riemsdijk, W. H. 1995. Long-term kinetics of phosphate release from soil. *Environmental Science & Technology*, **29**, 1569-1575.
- Maguire, R. O., Sims, J. T. & Foy, R. H. 2001. Long-term kinetics for phosphorus sorption-desorption by high phosphorus soils from Ireland and the Delmarva Peninsula, USA. *Soil Science*, **166**, 557-565.
- Mallarino, A. P., Barcos, S. R., Prater, J. R. & Witty, D. J. 2009. Timing of broadcast phosphorus fertilization for no-till corn and soybean. *Soil Science Society of America Journal*, **73**, 2143-2150.
- McGechan, M. B. & Lewis, D. R. 2002. Sorption of phosphorus by soil, part 1: Principles, equations and models. *Biosystems Engineering*, **82**, 1-24.
- McPharlin, I. R. & Lanzke, N. C. 2001. Response of winter-sown carrots (*Daucus carota* L.) to rate and timing of phosphorus application on Joel sands. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **41**, 689-695.
- Messiga, A. J., Ziadi, N., Plenet, D., Parent, L. E. & Morel, C. 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use and Management*, **26**, 354-364.
- Morel, C., Tiessen, H. & Stewart, J. W. B. 1996. Sensitivity to equilibration periods of phosphate sorption and isotopic exchange methods assessing Q/I relationships in soils. *Soil Science*, **161**, 459-467.
- Morel, C., Tunney, P., Plenet, D. & Pellerin, S. 2000. Transfer of phosphate ions between soil and solution: Perspectives in soil testing. *Journal of Environmental Quality*, **29**, 50-59.
- Murphy, P. N. C., Sims, T. J., McDowell, R., Wall, D., Lalor, S. T. J., Daly, K., Shortle, G. 2013. Managing legacy soil phosphorus in grassland soils for agricultural productivity and environmental quality: a review. 7th International Phosphorus Workshop. Uppsala, SLU Dept of Soil and Environment.
- Paynter, R. M. & Dampney, P. M. R. 1991. The effect of rate and timing of phosphate fertilizer on the yield and phosphate offtake of grass grown for silage at moderate to high-levels of soil-phosphorus. *Grass and Forage Science*, **46**, 131-137.

- Pypers, P., Delrue, J., Diels, J., Smolders, E. & Merckx, R. 2006. Phosphorus intensity determines short-term P uptake by pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) grown in soils with differing P buffering capacity. *Plant and Soil*, **284**, 217-227.
- Quintero, C. E., Boschetti, N. G. & Benavidez, R. A. 2003. Effect of soil buffer capacity on soil test phosphorus interpretation and fertilizer requirement. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **34**, 1435-1450.
- Reijneveld, J.A. 2001. Effecten van verminderde fosfaatgiften op fosfaatfixerende kleigronden. 27. Wageningen, Plant Research International.
- Sattari, S. Z., Bouwman, A. F., Giller, K. E. & van Ittersum, M. K. 2012. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**, 6348-6353.
- Schulte, R. P. O., Melland, A. R., Fenton, O., Herlihy, M., Richards, K. & Jordan, P. 2010. Modelling soil phosphorus decline: Expectations of Water Framework Directive policies. *Environmental Science & Policy*, **13**, 472-484.
- Sisák, I., Sárdi, K. & Palkovics, M. 2002. Water-soluble P as affected by freshly applied and residual P and P fractions of soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **33**, 2813-2823.
- Uusitalo, R., Hyvaluoma, J., Valkama, E., Ketoja, E., Vaahtoranta, A., Virkajarvi, P., Gronroos, J., Lemola, R., Ylivainio, K., Rasa, K. & Turtola, E. 2016. A simple dynamic model of soil test phosphorus responses to phosphorus balances. *Journal of Environmental Quality*, **45**, 977-983.
- van der Salm, C., Kros, J. & de Vries, W. 2016. Evaluation of different approaches to describe the sorption and desorption of phosphorus in soils on experimental data. *Science of the Total Environment*, **571**, 292-306.
- van der Salm, C., van Middelkoop, J. C. & Ehlert, P. A. I. 2017. Changes in soil phosphorus pools of grasslands following 17yrs of balanced application of manure and fertilizer. *Soil Use and Management*, **33**, 2-12.
- van Middelkoop, J., van der Salm, C., Ehlert, P. 2014. Vijftien jaar fosfaatevenwichtsbemesting op grasland: impact op bodem en gewas. V-focus april 2014, 26-28. Wageningen, AgriMedia Wageningen.
- van Middelkoop, J.C., van der Salm, C., den Boer, D.J., ter Horst, M., Chardon, W.J., Bakker, R.F., Schils, R.L.M., Ehlert, P.A.I., Schoumans, O.F. 2004. Effecten van fosfaat- en stikstofoverschotten op grasland. 48. ASG - divisie Praktijkonderzoek.
- van Rotterdam-Los, A M D 2010. *The potential of soils to supply phosphorus and potassium: processes and predictions*. Wageningen University, Wageningen.
- van Wijk, C., de Haan, J.J., Ehlert, P.A.I., van den Berg, W. 2013. Lange termijn effecten van fosfaatbalansen op bouwland; fosfaattrappen proefveld Lelystad. Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.
- Vandendriessche, H., Geypens, M. & Bries, J. 1994. Effecten van de beperking van de P-bemesting op de gewasproductie en de bodemvoorraad. In: Studie- en vervolmakingsdag 'Gebruik van reststoffen in de land- en tuinbouw' pp. 57-70. K.V.I.V..
- Vanderdeelen, J., Boon, R., Piot, R. & Baert, L. 1985. Phosphorus and potassium balance of long-term fertilizer trials on two Belgian loamy soils. *Pédologie*, **35**, 191-204.
- Verloop, J., Oenema, J., Burgers, S. L. G., Aarts, H. F. M. & van Keulen, H. 2010. P-equilibrium fertilization in an intensive dairy farming system: effects on soil-P status, crop yield and P leaching. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **87**, 369-382.
- Wall, D. P., Jordan, P., Melland, A. R., Mellander, P. E., Mechan, S. & Shortle, G. 2013. Forecasting the decline of excess soil phosphorus in agricultural catchments. *Soil Use and Management*, **29**, 147-154.



## 32 BIJLAGE 4: LITERATUURSTUDIE DWP 3.6: BEMESTINGS- EN MANAGEMENT-TECHNIEKEN VOOR DUURZAAM FOSFORGEBRUIK

### 32.1 INLEIDING

In luik 1 werd op zoek gegaan naar de beste fosfortest voor het meten van de fosforbeschikbaarheid in de bodem. Daarna werd in luik 2 de na te streven fosforbeschikbaarheid in de bodem voor duurzaam fosforgebruik afgeleid. In luik 3 wordt ingegaan op het gedrag van bodemeigen en recent toegediende fosfor in de bodem. Meer specifiek wordt in deelwerkpakket 3.6 wordt gefocust op de **effecten van bemestingsstrategieën en managementtechnieken op de fosforbeschikbaarheid**, en daarmee op de gewasopbrengst en fosforverliezen. Bepaalde veldmanagementstechnieken en bemestingspraktijken kunnen eventueel helpen om de initiële fosforbeschikbaarheid vlot te laten evolueren naar streefzonewaarden. Algemeen kunnen technieken als bekalken en het voorzien van voldoende organische stof het secundair P-gebrek voorkomen of verminderen. Indien de P-opname wordt geoptimaliseerd, kan de opbrengst verhoogd worden en/of de uitspoeling van fosfor verminderd. Technieken als rijenbemesting, extra toediening van andere nutriënten, wijziging van pH, mesttype en bemestingstijdstip worden via literatuurstudie uitgediept. Voor wat betreft 'mesttype' wordt daarbij ook een veldexperiment opgevolgd.

### 32.2 BEMESTINGSTIJDSTIP

#### 32.2.1 Belang bemestingstijdstip voor gewasopbrengst

Met behulp van <sup>33</sup>P-experimenten stelden McLaren *et al.* (2017) vast dat het aandeel van recente fosforbemesting in de totale opgenomen fosforhoeveelheid door gras-klover het hoogst (tot 60%) was kort na bemesting, waarna het aandeel van de recente fosforbemesting in de plant daalde. Dit suggereert dat fosfor uit meststoffen het meest beschikbaar is kort na toepassing, waarna deze fosfor minder beschikbaar wordt door vastlegging in de bodem. Het tijdstip van fosforbemesting kan enkel een invloed hebben op de gewasopbrengst indien bemesting tout court een effect heeft op de opbrengst. Met andere woorden, dit is enkel mogelijk indien de fosforbeschikbaarheid onder de streefzone ligt. Voor de gewone onderhoudsbemesting maakt het bemestingstijdstip op vlak van opbrengst niets uit.

Van der Pauw (1937) toonde met twee veldexperimenten in Nederland aan dat een bemesting in de herfst een hogere opbrengst bewerkstelligde dan een bemesting in de lente. Dit was vooral het geval voor bemesting met slakkenmeel, aangezien deze trager fosfor vrijgeeft dan monocalciumfosfaat. Bij bemesten te kort voor de groei is een deel van de fosforbemesting nog niet beschikbaar. Hij vermeldde echter ook enkele studies waarbij bemesting kort voor de teelt in een grotere opbrengst resulteerde dan bemesting in het jaar voordien. Aan de bodem toegediend fosfaat wordt in de loop van de tijd minder snel beschikbaar voor de plant door vastlegging op de vaste bodemfase (van der Zee *et al.*, 1990). Een daling van de fosforbeschikbaarheid in de tijd na bemesting werd in verschillende experimenten waargenomen (Haygarth and Jarvis, 1999; Karpinets *et al.*, 2004; de Ruijter *et al.*, 2009; Lee *et al.*; Shuai *et al.*, 2014). Het grootste deel van de toegediende fosfor wordt na

bemesting niet teruggevonden in de gemeten beschikbare fosforfractie, ook indien de meting met de relatief harde P-AL-extractie gebeurt (Ehlert *et al.*, 2008; de Ruijter *et al.*, 2009). Dit wijst op het belang van een beperkte tijdsduur tussen de fosfaatbemesting en het opnamemoment door de plant indien de bodemfosfor ontoereikend is voor een goede gewasopbrengst (Dekker and Postma, 2008). Toch dient opgemerkt dat een daling van het bodemfosforgehalte niet per se een vermindering van de fosforbeschikbare fractie voor het gewas inhoudt, dit hangt af van de geschiktheid van de gekozen bodemfosformeetmethode (Karpinets *et al.*, 2004).

In een zesjarig veldexperiment in Duitsland was de gemiddelde opbrengststijging bij toediening van TSP dezelfde bij bemesting in de herfst als in de lente (Eichler-Lobermann *et al.*, 2007). Uit 20 veldexperimenten in de VS werd geconcludeerd dat fosforbemesting voor maïs in de herfst of in de lente de opbrengst, fosforopname en vroege groei gelijkaardig deed toenemen (Mallarino *et al.*, 2009). In een veldexperiment in Nederland werd vastgesteld dat de opbrengst van verschillende gewassen bij bemesten in de herfst lager was dan bij bemesten in de winter of voorjaar (Ehlert *et al.*, 2003). In een andere Nederlandse veldproef was de opbrengst van aardappel en snijmaïs soms hoger bij bemesting in het voorjaar dan bij herfstbemesting, echter niet bij suikerbiet en granen.

### 32.2.2 Belang bemestingstijdstip voor fosforverliezen

De fosforconcentratie in runoff neemt af bij toenemende tijd tussen de fosforbemesting en het runofftijdstip (Sharpley *et al.*, 2001). Hoe meer tijd er bijgevolg tussen de bemesting en de eerste hevige regenbui zit, hoe kleiner de fosforverliezen zijn (Withers *et al.*, 2003; Kleinman *et al.*, 2011; Hahn *et al.*, 2012). Dit wordt verklaard door het vastleggen van de toegediende fosfor in de bodem (zie ook 32.2.1). Hoe snel dit risico daalt in de tijd, is variabel, zelfs binnen één perceel (Withers *et al.*, 2003) en is afhankelijk van de grootte van de regenval (Vadas *et al.*, 2011), het mesttype en de fosforvorm (Allen and Mallarino, 2008). Er kunnen meerdere weken tot maanden tussen bemesting en hevige regenval nodig zijn om dezelfde fosforverliezen als bij een niet-bemeste bodem te bekomen (Withers *et al.*, 2003; Allen and Mallarino, 2008). Door dit tijdseffect kunnen grote incidentele verliezen voorspeld en bijgevolg vermeden worden door gebruik te maken van de 'Bemestingstool', een programma dat de verwachte oppervlakkige afvoer (som over 7 dagen) berekent op basis van de huidige hydrologische toestand en de neerslagverwachting (Assinck and van der Salm, 2011). Toch kan de intensiteit van de regenval bepalender zijn voor de grootte van de fosforverliezen via runoff dan de tijdsduur tussen de bemesting en de regenval (Vadas *et al.*, 2011). Oordeelkundiger bemesten (beter tijdstip, rekening houden met weersvoorspellingen) kan de incidentele verliezen beperken, maar vaak blijft er toch een relatie bestaan tussen het bemestingstijdstip en fosforconcentraties in drain-, greppel- en slootwater (Koopmans *et al.*, 2009).

## 32.3 RIJENBEMESTING

### 32.3.1 Algemeen effect van plaatsing van fosforbemesting

Rijenbemesting is een specifieke vorm van bemestingsplaatsing. Naast het plaatsen van mest in een rij dicht bij de (te vormen) wortels van het gewas, is het ook mogelijk om bemesting te plaatsen in het plantgat of zaden te coaten met meststoffen. Vooral voor fosfor is bemestingsplaatsing interessant omdat fosfor relatief immobiel is in de bodem. Zeker voor gewassen met een beperkt wortelstelsel kan het dan een voordeel bieden wanneer de fosforbemesting niet gelijkmatig over het perceel verdeeld wordt (volleveldsbemesting), maar specifiek in de buurt van de wortels geplaatst wordt.

### 32.3.2 Voordelen van fosforrijenbemesting

Indien fosforrijenbemesting wordt toegepast, zijn er twee mogelijke voordelen ten opzichte van vollevelsbemesting:

- een kleinere bemestingshoeveelheid kan toegepast worden met behoud van eenzelfde lokale fosforbemestingsdosis (kg/ha) als bij vollevelsbemesting. Dit is interessant indien de bemestingshoeveelheid beperkt of de bemesting duur is, en heeft positieve gevolgen voor het milieu (kleinere totale P-input in de bodem) zonder gevolgen voor het gewas (ten opzichte van vollevelstoepassing)

en/of

- Eenzelfde bemestingshoeveelheid als bij vollevelsbemesting resulteert in een hogere lokale fosforbemestingsdosis in vergelijking met vollevelsbemesting. Dit is vooral interessant bij zeer lage fosforbeschikbaarheid in de bodem.

Daarnaast zijn ook bijkomende voordelen mogelijk. Door het verlagen van de kunstmestgift is er meer ruimte om dierlijke mest en dus ook organische stof aan te voeren. Er is geen afhankelijkheid van de wind, de uniformiteit is groter (minder opbrengstverliezen langs sloten, op kopakkers en in hoeken) en er zijn minder mineralenverliezen.

### 32.3.3 Wanneer heeft fosforrijenbemesting zin?

Fosforbemesting kan gebruikt worden om de gewasopbrengst bij lage bodemfosforbeschikbaarheid op korte termijn te verhogen (zie DWP 3.3) en/of om de fosforbeschikbaarheid in de bodem te onderhouden of te verhogen op langere termijn (zie DWP 3.2). Kiezen voor rijenbemesting gebeurt voornamelijk vanuit het eerste oogpunt, omdat met rijenbemesting de bodemfosforbeschikbaarheid enkel lokaal onderhouden of verhoogd wordt. Dit laatste kan alleen interessant zijn in de zeer uitzonderlijke situatie dat het gewas altijd op dezelfde rijen in het perceel geplaatst wordt. Rijenbemesting zal dus voornamelijk toegepast worden om op korte termijn, i.e. in het jaar van bemesten, een optimale gewasopbrengst te verkrijgen. **Rijenbemesting is vanuit dit oogpunt dus enkel zinvol indien de opbrengst kan verhoogd worden via bemesting**, namelijk **indien de fosforbeschikbaarheid in de bodem lager is dan een kritische fosforbeschikbaarheid** voor het gewas (onder de streefzone, zie DWP 1.3, 2.1 en 2.4) (Ehlert *et al.*, 2002).

Daarnaast is rijenbemesting uiteraard alleen zinvol indien de bemesting zo kan geconcentreerd worden op specifieke plekken waar er zich gewaswortels bevinden. Daarom is rijenbemesting vooral interessant voor gewassen met een beperkt wortelstelsel. Daarbij komen meteen de groenten in het vizier, maar omdat deze vaak in fosforrijke bodems geteeld worden, is fosforbemesting(splaatzing) meestal weinig zinvol (Ehlert *et al.*, 2002).

### 32.3.4 Verschillen tussen gewassen

Zoals reeds gesteld is rijenbemesting vooral interessant bij gewassen met een beperkt wortelstelsel. Daarbij kan nog onderscheid gemaakt worden tussen gewassen die kort groeien en in volle groei geoogst worden (zoals veel groenten), en gewassen met een langere groeiduur. Vaak is fosfaatopname tijdens de initiële exponentiële gewasgroei cruciaal. Door het beperkt wortelstelsel en bijgevolg beperkte fosfaatopname kan een betere groei

waargenomen worden indien de fosforbeschikbaarheid in de bodem of door bemesten hoger is tijdens die cruciale fase (Smit *et al.*, 2009). Bijgevolg zal bij gewassen die geoogst worden in volle groei vaker een fosforeffect waargenomen worden dan bij gewassen met een langere groeiduur. Het lijkt echter weinig efficiënt om de fosforbeschikbaarheid in de bodem enkel voor deze korte periode te verhogen, wanneer de absolute fosforopname eigenlijk maar klein is. Dan kan een gerichte fosforplaatsing een oplossing bieden.

Bij de gewassen met langere groeiduur wordt de initiële exponentiële groeifase nog gevolgd door een lineaire groeifase waarin het wortelstelsel beter ontwikkeld is en vaak niet meer beperkend voor fosforopname. De grootste fosfaatopname van deze gewassen gebeurt in de lineaire fase waardoor een achterstand in groei van tijdens de initiële groeifase nog kan ingehaald worden (Smit *et al.*, 2009). Dit wordt regelmatig waargenomen bij maïs (zie 32.3.5.4).

### 32.3.5 Studies van opbrengsteffecten

#### 32.3.5.1 Algemeen

Er werd in de literatuur op zoek gegaan naar studies die effecten van rijenbemesting op het gewas, bodem en/of verliezen analyseerden. Daarbij werd een onderscheid gemaakt tussen studies die rijenbemesting (RB) vergeleken met volleveldsbemesting (VB), en studies die rijenbemesting vergeleken met een situatie zonder additionele bemesting of het al dan niet toepassen van rijenbemesting bovenop volleveldsbemesting. Waargenomen verschillen in de tweede groep van studies zijn niet per se gerelateerd aan het plaatselijk toedienen van bemesting, maar aan het effect van bemesting an sich. In deze literatuurstudie zijn we voornamelijk op zoek naar de mogelijke effecten en voordelen van rijenbemesting ten opzichte van volleveldsbemesting (effecten van bemesting zelf worden behandeld in DWP 3.2 en 3.3), daarom wordt deze tweede groep niet uitvoerig besproken. Een uitzondering vormt het gebruik van startfosformeststoffen voor maïs, dat omwille van het vele gebruik in Vlaanderen besproken wordt onder 32.3.5.4.

Er zijn weinig studies voorhanden met voor in Vlaanderen gangbare of vergelijkbare bodems, teelten en technieken. Vaak wordt gebruik gemaakt van samengestelde meststoffen, waardoor het niet zeker is of een eventueel effect op opbrengst gerelateerd is aan fosfor of aan (een combinatie met) andere nutriënten. Studies met samengestelde meststoffen werden enkel geselecteerd indien gefocust werd op fosfor en deze worden apart besproken (32.3.5.3).

#### 32.3.5.2 Rijenbemesting versus volleveldsbemesting, enkel P

Gewas	Bodem	Dosis	Meststof	Effect	Referentie
Bloemkool	Fosforarm Zand (Australië)	0-450 kg P/ha	Superfosfaat	Geen opbrengstverschil	(McPharlin <i>et al.</i> , 1995)
Sla	Fosforarm Zand (Australië)	0-600 kg P/ha	Superfosfaat	Geen opbrengstverschil, wel lager P-gehalte gewas bij RB	(McPharlin and Robertson, 1997)

<b>Ui</b>	Fosforarm Zand (Australië)	0-800 kg P/ha	Superfosfaat	Geen opbrengstverschil, wel hoger P-gehalte gewas bij VB	(McPharlin and Robertson, 1999)
<b>Sla</b>	Fosforarme koolstofrijke bodems in VS (histosols)	0-296 + 49 kg P/ha	Superfosfaat	Hogere opbrengst bij bandbemesting	(Guzman <i>et al.</i> , 1987)
<b>Suikermaïs</b>	Koolstofrijke bodems (histosols)	0-100 kg P/ha	P	Bandbemesting deed benodigde bemestingshoeveelheid dalen voor bepaalde opbrengst (efficiëntie meer dan drie keer hoger dan vollevelds) + hogere totale opbrengst in fosforarme bodems. Geen verschil in fosforrijke bodems	(Sanchez <i>et al.</i> , 1991)
<b>Stamslabonen en tuinbonen</b>	Zandgrond met lage tot vrij hoge P-toestand	0-200 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha		Hogere opbrengst bij RB dan bij VB (zelfde opbrengst bij 1/6 <sup>e</sup> van bemestingsdosis). Geen verschillen bij hoge P bodem	(Prummel and van Barnau Sijthoff, 1975)
<b>Aard-appelen</b>	Kalkrijke zeegrond, ruim voldoende P-toestand (Nederland)	0-240 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Tripelsuperfosfaat en ammonium polyfosfaat (correctie voor N)	Hogere knolopbrengst bij RB dan bij VB in één jaar (droog), ander jaar geen verschil	(Smit, 2012)
<b>Wortel, ui, spinazie, suikerbiet, stamslaboon, snijmaïs, spruitkool, prei, ijsbergsla</b>	Vrij lage P-toestand (Nederland)	Onbemest, 10 en 30 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha in de rij en 200 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Tripelsuperfosfaat	Over het geheel van de gewassen geen opbrengstverschillen tussen RB 10 en 30 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha en VB 200 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha, vaak wel hogere opbrengst dan bij nulbemesting (uitz: ui,	(de Ruijter <i>et al.</i> , 2009)

		volle- velds		wortel, ijsbergsla en late stamslaboon)	
<b>Maïs</b>	Lage P- toestand (Nederland)	Onbe- mest, 10 en 30 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha in de rij en 200 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha volle- velds	Tripelsuper- fosfaat	Betere initiële groei bij 30 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB en 200 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha VB, eindopbrengsten niet verschillend	(de Ruijter <i>et al.</i> , 2009)

### 32.3.5.3 Rijenbemesting versus volleveldsbemesting, samengestelde meststoffen

Gewas	Bodem	Dosis	Meststof	Effect	Referentie
<b>Sla</b>	Goed bemest	1 cm onder zaden	Starter NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	65% toename in opbrengst na 36 dagen met starter	(Costigan, 1984)
<b>Sla</b>	Fosforarme koolstofrijke bodems (histosols)	0-276 kg P/ha  0-429 kg K/ha	Superfosfaat of 50-60-120 NPK	Hogere opbrengst wanneer P-gift deels in band wordt toegeediend	(Guzman <i>et al.</i> , 1987)
<b>Andijvie</b>	Vlaanderen	0-25 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Verschillende samengestelde meststoffen RB, tripelsuperfosfaat VB	Hogere opbrengst bij bemesten, niet- significante hogere opbrengst bij RB (samengestelde meststof) dan bij VB (P)	(Verhaeghe, 2014)
<b>Maïs</b>	Zand, voldoende P- toestand (Nederland)	0-56 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB en  0-85 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha VB	Verschillende	Geen opbrengstverschillen tussen RB en VB	(van Dijk <i>et al.</i> , 2010)
<b>Maïs</b>	Zand, voldoende P-	0-44,5 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB en	Verschillende	Geen opbrengstverschillen tussen RB en VB	(van Dijk <i>et al.</i> , 2010)

	toestand (Nederland)	0-37 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha VB			
<b>Zaaiui</b>	Lichte klei/zavel, voldoende tot hoge P-toestand (Nederland)	0-10 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB en 0-100 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha VB	Verschillende kunstmest samengesteld	Geen opbrengstverschillen tussen RB en VB	(Malda and Rutgers, 2012)
<b>Aardappel</b>	Verschillende met voldoende P-toestand (Nederland)	0-120 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB en 0-240 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha VB	Verschillende met kleine N-hoeveelheid (correctie voor N-bemesting gedaan)	Hogere opbrengst en grotere aardappelen bij RB dan VB, vooral op jonge kalkrijke kleibodems	(Pronk <i>et al.</i> , 2013)
<b>Maïs</b>	Verschillende zandbodems met voldoende P-toestand	9-31 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB en 0-20 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha VB	P-starter in rij wel of niet bovenop VB met drijfmest, of RB met drijfmest	Gemiddeld 14 veldproeven: P-starter bovenop VB deed opbrengst toenemen (+440 kg/ha). RB met mest gaf hogere opbrengst dan VB met mest en gelijkaardig met VB met mest + starter-P	(Schröder <i>et al.</i> , 2015)

### 32.3.5.4 Startfosfor in de rij voor maïs

Soms wordt een startmeststof gebruikt waar ook N in aanwezig is. In dit geval is het effect van P niet eenduidig te achterhalen, daarom worden deze studies niet meegenomen.

Bodem	Dosis	Meststof	Effect	Referentie
Verskillende zandbodems met voldoende P-toestand (Nederland)	9-31 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB en 0-20 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha VB	P-starter in rij wel of niet bovenop VB met drijfmest, of RB met drijfmest	Gemiddelde 14 veldproeven: P-starter bovenop VB deed opbrengst licht toenemen (+440 kg/ha). RB met mest gaf hogere opbrengst dan VB met mest en gelijkaardig met VB met mest + starter-P	(Schröder <i>et al.</i> , 2015)
Lage-gemiddelde P-toestand (Vlaanderen)	170 kg N/ha runderdrijfmest VB met of zonder extra 20 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB	Runderdrijfmest + kunstmest-P	Geen significante meeropbrengst indien extra bemesting met RB	(Hermans and Bries, 2008)
Kalkrijke en niet-kalkrijke bodem (VK)	0-41 kg P/ha RB	TSP en N-P	Eén veld met en één veld zonder opbrengststijging bij RB bovenop VB	(Withers <i>et al.</i> , 2000)
Verskillende bodems met lage tot zeer hoge P-toestand	20-50 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha extra RB		In slechts 4 van de 20 proefjaren is er een opbrengstverhoging bij extra RB (vooral indien geen basis VB)	(van Middelkoop and van Schooten, 2010)
14 Nederlandse bodems	0-15-30 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha RB bovenop dierlijke VB		Niet-significante opbrengststijging bij extra RB	(Bussink <i>et al.</i> , 2011)
3 fosforrijke leembodems (Canada)	RB met runderdrijfmest en/of TSP	Runderdrijfmest en TSP	Opbrengststijging tov niet-bemesting. Geen	(Bittman <i>et al.</i> , 2012)



			opbrengstverschil tussen RB met mest of TSP.	
--	--	--	--	--

### 32.3.5.5 **Samenvatting**

Uit bovenvermelde studies blijkt dat er soms een hogere opbrengst wordt bekomen met rijenbemesting in vergelijking met vollevels-bemesting, maar niet altijd. Er wordt soms waargenomen dat het effect van bemestingsplaatsing verdwijnt bij hogere fosfortoestand van de bodem (van Dijk *et al.*, 2007b; van Middelkoop and van Schooten, 2010). Door het gebruik van verschillende soorten fosforbeschikbaarheidsmetingen en meststoffen is vergelijken tussen de studies moeilijk. Zeker indien de rijmeststof niet alleen P bevat, is het moeilijk conclusies trekken wat betreft de invloed van het plaatsen van fosfor in de rij. Met enige voorzichtigheid kan toch besloten worden dat rijbemesting voor hogere opbrengsten kan zorgen door het lokaal verhogen van de fosforbeschikbaarheid indien deze onvoldoende is voor een optimale gewasopbrengst.

Het is duidelijk dat door de meststoffen enkel in rijen toe te passen, de efficiëntie van bemesten toeneemt. Met een kleinere totale fosforhoeveelheid (zie 32.3.8) kan bij rijenbemesting eenzelfde opbrengst bekomen worden als bij het vollevels bemesten.

Wat betreft het gebruik van startfosforbemesting bij maïs zijn de resultaten niet eenduidig. Startfosfor kan helpen om een minder goede begingroei en paarskleuring van maïs te voorkomen, maar deze minder goede start leidt niet altijd tot significante opbrengstderving (van Keulen *et al.*, 2000; Smit *et al.*, 2009). Dit wordt ook waargenomen in de bemestingsproeven van dit VLM-fosforproject. Door de relatief lange groeiduur van maïs kan een groeiachterstand door een tekort in de jeugdfase immers terug ingehaald worden (Withers *et al.*, 2000; Smit *et al.*, 2009). Bij een lage fosforbeschikbaarheid in de bodem kan deze startbemesting zeker bijdragen aan de fosforvoorziening voor het gewas. Net als bij bemestingsplaatsing wordt het effect van startfosfor kleiner bij grotere fosforbeschikbaarheid (Schröder *et al.*, 1997).

### 32.3.6 **Gevolgen van rijenbemesting voor bodem en fosforverliezen**

Er werden geen studies gevonden die de verschillen in fosforbeschikbaarheidsevolutie en fosforverliezen vergeleken tussen rijenbemesting en vollevels-bemesting. Indien altijd dezelfde rijen bemest worden (bijvoorbeeld bij meerjarige teelt), kan verwacht worden dat de fosforbeschikbaarheid in deze rijen zal toenemen en buiten de rijen zal afnemen. De heterogeniteit van het perceel zal dus sterk verhogen. Zo werd in een perceel waarop gedurende twee jaar rijbemesting met kippenmest werd uitgevoerd, 50-voudige verschillen in fosforbeschikbaarheid binnen en buiten de rijen waargenomen (Tewolde *et al.*, 2013). Dit effect zal er niet zijn indien de plaats van deze rijen niet vast is en elk jaar verandert.

Wat het gevolg is van deze mogelijk toegenomen heterogeniteit voor potentiële fosforverliezen, is niet duidelijk. Theoretisch daalt het verliesrisico voor het onbemeste deel en neemt het risico toe voor de bemeste rijen. Wat het totaaleffect zal zijn, zal wellicht afhangen van de initiële fosforbeschikbaarheid, de hydrologie en de transportroutes van fosfor.

### 32.3.7 Rijenbemesting met dierlijke mest

Bemestingsplaatsing kan niet alleen met kunstmest maar ook met dierlijke mest gerealiseerd worden (van Dijk *et al.*, 2007b; Krebbers, 2010; van Schooten, 2010; Bittman *et al.*, 2012; Schröder *et al.*, 2015; Federolf *et al.*, 2016). Het in de rij plaatsen van dierlijke mest bij maïs kan het gebruik van startfosfor vervangen zonder opbrengstdaling (Schröder *et al.*, 1997; Federolf *et al.*, 2016). Ook voor aardappelen is rijenbemesting mogelijk (van Geel, 2012). Bijkomend voordeel is dat zo ook N en K dicht bij de plant worden gebracht. Door de herziening van het Nederlandse bemestingsadvies voor maïs (van Dijk and van Geel, 2012) is het advies voor de vollevelsbemesting met dierlijke mest gedaald en wordt het advies grotendeels voor rijenbemesting gegeven. Indien de rijenbemesting met kunstmestfosfaat wordt gegeven, kan de voorziening van N en K in het gedrang komen. Vervanging van de rijenbemesting met kunstmest door dierlijke mestplaatsing kan dit tekort opvangen (Bussink *et al.*, 2011). In het advies wordt aangeraden om de drijfmest op een afstand van 8-10 cm van de zaadrij te injecteren. Indien het zaad in de drijfmest terecht komt, kan een slechte opkomst het gevolg zijn. Met behulp van GPS is het mogelijk om de drijfmestinjectie en het zaaien apart uit te voeren. In een Canadese studie (Bittman *et al.*, 2012) werd een toenemende respons van maïs op rijenbemesting waargenomen bij kleinere afstand (5-10-15 cm) tussen de drijfmest en de plantrij.

Tijdens demoproeven uitgevoerd door LCV kwam naar boven dat rijenbemesting met dierlijke mest geen meeropbrengst gaf ten opzichte van vollevelsbemesting, het nitraatresidu vergelijkbaar is en er nog wat technische problemen zijn en opgelet moet worden voor structuurschade door het gewicht van de mestkar (Van de Ven, 2014).

### 32.3.8 Berekeningen van bemestingsvermindering

Uit verschillende studies blijkt dat met een kleinere fosforbemestingsdosis in de rij dezelfde opbrengsten kunnen gehaald worden als met grotere vollevelsbemestingsdosisen (Prummel and van Barnau Sijthoff, 1975; Sanchez *et al.*, 1991; de Ruijter *et al.*, 2009; Pronk *et al.*, 2013). Soms kan dit simpelweg veroorzaakt worden door een voldoende fosfortoestand van de bodem en zou zelfs bij afwezigheid van bemesten eenzelfde opbrengst kunnen bekomen worden. Wanneer opbrengstverhoging wel degelijk mogelijk is, is een lagere bemesting met rijenbemesting mogelijk om dezelfde opbrengst als bij vollevelsbemesting te bekomen, met andere woorden: neemt de efficiëntie toe. In onderzoek op verschillende Nederlandse bodems werd waargenomen dat de bemestingsdosis tot 1/6<sup>e</sup> teruggebracht kon worden bij rijenbemesting om dezelfde opbrengst bij stamslabonen te krijgen als bij vollevelsbemesting (Prummel and van Barnau Sijthoff, 1975). Voor suikermaïs in de VS was de efficiëntie van rijenbemesting tot meer dan drie keer hoger dan vollevelsbemesting bij de bodems met de laagste fosforbeschikbaarheid. Deze relatieve efficiëntie daalde naar 1 wanneer de fosforbeschikbaarheid in de bodem voldoende was (Sanchez *et al.*, 1991). Proeven op Nederlandse bodems met lage tot vrij lage fosfortoestand toonden aan dat met slechts 30 of vaak zelfs 10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha in de rij eenzelfde opbrengstverhoging voor maïs, suikerbiet, spruitkool prei, spinazie en bonen wordt verkregen als bij 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha vollevelsbemesting (de Ruijter *et al.*, 2009). Het is wel mogelijk dat bij lagere vollevelsbemesting (niet opgenomen in de proef) ook al een vergelijkbare opbrengst mogelijk is. De relatieve efficiëntie van rijenbemesting kan bijgevolg variëren tussen 1 en ≥20, sterk afhankelijk van de fosfortoestand van de bodem en de verhouding van het bemeste oppervlak met rijenbemesting ten opzichte van het totale oppervlak. De relatieve efficiëntie van rijenbemesting kan niet louter uit de reductie van het te bemesten oppervlak berekend worden omdat de concentratie van de meststof vaak ook verticaal gebeurt (niet over de volledige bouwvoor

ingeploegd en dus sterker geconcentreerd op een bepaalde afstand van het zaad of de plant). Theoretische beschouwingen en berekeningen zijn beschikbaar in Ehlert et al. (2002) en Smit et al. (2009).

In het Bemex-bemestingsadvies van de Bodemkundige Dienst van België wordt geadviseerd om in het geval van rijenbemesting van maïs slechts de helft van de geadviseerde dosis toe te passen. Bij vollevelsbemesting van de volledige geadviseerde dosis wordt extra startfosfor in de rij afgeraden. In Nederland wordt voor maïs standaard advies voor rijenbemesting gegeven (al dan niet met een vollevelsgift van 60-90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Voor gewassen in groep 0 (andijvie, augurk, bleekselderij, Chinese kool, consumptieraap, paksoi, pastinaak op zand, wortel op zand, peterselie, sla, snijbiet, spinazie, venkel en witlof op zand) wordt in Nederland bij lage fosfaattoestand van de bodem uitgegaan van bemestingsplaatsing (plaatsing zit al in het advies verwerkt). Voor hogere bodemfosfaattoestand wordt gesteld dat 50%-75% van het vollevelsadvies kan volstaan, met meer besparing mogelijk bij kortere groeiduur, ruimere rijenafstand, ondiepere beworteling, hogere fosfaatopname en lagere fosfaattoestand van de bodem (de Haan and van Geel, 2013). Op de website van het Nederlands Centrum voor de Ontwikkeling van Rijenbemesting staat als voorlopig bemestingsadvies vermeld dat bij aardappelen het vollevelsadvies kan gereduceerd worden tot 50% voor consumptie- en zetmeelaardappelen en tot 80% voor poot aardappelen. Ook voor uien wordt een aangepast advies gegeven.

### 32.3.9 Praktische implicaties

In Nederland zijn er plannen om precisiebemesting op te nemen in de bemestingsvoorschriften. Vanaf 2021 zou rijenbemesting zelfs verplicht worden voor de maïsteelt op zand- en lössgronden. Er zijn verschillende technieken om rijenbemesting toe te passen. Het is belangrijk om de techniek af te stemmen op het gewas. Zo is bijvoorbeeld bij proeven met kropsla opbrengstderving bij rijenbemesting waargenomen, wellicht door wortelschade veroorzaakt bij de meststoftoediening (Ehlert *et al.*, 2002). Ook per gewas zijn er nog verschillende technieken mogelijk. Bij aardappelen kan er bijvoorbeeld na planten (voor rijenfrozen) maar ook tijdens het planten in de rij bemest worden (De Blauwer *et al.*, 2013)

Rijenbemesting is niet alleen mogelijk met korrelmeststoffen en vloeibare meststoffen, maar ook met dierlijke mest. Bij rijenbemesting met drijfmest mag niet meer dan 35-40 m<sup>3</sup>/ha worden toegediend om te vermijden dat er drijfmest bovenop de bodem blijft. Het is mogelijk om een zaaimachine achter een mesttank te monteren (slechts één werkgang nodig). Een nadeel is de grotere kans op structuurschade. Met GPS is het mogelijk om eerst drijfmest als rijenbemesting toe te dienen en later te zaaien (van Dijk and van Geel, 2012). Bemestingsafstand

De afstand tussen het zaad of de plant en de geplaatste bemesting kan de opbrengst bepalen. Zo werd voor injectie met runderdrijfmest een toenemende maïsoopbrengst waargenomen bij kleinere afstand tussen de runderdrijfmest en de zaadrij (5, 10 of 15 cm afstand) (Bittman *et al.*, 2012). Het zaad komt best niet in de drijfmest terecht om een slechte opkomst te vermijden (van Dijk and van Geel, 2012). Bij voorkeur wordt drijfmest aan beide kanten van de zaairij op een afstand van 8-10 cm geïnjecteerd. Bijgevolg moet de machine goed afgesteld zijn en/of de GPS nauwkeurig werken. Bij kunstmest moet speciaal opgelet worden indien de kunstmest ammonium bevat. Ammoniumkunstmest mag niet te dicht bij de plant- of zaairij geplaatst worden om ammoniumtoxiciteit te vermijden (Sorensen, 2013).

## 32.4 EXTRA TOEDIENING ANDERE NUTRIËNTEN

Door het toedienen van andere nutriënten (voornamelijk N en K) kan de opbrengst van en de fosforopname door het gewas gemaximaliseerd worden. Hogere opbrengsten impliceren grotere fosforexport (bij afvoeren). Zo daalde de droge stofopbrengst van gras-klover na 3 jaar zonder K-bemesting naar slechts 50% van de opbrengst met K-bemesting (van Eekeren *et al.*, 2007). De fosforexport daalde wel niet proportioneel (slechts 30%) door het hoger fosforgehalte bij lagere opbrengst. Na zeven jaar was de P-afvoer met K-bemesting 238 kg P/ha, zonder K-bemesting 181 kg P/ha (Timmermans and van Eekeren, 2016). In een andere Nederlandse studie werd een terugval van de fosforafvoer door gras van 105 naar 14 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jaar na 7 jaar waargenomen zonder enige vorm van bemesting (Pegtel *et al.*, 1996).

De verminderde fosforexport bij niet bemesten (ook geen N en K) moet in rekening gebracht worden voor het berekenen van de fosforbodembalans, i.e. de fosforinput min de fosforexport (zie DWP 3.2). Een hogere fosforexport zal zorgen voor een minder positieve of een meer negatieve bodembalans. Hogere export door optimale nutriëntenvoorziening zorgt daardoor voor een snellere daling of minder snelle stijging van de fosforbeschikbaarheid dan bij weglaten van N- en K-bemesting. Gezien de gemiddelde grote fosforvoorraden in de Vlaamse bodems zullen verschillen in fosforexport op korte termijn de fosforbeschikbaarheid weinig beïnvloeden. Echter op langere termijn zal bij een optimale nutriëntenvoorziening de fosforbeschikbaarheid naar lagere waarden evolueren in vergelijking met suboptimale opbrengsten. Dit is van belang bij fosforuitmijning, waar het de bedoeling is om de fosforbeschikbaarheid in de bodem te verlagen in functie van natuurherstel en/of verlagen van fosforverliezen.

Enkele theoretische berekeningen staven dit: veronderstel een bouwvoor van 23 cm waar het gewas al zijn fosfor uit haalt. De fosforbeschikbaarheid gemeten met de AL-methode is 35 mg P/100 g (doorsnee waarde voor Vlaamse bodem). Gedurende 20 jaar wordt een gewas (bijvoorbeeld gras) geteeld dat onder ideale omstandigheden 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jaar exporteert. Daarvoor wordt het gewas bemest met N en K, maar niet met P (voldoende fosforbeschikbaarheid in de bodem). Veronderstel dat een deel van het perceel niet bemest wordt met N en K, waardoor de opbrengst elk jaar daalt en de fosforexport daardoor elk jaar 10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha afneemt en 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha wordt en blijft na 8 jaar. Er wordt een bodemdichtheid van 1,45 kg/l aangenomen en er wordt verondersteld dat het gewas 30% van zijn P-opname uit de P-AL fractie haalt (zie DWP 3.2) en deze P-AL-fosforfractie enkel wijzigt door plantopname (vereenvoudiging). Na 20 jaar zal de fosforbeschikbaarheid dan van 35 mg P/100 g gedaald zijn tot 27 mg P/100 g bij N- en K-bemesting en slechts tot 32 mg P/100 g zonder N- en K-bemesting.

Een grotere daling van de fosforbeschikbaarheid door een hogere fosforafvoer ten gevolge van extra bemesting met andere nutriënten zal uiteindelijk ook resulteren in minder fosforuitloging. In een veldstudie met twintig jaar fosforuitmijning onder grasland werd echter geen snellere daling van de fosforbeschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) in de tijd vastgesteld bij een extra voorziening van 50 kg N/ha/jaar ten opzichte van geen N-bemesting (McDowell *et al.*, 2016). Voor twee bodems uit Nieuw-Zeeland werd in een lysimeterstudie aangetoond dat de grasopbrengst toenam bij extra toediening van stikstof, en dat ook fosforverliezen gemiddeld met de helft daalden. Dit werd zowel vastgesteld voor een drastische fosforuitmijning (geen fosforbemesting) als voor een minder drastische fosforuitmijning (fosforbemesting gelijk aan de helft van de fosforexport). Ondanks een minder negatieve fosforbalans resulteerde de minder drastische fosforuitmijning in minder fosforuitloging dan

bij de drastische fosforuitmijning, vermoedelijk door het vastleggen van de fosforbemesting door biomassa (Dodd *et al.*, 2014).

Naar analogie met deze laatste studie werd in onze serreproef van DWP 1.3 vastgesteld dat een snelle P-uitmijning (+N behandeling) resulteerde in een daling van het %P-gehalte in het gras, waardoor ook de opbrengst en de P-uitmijningshoeveelheid daalt. Dit wijst op het belang van de groeisnelheid en P-vraag op de P-uitmijningshoeveelheid. Te snelle uitmijning kan dus zelfs op relatief P-rijke bodems een negatief effect hebben.

## 32.5 TOEPASSING FOSFORVASTLEGGENDE COMPONENTEN

Toevoegen van bodemverbeterende of andere middelen kan het totale fosforgehalte in de bodem niet doen dalen, maar kan wel de vastleggingscapaciteit van de bodem verhogen. Hierdoor kan fosfor beter vastgelegd worden door de bodem waardoor de verliezen gereduceerd worden. Het is hierbij belangrijk dat de verhoging van de vastleggingscapaciteit geen tijdelijk fenomeen is, omdat de verliezen anders gewoon uitgesteld worden in de tijd. Deze fosforvastleggende componenten kunnen ofwel rechtstreeks in de bodem ingewerkt worden, ofwel eerst gemengd worden met mest die daarna op de bodem wordt toegepast.

### 32.5.1 Biochar

Fosforverliezen vanuit drijfmest en kippenmest kunnen beperkt worden door het toevoegen van biochar aan de bodem of aan de mest (Condron *et al.*, 2013; Vandecasteele *et al.*, 2014). Een mogelijke verklaring voor deze observaties is dat fosfor wordt vastgelegd door calcium, aanwezig in biochar (Vandecasteele *et al.*, 2014). Het is echter onduidelijk of de effecten ook op veldschaal zullen waargenomen worden. Een voordeel van biochar ten opzichte van toevoeging van ijzer- en aluminiumhoudende componenten (zie hieronder) is dat bij biochar ook koolstof wordt toegevoegd, wat de fysische, chemische en biologische bodemkwaliteit ten goede komt.

### 32.5.2 Ijzer- of aluminiumhoudende componenten

Ijzer- of aluminiumhoudende componenten mengen met de bodem verhoogt de fosforvastleggingscapaciteit van de bodem. Deze componenten kunnen zuivere chemische producten zijn zoals  $AlCl_3$ , ijzer(hydr)oxide, aluminium- of ijzersulfaat... , maar ook mineralen (olivijn, biotiet,...) en restproducten zijn mogelijk (Chardon and Dorioz, 2010). Populaire producten zijn ijzerslib en ijzerzand, restproducten van waterbehandelingen.

Er zijn verschillende labotesten met dergelijke producten uitgevoerd. In de VS werd naast gips ook restproduct van waterbehandeling geselecteerd wegens het sterk verlagen van de waterextraheerbare fosforconcentratie (Callahan *et al.*, 2002). In Vlaanderen werden de grootste reducties in fosforconcentratie in percolerend water van een fosfaatverzadigde bodemkolom waargenomen bij mengen met olivijn, biotiet en ijzerslib (De Bolle, 2013).

Op veldschaal zijn er minder studies beschikbaar. In een Nederlandse veldproef kon toepassing van 0,2% ijzeroxide de fosforconcentratie in het bodemvocht van een sterk fosfaatverzadigde bodem met 65-95% doen dalen (Schoumans and Kruijne, 1995). In Nederland werden recent veldproeven aangelegd om de fosforbeschikbaarheid in natuurgebieden te verlagen met ijzerslib en ijzerkalkslib om natuurontwikkeling te promoten (Dorland *et al.*, 2017). De effecten van de toepassing op verschillende locaties waren wisselend, maar algemeen daalde de fosforbeschikbaarheid (Pw en FVG). Effecten op vegetatie blijven voorlopig nog uit. Er

werden geen nadelige effecten op de bodem vastgesteld. In Zwitserland werd op 2 proefvelden aangetoond dat het toevoegen van ijzeroxide ( $0,2\% \text{ FeSO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ) resulteerde in sterke reducties van de opgeloste fosforconcentratie (71-94%) en significante dalingen van de fosforverliezen via runoff (Schärer *et al.*, 2007). De wateroplosbare fosforconcentratie daalde met meer dan 60% in twee proefvelden in de VS na toevoeging van aluminiumgebaseerd waterbehandelingsrestproduct, en zelfs 7,5 jaar na toediening was de opgeloste en beschikbare fosforconcentratie in runoff en uitloging meer dan 50% lager (Agyin-Birikorang *et al.*, 2007). Ook op een andere locatie in de VS resulteerde toediening van aluminiumgebaseerd waterbehandelingsrestproduct in dalingen van de fosforconcentraties in runoff (Haustein *et al.*, 2000). In Nieuw-Zeeland daalde de fosforconcentratie in de bodemoplossing significant na toepassen van aluin (aluminiumsulfaten) met een dosis van 50 kg Al/ha (McDowell, 2015).



Figuur 153. Proefvlakken met ijzerslib en ijzerkalkslib in Nederlands natuurgebied (Dorland *et al.*, 2017)

In plaats van deze fosforvastleggende componenten rechtstreeks op de bodem toe te passen, kunnen ze ook eerst met mest gemengd worden. Zo werden substantiële reducties in fosforconcentraties in waterextracten en runoff (53-73%) geobserveerd na toevoegen van aluminiumchloride aan varkensdrijfmest voor bemesten (Smith *et al.*, 2004). Aluin reduceerde in verschillende studies de fosforconcentraties in waterextracten en runoff sterker dan andere materialen (vaak meer dan 80%) na toevoeging aan varkens-, kippen- of rundermest (Shreve *et al.*, 1996; Sistani *et al.*, 2006; Brennan *et al.*, 2012; O' Flynn *et al.*, 2012). Ook toevoeging van bauxiet aan kippen- of rundermest zou sterke dalingen van de wateroplosbare fosforconcentratie in mest (40-70%) en bodem (58-95%) veroorzaken (Wang).

Bij landbouwgebruik is het belangrijk dat toepassing van ijzer- of aluminiumcomponenten niet resulteert in een te lage fosforbeschikbaarheid voor de plant en bijgevolg gereduceerde gewasopbrengst. Het is daarom belangrijk een zodanige dosis toe te passen zodat de fosforbeschikbaarheid van (zeer) hoog daalt naar de streefzone (zie luik 2) waarbij opbrengsten nog optimaal zijn en fosforverliezen gereduceerd worden. Volgens een potproef zouden bij de in de praktijk waarschijnlijk maximaal benodigde hoeveelheid ijzerhydroxide ( $0,2\% \text{ Fe}$ ) geen opbrengstverliezen optreden (Schoumans and Kruijne, 1995). Toepassing van aluin, toegevoegd aan

kippenmest, had geen negatieve impact op de opbrengst en fosforopname door het gewas in vergelijking met kippenmest zonder aluin ondanks de grote verschillen in de wateroplosbare fosforconcentratie (Sistani *et al.*, 2006), zelfs indien deze toediening al 4 jaar toegepast werd (Warren *et al.*, 2006).

Momenteel is geen van bovenstaande producten opgenomen in Bijlage 1 van het Koninklijk besluit van 28 januari 2013 betreffende het in de handel brengen en het gebruiken van meststoffen, bodemverbeterende middelen en teeltsubstraten (Anonymous, 2013a). Om fosforvastleggende componenten onder deze categorieën te laten vallen, moet eerst een aanvraag tot ontheffing ingediend worden bij de Federale overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu. Indien het product een afvalstof is, moet daarvoor bij OVAM ook nog een statuut van secundaire grondstof aangevraagd worden. In Nederland kan toepassing mits akkoord van de gemeente of het waterschap (Dorland *et al.*, 2017).

Het is belangrijk dat de componenten veilig kunnen toegepast worden. Het gehalte aan zware metalen in het ijzerzand en ijzerslib (restproduct waterbehandeling) zou lager zijn dan de Nederlandse normen, met uitzondering van cadmium (Koopmans *et al.*, 2010). In ander Nederlands onderzoek van drinkwaterslibben had minder dan 1% van de jaarlijks beschikbare volumes een te hoog gehalte aan zware metalen (Dorland *et al.*, 2017). Er is vaak terughoudendheid om aluminiumbevattende stoffen aan de bodem toe te dienen, uit schrik voor aluminiumtoxiciteit die kan optreden indien aluminium vrijkomt bij lage bodem-pH. Ijzerbevattende componenten hebben het nadeel dat ijzer gereduceerd kan worden bij zuurstoftekort en daarbij de vastgelegde fosfor terug kan vrijgeven.

Verder zouden ook bepaalde producten die geen ijzer of aluminium bevatten, de fosforvastleggingscapaciteit van de bodem kunnen verhogen: vlieggas (King *et al.*, 2016), gips (Ekholm *et al.*, 2012) en kalk (zie verder).

De fosforvastleggende componenten kunnen tot slot ook verder in de transferketen van landbouwbodem naar oppervlaktewater ingezet worden. Zo kunnen ze fosfor vastleggen rond en in drainagebuizen, in spuiwater, in greppels, grachten en sloten. In Vlaanderen loopt momenteel een studie waarin ijzerzandfilters gebruikt worden om drainagewater te filteren (Vandermoere and De Neve, 2016). Omdat deze literatuurstudie focust op bodemmaatregelen, worden deze studies over vastlegging na verlies uit bodem, hier niet behandeld.

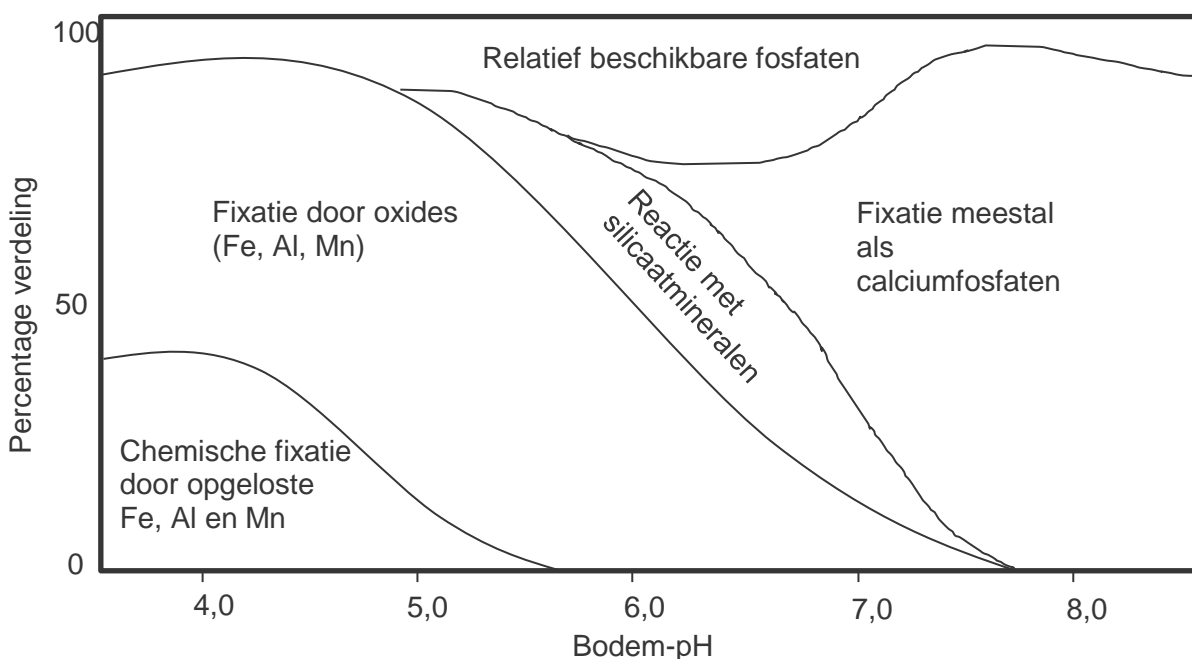
## 32.6 BEKALKEN

### 32.6.1 Theoretische verandering fosforbeschikbaarheid bij pH-verandering

De fosforbeschikbaarheid in een gegeven bodem is theoretisch het hoogst in het pH-traject 5,5 – 6,5 (Figuur 154). Bij meer zure of meer basische pH wordt fosfaat meer gefixeerd door respectievelijk ijzer en aluminium, of door Ca, en is de beschikbaarheid dus lager (Sharpley and Rekolainen, 1997). Bij een lage pH (<5,5) kan de fosforbeschikbaarheid verhoogd worden door bekalken, zonder fosforbemesting toe te passen. Zo wordt de bodemeigen fosfor gebruikt om eventuele suboptimale opbrengstcijfers te verhogen. Een mogelijk neveneffect is de toename van de fosforbeschikbaarheid voor fosforverliezen. Indien de bodem-pH reeds in het streeftraject van 5,5 – 6,5 ligt, kan bekalken de fosforbeschikbaarheid en de fosforverliezen eventueel doen afnemen. Verhogen van de pH kan ook bekomen worden door composttoediening.

Gezien de vele mogelijke pH-gerelateerde processen, is het effect van pH-verhoging/bekalking niet altijd eenduidig te voorspellen. Toedienen van kalk kan de mineralisatie bevorderen en zo fosfor vrijmaken (Sharpley and Rekolainen, 1997). Ijzer- en aluminiumfosfaten zijn bovendien beter oplosbaar bij hogere pH (Figuur 154),

zodat bij pH-verhoging de fosforbeschikbaarheid kan verhogen in bodems met ijzer- en aluminiumfosfaten. Indien veel aluminium aanwezig is in de bodem, kan de vorming van fosforsorberende aluminiumneerslagen bij bekalking de fosforbeschikbaarheid dan weer doen dalen (Haynes, 1982). Calciumfosfaten zijn minder goed oplosbaar bij hogere pH (Figuur 154). Daarnaast kunnen toegevoegde calciumionen samen met kleimineralen fosfaat gaan sorberen. Toediening van calcium via bekalking of Ca-houdende producten (oa compost) kan dus de fosforbeschikbaarheid doen dalen. Proeven met toediening van kalk en gips aan bodems wezen op vooral een Ca-effect (vastlegging) en geen of zelfs tegengesteld pH-effect, omdat bekalking tot pH 6,5 niet altijd resulteerde in een daling van de fosforbeschikbaarheid en toediening met gips wel (Murphy and Stevens, 2010).



Figuur 154. Verdeling van de aanwezige fosfaten in de bodem over de verschillende vormen in relatie tot de bodem-pH (naar (Anonymous, 2013c)).

### 32.6.2 Veranderingen fosforbeschikbaarheid in veldomstandigheden

Het netto-effect van de bovenvermelde processen is afhankelijk van bodemeigenschappen als de uitgangspH, de fosfaattoestand, het klei- en het oxidegehalte (de Boer, 2008). Daarom worden er in de literatuur zowel afnames als toenames van de fosforbeschikbaarheid geobserveerd wanneer bodems bekalkt worden (Kirkby and Johnston, 2008; Syers *et al.*, 2008). Zo werd bijvoorbeeld in experimenten met graslandbodems (pH 4,3-5,4) een toename in de uitwisselbare P en de grasopbrengst na bekalken waargenomen (Holford and Crocker, 1994; Holford *et al.*, 1994). Wellicht was het oplossen van de ijzer- en aluminiumfosfaten of minder sterke fosforsorptie bij hogere pH hier het dominante proces. In andere veldexperimenten (pH-water 5,1-5,5) werden beperkte afnames in de P-beschikbaarheid na bekalken gevonden, vermoedelijk eerder door hogere bodemcalciumgehalten na bekalken dan door pH-verhoging (Curtin and Syers, 2001). De auteurs concluderen dat in bodems met reeds veel divalente kationen (Ca, Mg), het effect van bekalken op fosforbeschikbaarheid



mogelijk zeer beperkt is. Zevenentwintig tot 30 jaar na bekalking van een bodem in Canada was de pH in het bekalkte deel nog steeds hoger dan in het onbekalkte deel, maar werden geen verschillen in P-beschikbaarheid geobserveerd (Beckie and Ukrainetz, 1996). Er zijn nog een heleboel andere literatuurvoorbeelden met tegengestelde bekalkingsresultaten te vinden (Haynes, 1982; Kirkby and Johnston, 2008; Syers *et al.*, 2008). Bekalken is bijgevolg geen goede generieke maatregel om de fosfaatbeschikbaarheid te verhogen (voor opbrengst) of te verlagen (voor minder verliezen). Er wordt aangeraden om de specifieke omstandigheden eerst goed te analyseren alvorens tot bekalking over te gaan. Om ongewenste effecten te beperken wordt aangeraden om geen grote kalkgiften maar regelmatig kleine giften toe te dienen.

### 32.6.3 Bekalken om fosforverliezen te beperken

Toepassing van CaO op bodemlysimeters deed de particuliere fosforverliezen in twee Zweedse kleibodems (reeds pH-water 6,6-6,8) significant dalen (49%-51%), voor een zandbodem (reeds pH-water 7,6) daalden de opgeloste fosforconcentraties niet significant na bekalking (Andersson *et al.*, 2016). Ook in Zweedse veldstudies met kleibodems werd minder particulier fosforverlies waargenomen na bekalking, vooral bij hogere fosforstatus van de bodem (Ulen and Etana, 2014). Voor twee Finse kleibodems (pH rond 6) bleef de fosforbeschikbaarheid (gemeten met ammoniumacetaat bij pH 4,65) en pH ongeveer gelijk bij toepassing van kalk of gips (CaSO<sub>4</sub>). De fosforverliezen daalden wel sterk bij gipstoediening maar niet bij bekalking (Uusitalo *et al.*, 2012). Voor vijf Ierse graslandbodems (pH 5,3-6,0) daalde de waterextraheerbare fosforhoeveelheid bij toediening van gips, terwijl het effect van bekalking (tot pH 6,5) wisselend was (Murphy and Stevens, 2010).

### 32.6.4 Effect van bodem-pH op de kritische fosforbeschikbaarheid voor gewassen

Bij de analyse van de langetermijnsfosforbestedingsproeven van BDB (beschrijving in DWP 2.1) werd de kritische P-AL voor gewasopbrengst (P-AL<sub>krit</sub>, gerelateerd aan 95% relatieve opbrengst) voor alle gewassen samen en de gewassen apart bepaald. Aangezien niet alle proeven op percelen met een gunstige bodem-pH werden aangelegd, is vergelijking mogelijk van P-AL<sub>krit</sub> tussen de groepen met een gunstige en ongunstige bodem-pH. Een gunstige bodem-pH werd gedefinieerd als deze in de BDB-classes 'tamelijk laag', 'streefzone' en 'tamelijke hoog', met verschillende waarden voor akkers en weilanden en per textuur (Tabel 132).

Tabel 132. Interval voor pH-KCl waarbinnen bodem-pH als gunstig wordt beschouwd (BDB-klasse 'tamelijk laag', 'streefzone' en 'tamelijk hoog'), afhankelijk van perceelsgebruik en textuurklasse (Tits *et al.*, 2016)

Bodemgebruik/textuurklasse	Zand	Zandleem	Leem	Polders
Akkers	4,6-6,2	5,6-6,9	6,1-7,7	6,5-7,9
Weilanden	4,8-5,9	5,2-6,5	5,2-6,5	5,4-6,8

Er werd vastgesteld dat P-AL<sub>krit</sub> hoger was voor de groep met ongunstige bodem-pH (135 mg P/kg) dan voor de groep met gunstige bodem-pH (135 mg P/kg). Bij eenzelfde P-AL kan het dus van de pH afhangen of de plant een fosfortekort waarneemt of niet. Optimaliseren van de bodem-pH kan dan een snellere en efficiëntere maatregel zijn dan extra fosforbesteding.

### 32.6.5 Nut van bekalking voor Vlaamse bodems

Gemiddeld hebben Vlaamse bodems een tamelijk lage pH en tamelijk laag calciumgehalte (Tits *et al.*, 2016). Het pH-probleem is extra uitgesproken bij de percelen met laag fosforgehalte (Tabel 133). Extra bekalking kan dus voor veel Vlaamse bodems een verbetering teweeg brengen voor benutting van nutriënten, bodemstructuur, bodemleven, etcetera. Let wel: de getallen in Tabel 133 zijn samengesteld op basis van data uit staalnames die vaak door landbouwers 1 keer aan het begin van elke rotatie-cyclus gevraagd worden om de grootte van de nood naar bekalking na te gaan. Vaak was er dus al een bekalking gepland, waardoor deze cijfers de nood naar bekalking toe in Vlaanderen misschien wat overschatten.

Uit bovenstaande informatie is af te leiden dat het effect van bekalking op de fosforbeschikbaarheid voor gewas en uitloging wisselend is en sterk afhankelijk van de startsituatie. Mogelijk bekalkingsadvies wordt samengevat in Tabel 134, afhankelijk van de fosfor- en pH-situatie. Onderliggende gedachte is om zowel voor pH als voor fosforbeschikbaarheid naar de streefzone te evolueren of erin te blijven. Gezien het P-vastleggend effect van calcium (zie hoger), is het gebruik van Ca-rijke kalk te verkiezen boven Mg-rijke kalk. In situaties met hoge fosforbeschikbaarheid wordt soms geopteerd voor  $\text{CaSO}_4$  in plaats van bekalking omdat deze een duidelijker bewezen effect van daling van de fosforbeschikbaarheid heeft dan bekalking (zie hoger). De groep van percelen met lage pH en hoge P-beschikbaarheid is het sterkst vertegenwoordigd in Vlaanderen (Tabel 133).

Ook met composttoepassing kan de pH van de bodem verhoogd worden. Dit is een mogelijkheid die zeker bij laag organisch stofgehalte van de bodem overwogen kan worden. Er dient wel rekening gehouden te worden met het fosforgehalte in de compost. Zeker bij bodems met een fosforgehalte boven de streefzone, kan compost dan beter als vervanging van andere fosforbemesting in plaats van extra toediening bovenop de fosforbemesting toegepast worden. De beschikbaarheid van fosfor in compost voor uitloging is daarenboven kleiner dan voor andere organische mestvormen (Vanden Nest *et al.*, 2014).

Tabel 133. Procentuele verdeling van de akker- en weilandstalen van de Bodemkundige Dienst van België in de klassen onder ('laag'), in en boven ('hoog') de streefzone voor P en pH-KCl in Vlaanderen (2012-2015) (Tits et al., 2016) (Mia Tits, BDB, persoonlijke communicatie)

AKKER		pH		
P	Laag	Streefzone	Hoog	Totaal
Laag	3,3	0,9	0,4	4,7
Streefzone	9,6	4,7	1,4	15,7
Hoog	36,4	28,3	14,9	79,6
Totaal	49,3	33,9	16,8	100,0

WEILAND		pH		
P	Laag	Streefzone	Hoog	Totaal
Laag	9,2	7,3	4,0	20,5
Streefzone	6,7	8,6	5,2	20,5
Hoog	12,6	24,3	22,1	58,9
Totaal	28,5	40,2	31,3	100,0

Tabel 134. Advies voor bekalking afhankelijk van de bodem-pH en de fosforbeschikbaarheid in de bodem

pH	Laag	Streefzone	Hoog
<b>P-beschikbaarheid</b>			
Laag	Bekalken (extra), compost	Onderhoudsbekalking <sup>§</sup> , compost	/
Streefzone	Bekalken (extra), compost <sup>a</sup>	Onderhoudsbekalking*, compost <sup>a</sup>	/
Hoog	CaSO <sub>4</sub> + bekalking*	CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub> <sup>o</sup>

§: opgelet bij hoog uitwisselbaar aluminiumgehalte (fosforbeschikbaarheid kan dalen)

<sup>a</sup>: Vooral bij laag organisch stofgehalte. Beperk de P-toediening met compost zodat de P-beschikbaarheid niet verder toeneemt

\*: opgelet bij hoog organisch stofgehalte (fosforbeschikbaarheid kan toenemen bij bekalking)

<sup>o</sup>: opgelet bij hoog Ca-gehalte of Ca/Mg-gehalte ≤ 50 (akkers) of ≤ 30 (weilanden) (Tits *et al.*, 2016)

## 32.7 BEMESTINGSTYPE

### 32.7.1 Fosfor in bemesting

Fosfor kan toegediend worden via kunstmest, als korrel of als vloeistof. Het is beschikbaar als enkelvoudige ((super)tripelfosfaat) of als samengestelde meststof. Over het algemeen is fosforkunstmest goed oplosbaar. Het opgegeven fosforgehalte is niet de totale fosforinhoud maar het extraheerbaar fosforgehalte. Het gebruikte extractiemiddel is afhankelijk van het type meststof en kan zijn: water, alkalisch ammoniumcitraat (volgens Joulie of volgens Petermann), neutraal ammoniumcitraat, 2% citroenzuur, 2% mierenzuur of minerale zuren (Anonymous, 2013b). Zo wordt voor vloeibare kunstmest niet alle P geëxtraheerd met water en citroenzuur (Kratz *et al.*, 2010). Voor andere P-producten is dit nog meer uitgesproken en ook het geval bij sterkere extractiemiddelen. Bovendien is het weergegeven fosforgehalte het *minimaal* aanwezig P-gehalte (EU-wetgeving). In werkelijkheid kan het P-gehalte hoger zijn.

In het verleden werden in Vlaanderen vaak metaalslakken toegepast als bron van P. Slakkenmeel is tot poeder gemalen slakken, een nevenproduct van de staalproductie (Thomas-procédé dat momenteel nog weinig wordt toegepast). Het bestaat vooral uit calcium-, silicium- en ijzeroxide en bevat variabele hoeveelheden fosfor (tot 20%).

In dierlijke mest is ook fosfor aanwezig. De samenstelling kan bepaald worden na destructie van het meststaal of zijn asrest met zwavel- en/of salpeterzuur (Coppens *et al.* (2009), BAM-compendium voor Vlaanderen). Uit de VLM-richtwaarden (Tabel 135) is duidelijk dat varkensmest meer P bevat dan rundermest. Kippenmest bevat het meeste fosfor. Volgens de gemiddelde Vlaco-samenstelling ligt GFT-compost (7 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ton) in de lijn met vaste varkensmest en groencompost (2,8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ton) met vaste rundermest. De dikke, vaste fractie van gescheiden drijfmest heeft een hoog gehalte aan fosfor en organische stof, het de dunne fractie van gescheiden drijfmest heeft een laag fosforgehalte. Voor varkensdrijfmest komt 70-95% van de fosfor terecht in de dikke fractie en 5-30% in de dunne fractie (Schoumans *et al.*, 2010).

Ondanks het voorkomen van veel koolstof en organische stof in dierlijke en andere mest, komt fosfor in grote mate onder anorganische (niet organische) vorm voor (Gagnon *et al.*, 2012). Zestig tot 95% van de fosfor komt in anorganische mineralen voor als struviet (MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O), magnesium- en calciumfosfaten. In stalmeest en compost komen ook de minder oplosbare apatietmineralen voor (van Dam and Ehlert, 2008). De overige 5-40% van de fosfor in organische bemesting betreft organische fosfor, waarvan het grootste deel gemakkelijk mineraliseerbaar is (Dekker and Postma, 2008). Indien dierlijke mest gedurende enkele maanden bewaard wordt, vergroot de anorganische fosforfractie door microbiële degradatie van organische fosforcomponenten (Haygarth and Jarvis, 1999).

Gelijk onder welke vorm P wordt toegediend aan de bodem (via kunstmest, dierlijke of andere mest), zal de totale P-inhoud in de bodem op dezelfde manier verhoogd worden. Fosfor in de bodem wordt echter meestal via een beschikbaarheidstest bepaald (zie luik 1), en de fosforbeschikbaarheid kan wel verschillen tussen mestsoorten, en naargelang de gebruikte fosforbeschikbaarheidstest. De beschikbaarheid van fosfor uit verschillende mestsoorten wordt behandeld in 32.7.2 (korte termijn) en 32.7.3 (lange termijn) voor planten, en in 32.7.4 voor fosforverliezen.

Tabel 135. Richtwaarden voor de samenstelling van dierlijke mest (bron: VLM)

Mestcode <sup>1</sup>	Diersoort	Vorm <sup>2</sup>	N (kg/ton)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ton)	Dichtheid (ton/m <sup>3</sup> )
<b>Runderen</b>					
1	Runderen	G	4,0	0,2	1,0
2	Runderen	M	4,8	1,4	1,0
3	Runderen	V	7,1	2,9	0,8
4	Mestkalveren	M	3,0	1,3	1,0
<b>Varkens</b>					
8	Zeugen en biggen	G	2,0	0,9	1,0
9	Zeugen en biggen	M	3,2	1,4	1,0
10	Zeugen en biggen	V	7,5	9,0	0,8
11	Vleesvarkens	G	5,8	0,9	1,0
12	Vleesvarkens	M	6,4	3,5	1,0
13	Vleesvarkens	V	7,5	9,0	0,8
499	Biggen van 7 tot 20 kg	M	4,3	1,7	1,0
<b>Pluimvee</b>					
690	Slachtkuikens	V	27,1	14,1	0,5
691	Leghen kool – rechtstreekse mestafvoer	VV	22,7	14,3	0,8
692	Leghen kool – mestopslag in loods	VV	26,9	21,3	0,8
693	Leghen kool – mestopslag in loods + droging	VD	31,5	28,5	0,6
694	Leghen scharrel of volière	V	19,8	27,4	0,5
695	Leghen ouderdier	V	19,8	27,4	0,5
696	Opfok leghen kool	VV	23,6	14,6	0,8
697	Opfok leghen scharrel of volière	V	25	24,4	0,5
698	Opfok slachtkuikenouderdieren	V	19,8	26,2	0,5
699	Slachtkuikenouderdieren	VD	20,9	31,8	0,6
22	Ander pluimvee	V	17,4	19,3	0,5
23	Eenden	V	11,0	14,0	0,8
<b>Anderen diersoorten</b>					
24	Schape	V	8,3	3,5	0,8
25	Paarden	G	4,0	0,2	1,0
26	Paarden	V	5,0	3,0	0,7
27	Geiten	V	6,6	3,5	0,8
28	Nertsen	V	14,1	25,3	0,6
29	Nertsen	G	2,0	0,2	1,0
30	Konijnen	G	1,4	0,0	1,0
31	Konijnen	M	8,5	13,5	1,0
32	Konijnen	V	16,9	13,8	0,8
33	Konijnen in draagststal	V	13,4	12,7	0,7
<b>Overige</b>					
172	Champost	V	6,3	4,0	0,7

<sup>1</sup> code voor het invullen van de mestsoort op een mestafzetdocument via MTIL

<sup>2</sup> M: mengmest, G: gier, V: vaste mest, VV: vochtige, vaste mest, VD: vaste, gedroogde mest

## 32.7.2 Verschillen in bemestende waarde op korte termijn

### 32.7.2.1 Algemene principes

Aangezien fosfor in dierlijke en andere mest soms in minder beschikbare vorm voorkomt dan in kunstmest (zie 32.7.1), kan de bemestende waarde van organische mest op korte termijn soms lager liggen in vergelijking met kunstmest. Dit kan nagegaan worden met bemestingsproeven waarbij de opbrengst of fosforopname door een gewas vergeleken wordt tussen goed oplosbare fosforkunstmest (zoals tripel superfosfaat) en andere meststoffen. Het is belangrijk dat bij de experimenten met voldoende N en K wordt bemest om louter verschillen gecreëerd door P beschikbaarheid waar te nemen. Ook is het noodzakelijk om minstens twee bemestingsdosissen (inclusief blanco) van de referentiemeststof mee te nemen, en er moet daarbij een respons van het gewas bij deze bemestingsdosissen waargenomen worden. Indien de fosforbeschikbaarheid van de bodem zelf reeds te hoog is, kan er geen respons worden vastgesteld en is het niet mogelijk om de meststoffen te vergelijken. Het 'kunstmestequivalent' (KME, naar 'Mineral fertilizer equivalent' uit de literatuur) wordt dan afgeleid uit de curve van biomassa of fosforopname versus kunstmestdosis. Voor biomassa kan deze curve veelal beschreven worden met een Mitscherlichcurve of equivalente vergelijking, vandaar de voorkeur voor studies met meer dan twee kunstmestdosissen (Foereid, 2017). Als de biomassa of fosforopname van het gewas bij dezelfde P-dosis dezelfde is voor kunstmest als voor de andere meststof, dan is de KME 100%. Is de biomassa of fosforopname van de andere meststof bij dezelfde dosis slechts gelijk aan de biomassa of fosforopname van de kunstmest bij 60% van de dosis, dan is KME 60%. Deze waarden worden uit de literatuur gehaald en uit proeven uitgevoerd bij ILVO (Thijs Vanden Nest).

### 32.7.2.2 KME voor verschillende mestsoorten

Er zijn veel verschillende studies die de bemestende waarde van verschillende meststoffen hebben bestudeerd. Daarbij worden bodems met sterk uiteenlopende eigenschappen gebruikt, wat vergelijken moeilijk maakt. Zo kunnen sommige meststoffen bij lage pH beter beschikbaar zijn dan bij hoge pH of omgekeerd. Ook kan de maat van fosfortekort in de bodem voor het gewas een invloed hebben op de respons op meststof. Hieronder wordt toch een poging gedaan om voor verschillende types mestsoorten een (range van) KME af te leiden. Belangrijk is om deze enkel bij korte termijn beschouwingen te gebruiken, i.e. voor maximaal één groeiseizoen. Het is duidelijk dat de KME in de tijd kan toenemen voor meststoffen die P trager vrijgeven dan goed oplosbare kunstmest (Yusiharni *et al.*, 2007; Ogaard and Brod, 2016). De bemestende waarde van meststoffen in vergelijking met goed oplosbare kunstmest bij bemesting gedurende langere periodes, wordt afgeleid in 32.7.3.

De KME-cijfers voor korte termijn (Tabel 101) die hieronder afgeleid worden, kunnen dan gebruikt worden om het bemestingsadvies op korte termijn, dat geldt voor goed oplosbare kunstmest (zie DWP 3.3), te herberekenen bij gebruik van andere mestsoorten:

(Advies andere meststof) = (advies TSP) / KME

Is de KME bijvoorbeeld 60% en het advies 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha voor goed oplosbare kunstmest, dan is het herberekende advies 83 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Aanpassingen van het bemestingsadvies op lange termijn, bedoeld om de streefzone voor fosforbeschikbaarheid te bereiken, worden besproken in 32.7.3.

Bij voorkeur wordt gebruik gemaakt van KME afgeleid uit opbrengstcijfers (KME<sub>o</sub>), omdat verschillen in opbrengst beoogd worden bij bemesten. Alternatief kan gebruik gemaakt worden van KME afgeleid uit fosforopnamecijfers (KME<sub>Fo</sub>).

Tabel 136. Afgeleide algemene KME-waarden (kunstmestequivalent, bemestende waarde op korte termijn) voor verschillende bemestingsproducten

Mesttype	KME (%)
Struviet	70 (hoge bodem-pH) tot 100 (lage bodem-pH)
Slakkenmeel	50
Rotsfosfaat en hydroxyapatiet	20
Dierlijke mest	90
Compost	50
Digestaat	60 (gedroogd) – 90 (ruw)
Afvalwaterslib	30
Slachtafval	Variabel
Assen	Variabel
Biochar	60

#### 32.7.2.2.1 Struviet

Struviet, oftewel  $\text{NH}_4\text{MgPO}_4$ , wordt meer en meer teruggewonnen uit afvalstoffen als mest en afvalwater. Voor struviet worden eerder hoge KME afgeleid, zoals een  $\text{KME}_O$  van 76% en een  $\text{KME}_{FO}$  van 72% voor gras op een brunisol (Achat *et al.*, 2014). Cabeza *et al.* (2011) vonden  $\text{KME}_{FO}$ -waarden van 72%, 120% en 82% van drie verschillende struvietproducten van afvalwaterslib voor maïs op een zure zandbodem. Dezelfde producten hadden  $\text{KME}_{FO}$ -waarden van 92%, 92% en 96% op een leembodem. De  $\text{KME}_O$  en  $\text{KME}_{FO}$  van struviet in de studie van Tallboys *et al.* (2016) benaderden zelfs 100%, terwijl ook cijfers lager dan 50% mogelijk zijn (Ackerman *et al.*, 2013). In een studie met rogge werd een hogere opbrengst met struviet- in vergelijking met superfosfaatbemesting waargenomen (Duboc *et al.*, 2017). Voor gras op een zandleembodem werd voor één struviet een  $\text{KME}_O$  berekend van 53%, voor een andere struviet was die meer dan 100% (Vanden Nest *et al.*, niet gepubliceerde data). Bekomen cijfers hangen af van de gebruikte bodem, aangezien struviet beter oplost en bijgevolg beschikbaar wordt in meer zure bodems (Ackerman *et al.*, 2013). De KME van struviet zal, wegens het langzamer oplossen van struviet ten opzichte van goed oplosbare kunstmest als tripelsuperfosfaat, ook toenemen in de tijd (zie hoger). Afhankelijk van de bodem-pH wordt bijgevolg een KME van struviet van 70%-100% naar voor geschoven.

#### 32.7.2.2.2 Andere neerslagproducten

Naast struviet kunnen er ook andere neerslagproducten uit afvalstromen gevormd worden en als fosforkunstmest toegepast worden. Bij lage bodem-pH (4,7) bleek de  $\text{KME}_{FO}$  van een calciumfosfaat uit afvalwater gelijkaardig (90%) als die van struviet, maar veel lager (28%) bij hogere bodem-pH (6,6) (Cabeza *et al.*, 2011). Calciumfosfaatneerslagen kunnen beter oplossen en beschikbaar worden bij lage pH. De  $\text{KME}_{FO}$  van

dicalciumfosfaat voor raaigras bij een bodem-pH van 4,5 was 65% (Yusiharni *et al.*, 2007). Voor neerslagproducten uit mest wordt verwezen naar 32.7.2.2.6.2.

### 32.7.2.2.3 Slakkenmeel

Vroeger werd soms slakkenmeel als fosfaatmeststof of bekalking op de Vlaamse landbouwbodems toegepast. Slakkenmeel is tot poeder gemalen slakken, een nevenproduct van de staalproductie (Thomas-procédé dat momenteel nog weinig wordt toegepast). Proeven uitgevoerd in het begin van vorige eeuw met verschillende akkerbouwgewassen wezen op een  $KME_O$  van slakkenmeel van gemiddeld 50% (Van der Pauw, 1937). Voor gras op verschillende bodems was dit gemiddeld 74% voor de eerste en 57% voor de tweede snede. Andere proeven wezen op een  $KME_O$  voor gras van slechts 8%, 9%, 16% en 10% voor de eerste vier snedes (Yusiharni *et al.*, 2007). Door de grote verschillen in slakkenmeel is het moeilijk een algemene waarde af te leiden. Bij afwezigheid van mogelijkheid tot beschikbaarheidstesten (zie 32.7.2.3) wordt een KME van 50% voor slakkenmeel voorgesteld.

### 32.7.2.2.4 Rotsfosfaat en hydroxyapatiet

Kunstmest wordt over het algemeen gewonnen uit rotsfosfaat. Rotsfosfaat zelf is wel toegestaan in de biologische landbouw maar P is minder beschikbaar dan bij goed oplosbare kunstmest voor de plant. Dit blijkt uit  $KME_O$  cijfers van 8% (bodem-pH 5,3) en zelfs -1% (bodem-pH 6,8) (Foereid, 2017) en 29% (Yusiharni *et al.*, 2007) en  $KME_{FO}$ -cijfers van 5% en 45% (Cabeza *et al.*, 2011). In een studie met rogge was de opbrengst met rotsfosfaat statistisch significant kleiner dan deze met superfosfaat, en niet significant verschillend van de behandeling zonder fosforbemesting (Duboc *et al.*, 2017). Hydroxyapatiet is een fosfaatmineraal ( $Ca_5(PO_4)_3OH$ ) dat meestal deel uitmaakt van rotsfosfaat. Door de kristallijne vorm en de aanwezigheid van calcium worden ook voor hydroxyapatiet een lage  $KME_O$  (24%) en  $KME_{FO}$  (21%) gerapporteerd (Achat *et al.*, 2014). Er wordt een KME van 20% voorgesteld voor rotsfosfaat.

### 32.7.2.2.5 Dierlijke mest

De werkzaamheid van P in dierlijke mest wordt voor advisering in Vlaanderen en Nederland lager dan 100% aangenomen (Tabel 137), maar deze is (althans voor Vlaanderen) gebaseerd op de extraheerbaarheid in neutraal ammoniumcitraat relatief ten opzichte van TSP (labo-extracties), en dus niet op basis van gewasproeven (Gino Coppens van BDB, persoonlijke communicatie). In een review over de bemestende waarde van P in dierlijke mest met behulp van gewasproeven werd geconcludeerd dat op korte termijn de P-werking soms kleiner is dan deze van kunstmest, maar op lange termijn gelijk (Smith and van Dijk, 1987). De werkzaamheid van P in runderdrijfmest, varkensmest, kippenmest en slachtkuikenmest was gelijkaardig als deze van superfosfaat in een Nederlandse potproef met haver (Prummel and Sissingh, 1983). Ook in een potproef met rogge was de opbrengst met kippenmest gelijk aan de opbrengst met superfosfaat (Duboc *et al.*, 2017). Delin (2016) rapporteerde  $KME_O$ -waarden van 64% voor kippenmest, 59% voor runderdrijfmest en 69% voor nertsenmest bekomen uit een potproef met raaigras. Een veldproef met tarwe wees op een  $KME_O$  van 50% en een  $KME_{FO}$  van 100% voor kippenmest. In een potproef met gras (4 snedes) werden  $KME_O$ -waarden van 93% en 100% berekend voor runderdrijfmest en 96% en 95% voor kippenmest voor een bodem met pH 5,5 en pH 6,9 respectievelijk (Brod *et al.*, 2015a). Voor varkensmest werd in een potproef op een leembodem met pH 5,3 een  $KME_O$ -waarde van 160% geobserveerd voor tarwe en 167% voor soja (Li *et al.*, 2012). Voor gras op een zandleembodem werden  $KME_O$ -waardes berekend van 41% en meer dan 100% voor runderdrijfmest, meer dan 100% voor twee



varkensdrijfmesten en 73% voor gedroogde kippenmest (Vanden Nest et al., niet gepubliceerde data). Er wordt een algemene KME van 90% voorgesteld voor dierlijke mest.

Tabel 137. Aangenomen fosfaatwerking van organische meststoffen bij éénjarige toepassing volgens BDB en advies in Nederland (Bomans et al., 2005; van Dijk and van Geel, 2012). Voor BDB zijn deze waarden gebaseerd obv extractie met NAC

Type organische meststof	Fosfaatwerking eerste jaar (% ten opzichte van kunstmest)	
	BDB	Nederland
Runderdrijfmest	70	60
Varkensdrijfmest	90	100
Kippenmest	70	70
Varkensstalmest	60	100
Runderstalmest	60	60

### 32.7.2.2.6 Verwerkte producten van dierlijke mest

#### 32.7.2.2.6.1 Gescheiden mest

De droge vaste fractie van varkensdrijfmest vertoonde een  $KME_0$  van 64% en  $KME_{FO}$  van 82% in een veldproef met gerst (Kuligowski *et al.*, 2010). Een potproef met gras op een zandleembodem resulteerde in een  $KME_0$  van 87% tot meer dan 100% voor de dunne fractie van varkensdrijfmest en 66% tot meer dan 100% voor de dikke fractie van varkensdrijfmest (Vanden Nest et al., niet gepubliceerde data). De KME-waarden voor gescheiden mest liggen dus in de buurt van deze voor ruwe mest (zie 32.7.2.2.5).

#### 32.7.2.2.6.2 Neerslagproducten uit dierlijke mest

Recyclageproducten uit dierlijke mest bekomen met precipitatie hebben veelal hoge KME-waarden. Verschillende recyclageproducten bekomen met precipitatie uit effluent van rundermest of uit varkensdrijfmest hadden  $KME_0$ -waarden tussen 60% en 112% en  $KME_{FO}$ -waarden tussen 80% en 107% voor een potproef met gras op een bodem met pH 6,5 (Achat *et al.*, 2014).

#### 32.7.2.2.6.3 Digestaat van dierlijke mest

Digestaat van de vloeibare fractie van runderdrijfmest had een  $KME_0$ -waarde van 55% (bodem-pH 5,3) en 65% (bodem-pH 6,8) in een potproef met gerst (Foereid, 2017). Fosfor in gepelletiseerd digestaat van varkens- en rundermest (gecombineerd met afval van de voedingsindustrie) was goed beschikbaar in een veldproef met gerst:  $KME_0$  van 95% en  $KME_{FO}$  van 155% (Kuligowski *et al.*, 2010). De KME-waarden daalden licht bij verbranden van deze pellets ( $KME_0$  van 79% en  $KME_{FO}$  van 123%) of gasificeren ( $KME_0$  van 76% en  $KME_{FO}$  van 99%). Ook fosfor in digestaat van varkensdrijfmest was goed beschikbaar:  $KME_0$  van 104% en  $KME_{FO}$  van 109%. Het gedroogde geneutraliseerde zure extract van as van digestaat van dierlijke mest was veel minder beschikbaar, met een  $KME_0$ -waarde van 55% en  $KME_{FO}$ -waarde van slechts 15%. Bij drogen van dit digestaat daalt de

beschikbaarheid van fosfor (zie ook 32.7.2.2.8). Voor gras op een zandleembodem werden  $KME_o$ -waarden voor drie verschillende gedroogde mestdigestaten bekomen van 60%, 68% en 42% (Vanden Nest et al., niet gepubliceerde data). Concluderend wordt een KME van 90% voorgesteld voor vochtige digestaat van mest, en 60% voor gedroogd digestaat van mest.

#### 32.7.2.2.6.4 Compost van dierlijke mest

Compost van de vaste fractie van runderdrijfmest had een  $KME_o$ -waarde van 63% (bodem-pH 5,3) en 37% (bodem-pH 6,8) in een potproef met gerst (Foereid, 2017). Op een zandleembodem werden voor gras  $KME_o$ -waarden van meer dan 100% waargenomen voor gecomposteerde stalmest (Vanden Nest et al., niet gepubliceerde data).

#### 32.7.2.2.6.5 Biochar van dierlijke mest

Dierlijke mest kan ook gepyroliseerd of gegasificeerd worden bij hoge temperaturen. Fosfor in het vaste gasificatieproduct biochar blijkt vrij goed beschikbaar in een veldproef met gerst:  $KME_o$  van 73% en  $KME_{FO}$  van 111% voor de droge fractie van varkensdrijfmest als startproduct, en  $KME_o$  van 60% en  $KME_{FO}$  van 95% voor kippenmest als startproduct (Kuligowski *et al.*, 2010). Ook de pyrolysebiochar van kippenmest gaf een gelijke opbrengst van rogge als superfosfaat (Duboc *et al.*, 2017).

#### 32.7.2.2.7 Compost

Fosfor in compost is algemeen iets minder beschikbaar dan fosfor in andere fosforproducten. Zo werd voor compost van GFT-afval in een potproef met gerst een  $KME_o$ -waarde van 40% en  $KME_{FO}$ -waarde van 28% gevonden voor een bodem met pH van 5,3, en een  $KME_o$ -waarde van 24% en  $KME_{FO}$ -waarde van 16% voor een bodem met pH van 6,8 (Foereid, 2017). Voor compost van een mengeling van groenafval en de organische fractie van vast gemeentelijk afval werd een  $KME_o$ -waarde van 38% en een  $KME_{FO}$ -waarde van 33% berekend voor een potproef met gras op een bodem met pH 5,3 (Vandecasteele *et al.*, 2016). Op diezelfde bodem werden  $KME_o$ -waarden voor 4 verschillende composten waargenomen van 43%, 46%, 48% en 71% (Vanden Nest et al., niet gepubliceerde data). Er werden wel hogere waarden gevonden in een zure zandleembodem (pH-H<sub>2</sub>O=5,1):  $KME_o$  van 98% en  $KME_{FO}$  van 145% voor compost van afvalwaterslib en  $KME_o$  van 75% en  $KME_{FO}$  van 160% voor compost van pluimveestrooisel (Horta, 2017). Mogelijk resulteerde de lage bodem-pH in een goede beschikbaarheid van de calciumfosfaten in de organische meststoffen. Algemeen wordt een KME van 50% voorgesteld voor compost.

#### 32.7.2.2.8 Digestaat

Het startmateriaal voor anaerobe vergisting is meestal divers. Twee vloeibare digestaatproducten in de potproef met gras van Vandecasteele et al. (2016) hadden een  $KME_o$  van meer dan 100% en een  $KME_{FO}$  van 86% en 74%. Vaste en gepelletiseerde digestaat had een lagere bemestende waarde voor fosfor:  $KME_o$ -waarden van 60% en 61% en  $KME_{FO}$ -waarden van 44% en 52%. Op dezelfde bodem hadden twee andere vloeibare digestaten en de dunne fractie van een digestaat ook een  $KME_o$ -waarde van meer dan 100%, en vier gedroogde digestaten een veel lagere  $KME_o$ : 42%, 46%, 60% en 68% (Vanden Nest et al., niet gepubliceerde data). Ook in de studie van Brod et al. (2015a) werden hogere  $KME_o$ -waarden gevonden voor onbehandeld digestaat (90-94%) dan voor de vaste fractie (73-75%). De  $KME_o$ -waarden van digestaat van plantmateriaal (67%) en slachtafval (64%) als bronmateriaal vallen wat lager uit (Delin, 2016). Samengevat wordt een KME van 90% voorgesteld voor

(vloeibaar) digestaat en van 60% voor vaste en gedroogde digestaat, dezelfde waarden als voorgesteld voor digestaat van dierlijke mest (zie 32.7.2.2.6.3).

#### 32.7.2.2.9 Afvalwaterslib

Elf verschillende slibs van afvalwaterbehandeling (behandeling met aluminium- en/of ijzerzouten) hadden een sterk variërende maar vrij lage bemestende waarde voor fosfor:  $KME_{FO}$ -waarden varieerden tussen 15% en 43% voor raaigras bij een bodem-pH van 7,2 (Ogaard and Brod, 2016). In een potproef met raaigras bij een bodem-pH van 6,2 werden  $KME_O$ -waarden waargenomen van 63% (ijzergebaseerd slib), 40% (aluminiumgebaseerd slib) en 13% (calciumgebaseerd slib) (Delin, 2016). In een veldexperiment met tarwe was de  $KME_O$ -waarden van zowel het ijzer- als het aluminiumgebaseerd slib ook eerder laag (31%), bij iets hogere  $KME_{FO}$ -waarden (50%) (Delin, 2016). Samengevat wordt een KME van 30% voor afvalwaterslib voorgesteld.

#### 32.7.2.2.10 Slachtafval

Vermalen en gehygiëniseerd slachtafval bevat zo'n 2-10% P en kan dus ook als fosforbron aangewend worden. Berekende KME-waarden variëren sterk. Zo waren  $KME_O$  en  $KME_{FO}$  voor gerst slechts respectievelijk 7% en 7% op een bodem met pH 5,3 en slechts 2% en 3% op een bodem met pH 6,8 (Foereid, 2017). In een gelijkaardige studie met raaigras werden veel hogere  $KME_O$ -waarden waargenomen: 93% bij bodem-pH 5,5 en 17% bij bodem-pH 6,9 (Brod *et al.*, 2015a). Ook hoge  $KME_O$ -waarden werden waargenomen door Delin (2016): 60% voor vermalen vlees en 44% voor vermalen beenderen uit een potexperiment met gras op een zandbodem met pH 6,2, en 100% voor pellets van vermalen slachtafval uit een veldexperiment met tarwe. In een studie met rogge werden lagere opbrengsten met vlees- en beendermeelbemesting dan met superfosfaatbemesting waargenomen (Duboc *et al.*, 2017). Door de sterke variatie tussen de studies is het moeilijk een algemene KME-waarde af te leiden. Wellicht is deze lager bij neutrale dan bij lage bodem-pH.

#### 32.7.2.2.11 Assen

Fosfor in assen zijn vaak iets minder beschikbaar in vergelijking met andere fosforproducten. Zo werd voor as van hout in een potproef met gerst een  $KME_O$ -waarde van 40% en  $KME_{FO}$ -waarde van 32% gevonden voor een bodem met pH van 5,3, en telkens 32% voor een bodem met pH van 6,8 (Foereid, 2017). In een potproef met raaigras en bodems van pH 5,5 en 6,9 werden voor houtas daarentegen  $KME_O$ -waarden van hoger dan 100% gevonden, evenals hoge waarden (83-85%) voor as van hout- en graanresten (Brod *et al.*, 2015a). In een andere potproef met raaigras en een bodem met pH 4,5 werd een nog veel lagere bemestende waarde ( $KME_O$  8%) van houtas gevonden (Yusiharni *et al.*, 2007). In dezelfde proef werd voor as van gedeeltelijk en volledig verbrande pluimveestrooisel een  $KME_O$  van 15% en 11%, respectievelijk, berekend. In een potproef met gras werd een  $KME_O$  van 86% bekomen voor as van tarwestro, 52% voor as van koolzaadstro en 55% voor as van haverkorrels (Delin, 2016). Bij een bodem-pH van 4,4 bleek fosfor in as van afvalwaterslib ( $KME_{FO}$  20%) en in as van slachtafvalmeel ( $KME_{FO}$  10%) minder beschikbaar dan bij een bodem-pH van 6,6 ( $KME_{FO}$  van 50% en 30%, respectievelijk) (Cabeza *et al.*, 2011). Door de grote variatie tussen soorten assen en studies kan geen algemene KME-waarde afgeleid worden.

#### 32.7.2.2.12 Biochar

Zowel voor pyrolyse- als voor gasificatiebiochar van afvalwaterslib werden significante lagere opbrengsten van rogge waargenomen in vergelijking met superfosfaat (Duboc *et al.*, 2017). Voor vijf verschillende biochars

werden in een potproef met raaigras op een zandleembodem KME<sub>o</sub>-waarden bekomen van 35%, 89%, 84%, 33% en 47% (Vanden Nest et al., niet gepubliceerde data). Er wordt een gemiddelde KME-waarde van 60% voorgesteld.

### 32.7.2.3 Inschatten van KME op basis van chemische testen en producteigenschappen

Droge gerecycleerde producten hebben algemeen een lagere bemestende waarde dan vochtige gerecycleerde producten. Vooral producten met veel Ca of uitgekristalliseerde P-mineralen hebben een lagere bemestingswaarde dan tripelsuperfosfaat (Achat *et al.*, 2014; Vandecasteele *et al.*, 2016). Ook het ijzer- en aluminiumgehalte hebben een negatief effect op de bemestende waarde van P-producten (Ogaard and Brod, 2016). Om de bemestende waarde van een P-product te kennen, zijn niet altijd gewasproeven mogelijk. Om reeds een inschatting te kunnen maken, zijn verschillende tests (veelal extracties) mogelijk. Niet alle tests zijn even waardevol gezien de beperkte correlatie van de extractiewaarden met opbrengst- of fosforopnamecijfers van een gewas bemest met de producten (Duboc *et al.*, 2017). Testen die het best correleerden met de opbrengst- en fosforopname van rogge na 6 weken waren de extracties met ijzeroxide van het pure product en vooral DGT-testen van het product toegediend aan bodem (Duboc *et al.*, 2017). De pH van de bodem is ook sterk bepalend voor welke testen meest waardevol zijn. Zo bleek in een studie dat voor een bodem met pH 5,5 een CaCl<sub>2</sub>-extractie met adsorptie op ijzeroxidepapier en een extractie met neutraal ammoniumcitraat de beste voorspellers van de bemestende waarde te zijn, terwijl dit enkel P-Olsen was voor een bodem met pH 6,9. Andere fosfortesten bleken de bemestende waarde van producten met stabiele calciumfosfaten te overschatten (Brod *et al.*, 2015b). In een potexperiment met gras werd geen relatie vastgesteld tussen KME-waarden en P-AL van de producten gemengd in de bodem (Delin, 2016). Wel werd een relatie vastgesteld tussen KME-waarden en P geëxtraheerd uit de producten zelf (zonder bodem) met AL. Er worden ook relaties vastgesteld tussen bemestende waarde en P geëxtraheerd met water (Kratz *et al.*, 2010; Delin, 2016) of citraat (Yusiharni *et al.*, 2007; Delin, 2016).

### 32.7.3 Verschillen in bemestende waarde op lange termijn

#### 32.7.3.1 Veldproef UGent in Melle

##### 32.7.3.1.1 Algemeen

Sinds 2010 loopt een veldproef op een zandleemperceel in Melle met tamelijk hoge P-AL-waarde, onder beheer van UGent (professor Dirk Reheul). Er zijn 8 P-trappen (van 0 tot 41 kg P/ha) en 7 behandelingen met 37 kg P/ha toegepast via verschillende organische bemestingsvormen (digestaat, dierlijke mest en hun fracties, compost). Deze proef wordt besproken in bijlage 1 van luik 2.

##### 32.7.3.1.2 Resultaten voor de verschillende bemestingstypes

In 2011 was de gemiddelde P-AL 212 mg P/kg over het ganse proefveld. Er was een blokeffect aanwezig waarbij P-AL telkens significant hoger was in blok I. Er werden zowel begin 2011 als begin 2018 geen significante verschillen gevonden tussen de P-AL-waarden van de verschillende behandelingen (ANOVA). Ook P-CaCl<sub>2</sub> was niet verschillend tussen de behandelingen begin 2017.

Vermarktbaar opbrengsten van de verschillende behandelingen werden telkens vergeleken met deze van P7 als referentie (Dunnett's test). Algemeen werden nauwelijks verschillen waargenomen in de vermarktbaar

opbrengsten. De nog steeds vrij hoge fosforbeschikbaarheid in het proefoppervlak kan verklaren waarom er na acht jaar nauwelijks verschillen in opbrengsten tussen de behandelingen waargenomen worden. Pas indien er tussen de kunstmesttrappen duidelijke verschillen worden gevonden in opbrengst, zal het mogelijk zijn om de bemestende waarde voor fosfor van de organische meststoffen te evalueren.

Begin 2018 werden er significante verschillen in organische koolstofgehalte gevonden tussen de behandelingen ( $p=0,0025$ ). Zo was in de Dunnett's test het OC-gehalte in de behandeling met GFT (1,44%) significant hoger dan deze van de controle P7 (1,31%). Toepassing van compost gaf dus aanleiding tot een hoger koolstofgehalte in de bodem.

Op het vlak van pH-KCl waren er in 2018 geen verschillen tussen de behandelingen ( $p= 0,43$ ).

### 32.7.3.2 Bemestende waarde op basis van opbrengst

Uit de literatuurgegevens in 32.7.2 (korte termijnwerking) is duidelijk dat de fosforbemestende waarde van sommige bemestingsvormen lager kan zijn dan deze van kunstmest. Soms is de vorm waaronder fosfor toegediend wordt minder beschikbaar (bijvoorbeeld calciumfosfaten), soms geven de meststoffen P trager vrij dan goed oplosbare kunstmest (Yusiharni *et al.*, 2007; Ogaard and Brod, 2016). Indien jarenlang met deze trager fosforvrijzetzende bemestingsvorm wordt bemest, zal dan vaak een veel kleiner verschil in bemestende waarde in vergelijking met kunstmest waargenomen worden (lange termijnwerking). Van der Pauw (1937) wees reeds met verschillende veldproeven op het belang van tijdig toedienen van slakkenmeel. Vaak werden hogere opbrengsten waargenomen wanneer slakkenmeel werd toegepast op het einde van het vorige groeiseizoen in vergelijking met toediening in het begin van het huidige groeiseizoen.

De bemestende waarde van superfosfaat, rotsfosfaat en slakkenmeel werden vergeleken op 3 Oostenrijkse proefvelden waar deze producten gedurende 40 jaar toegediend werden bij dezelfde P-dosis (Spiegel *et al.*, 2001). Bij bemesten nam de opbrengst toe, en de opbrengst van gerst, haver (1 proefveld) en suikerbieten was gemiddeld in de laatste twintig jaar lager bij rotsfosfaat en gelijkaardig bij slakkenmeel in vergelijking met superfosfaat (geen verschillen bij tarweopbrengst). Ook een vijfjarige proef in Engeland gaf een lagere opbrengst van gras-klaver voor rotsfosfaat (88,5%) ten opzichte van tripelsuperfosfaat (Scholefield *et al.*, 1999). Rotsfosfaat had wel een langere werking in de tijd dan tripelsuperfosfaat. Bij een langdurige veldproef in Nederland werd met rotsfosfaat lagere opbrengsten voor aardappel bekomen dan met superfosfaat, voor suikerbiet en verschillende granen waren er geen opbrengstverschillen tussen de twee bemestingstypes (Ehlert *et al.*, 2003). Bij een andere langdurige veldproef in Nederland was de opbrengst van suikerbieten hoger bij bemesten met slakkenmeel dan met superfosfaat of rotsfosfaat, wellicht door het pH-verhogend effect van slakkenmeel. Aardappelen reageerden het best op superfosfaat (van der Zee *et al.*, 1990). De fosforopname door het gewas nam gemiddeld toe volgens rotsfosfaat < slakkenmeel < superfosfaat.

Een review gaf aan dat op lange termijn de werking van P uit dierlijke mest gelijk was aan deze van kunstmest (Smith and van Dijk, 1987). Twintig jaar bemesten met compost gaf gemiddeld 84% relatieve korrelopbrengsten van tarwe en maïs in vergelijking met bemesten met TSP op een bodem met hoge pH in China (Xin *et al.*, 2017). De P-opname was voor compost wel 105% ten opzichte van deze met TSP. In een Duitse veldproef (10 jaar) gaf bemesten met rundermest gelijkaardige, en compost gelijkaardige of zelfs hogere opbrengsten in vergelijking met kunstmest (Krey *et al.*, 2013). Hogere opbrengsten met organische bemestingsvormen zijn mogelijk door sterker verhogen van de fosforbeschikbaarheid in de bodem, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van organische zuren (zie 32.7.3.3). Het is echter ook mogelijk dat hogere opbrengsten niet veroorzaakt worden door een betere

fosforbeschikbaarheid van het product zelf, maar door andere gevolgen van de inbreng van organische bemestingsvormen. Het gebruik van organische bemesting in plaats van fosforkunstmest kan resulteren in hogere bodem-pH en meer fosfatase-activiteit in de bodem waardoor de fosforbeschikbaarheid in de bodem verhoogt (Krey *et al.*, 2013). Het grootste voordeel van organische bemesting is echter het inbrengen van organische stof in de bodem. Vooral bij gebruik van meststoffen met een hoog gehalte aan effectieve organische stof zoals stalmest en compost kan het koolstofgehalte in de bodem op peil gehouden of verhoogd worden. Een voldoende hoog koolstofgehalte is positief voor de watervoorziening in drogere periodes, de bodemvruchtbaarheid en voor erosiebescherming (van Dijk *et al.*, 2007a). Uit data van Rothamsted blijkt ook dat bij een hoger organisch stofgehalte van de bodem de maximale opbrengst bij een veel lagere fosforbeschikbaarheid mogelijk is dan bij een lager organisch stofgehalte (Johnston and Dawson, 2005).

### 32.7.3.3 Bemestende waarde op basis van gemeten fosforbeschikbaarheid

Indien we de bemestende waarde van verschillende bemestingstypes op lange termijn bekijken, wordt best ook de evolutie van de gemeten fosforbeschikbaarheid in de tijd vergeleken. Immers, het bemestingsadvies op lange termijn (zie DWP 3.2) is gebaseerd op evoluties van de fosforbeschikbaarheid richting de streefzone. Het is dus de vraag of verschillende fosforbemestingstypes voor eenzelfde P-dosis de fosforbeschikbaarheid in de bodem op dezelfde of op een andere manier veranderen.

De toename van P-AL na de toediening van rundermest, varkensmest, kippenmest en slachtkuikensmest was na 1,5 jaar maar 90% van de toename van P-AL met dezelfde P-dosis TSP (Prummel and Sissingh, 1983). Voor verschillende lange termijn veldproeven in het Verenigd Koninkrijk werd waargenomen dat dierlijke mest (varkens- en runderdrijfmest, stalmest en kippenmest) en kunstmest de beschikbare P (P-Olsen) op dezelfde manier veranderden (Smith *et al.*, 1998). Ook de toediening van varkensdrijfmest, stalmest en varkensdrijfmestcompost gedurende 8 jaar veranderden P-Olsen gelijkaardig als kunstmest deed (Zhang *et al.*, 2013). In een zesjarig veldexperiment werd een gelijke verandering in P-Olsen waargenomen bij bemesten met kippenmest of TSP (Johnston and Dawson, 2005). Ook bij decennialang toepassen van stalmest, afvalwaterslib en superfosfaat waren de veranderingen in P-Olsen gelijk. Voor zeven langetermijnproeven in Engeland was echter wel een grotere P-dosis nodig om P-Olsen te verhogen met behulp van dierlijke mest in vergelijking met kunstmest (Rollett *et al.*, 2017). Voor vijf langetermijn veldproeven in Engeland nam bij decennia lang bemesten met stalmest de totale P en Olsen-P ongeveer in gelijke mate toe als bij bemesten met fosforkunstmest, maar de onmiddellijk beschikbare fosforfractie (P-CaCl<sub>2</sub>) was vaak dubbel zo groot bij de stalmestbemesting (Johnston and Dawson, 2005). In een zevenjarige veldproef in Melle deed stalmest de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid (P-CaCl<sub>2</sub>) meer toenemen dan andere bemestingsvormen (compost, runderdrijfmest en kunstmest) (Vanden Nest *et al.*, 2014). Mogelijke verklaringen zijn (i) de hogere concentratie organische zuren in organische bemesting, die in competitie treden met fosfaat voor binding op bodem (Jiao *et al.*, 2007); (ii) een combinatie van hogere P-inputs en toegenomen P-AL in de bodem en (iii) hogere Ca-inputs via composttoepassing die voor beperktere fosforbeschikbaarheid zorgen. In drie Italiaanse bodems was de fosforbeschikbaarheid na 44 jaar bemesting duidelijk hoger voor stalmesttoediening dan voor minerale bemesting (Pizzeghello *et al.*, 2016).

Uit vijf Nederlandse langetermijn veldproeven werd geconcludeerd dat organische bodemverbeterende middelen als compost en dierlijke mest een gelijkaardige verandering van P<sub>w</sub>, P-AL en P-ox veroorzaakten als kunstmest (Ehlert *et al.*, 2004). Tien jaar toedienen van kunstmest-P, compost van organisch afval of rundermest op een Duitse veldproef gaf dezelfde verandering in fosforbeschikbaarheid (Krey *et al.*, 2013). In een Nederlandse literatuurstudie werden wel lagere werkingscoëfficiënten en werkingsfactoren gevonden:

gemiddeld 90% voor stalmest en 70% voor compost (van Dam and Ehlert, 2008), maar niet alle referenties hielden rekening met basisvoorwaarden als gelijke fosforbemestingsdosissen en N- en K-compensatie. Vijf jaar toedienen van rotsfosfaat en TSP op een Engelse veldproef gaf zelfs de hoogste P-Olsen-waarden voor rotsfosfaat (Scholefield *et al.*, 1999).

Aangezien de meeste studies een gelijkaardige werking (qua opbrengst en qua fosforbeschikbaarheid) van kunstmest en andere bemestingsvormen aantonen, worden geen aanpassingen van fosforbemestingsadviezen op lange termijn voor andere bemesting dan kunstmest aangeraden. Enkele studies vinden wel verschillen voor de onmiddellijke fosforbeschikbaarheid, maar deze wordt niet beschouwd voor het bemestingsadvies op lange termijn. Dus ook voor mesttypes waar het beeld van is dat zij de fosfortoestand beperkt verhogen (compost, stalmest, rotsfosfaat), wordt aangeraden om met dezelfde P-dosis te bemesten als bij kunstmest. Zoniet kan de fosforbeschikbaarheid in de bodem sterk verhoogd worden. Indien fosforbemesting nodig is (niet voor bodems met P-AL hoger dan de streefzone), heeft fosfortoepassing via organische mest in vergelijking met kunstmest als voordeel dat er ook andere nutriënten en organische stof aangevoerd worden. Deze laatste heeft ook extra voordelen voor de fosforbeschikbaarheid door de positieve invloed op bodemstructuur (beworteling en diffusie van fosfor in de bodem).

#### 32.7.4 Verschillen in risico op fosforverliezen

Runoff-studies in het Verenigd Koninkrijk toonden grotere fosforverliezen na drijfmesttoepassing dan na bemesting met stalmest (Smith *et al.*, 1998). In een andere studie werden ook grotere fosforverliezen in drainagebuizen gevonden na toepassing van varkensdrijfmest in vergelijking met andere bemestingsvormen als kunstmest, runderstalmest en kippenmest (Smith *et al.*, 1998). Ook in andere studies (Withers *et al.*, 2001; Bertol *et al.*, 2010) worden hogere fosforverliezen via runoff waargenomen voor organische mesttypes in vergelijking met kunstmestfosfor. Mogelijk zijn de verschillen wel beperkt bij tijdig inwerken van de organische bemesting (Withers *et al.*, 2001). In een algemene review over verliezen via drainagebuizen werden talrijke studies aangehaald die hogere fosforverliezen observeerden bij organische bemesting dan bij kunstmesttoepassing (King *et al.*, 2015). De fosforverliezen via uitloging voor een leembodem die gedurende vijf jaar met verschillende bemestingstypes bemest werd, waren ook het laagst bij kunstmestbemesting, en namen toe in de volgorde kippenmestcompost  $\approx$  rundermest < kippenmest < rundermestcompost (McDowell and Sharpley, 2004). Fosfor in digestaat is mogelijk sterk onderhevig aan uitloging (Stutter, 2015). Dit werd bevestigd in de uitloogexperimenten van Vanden Nest *et al.* (2015): terwijl voor bodems vier jaar bemest met gft-compost of runderdrijfmest gelijkaardige fosforuitloging geobserveerd werd als voor kunstmest, werd een significant hogere fosforuitloging vastgesteld voor bodems vier jaar bemest met de vaste fractie van digestaat van organisch afval, energiegewassen en dierlijke mest (zelfde P-bemestingsdosis). In twee veldproeven in Melle en in Frankrijk werden hogere fosforverliezen via uitloging waargenomen voor stalmest in vergelijking met minerale bemesting en vooral compost (Vanden Nest *et al.*, 2016).

Sommige studies vinden echter meer fosforverliezen voor kunstmest dan voor organische bemesting. In runoffexperimenten daalden de fosforverliezen voor verschillende bemestingstypes in de volgorde kunstmestfosfor > varkensdrijfmest > vaste rundermest (Kumaragamage *et al.*, 2011). Voor twee zure zandbodems werd meer fosfor uitgelooft na TSP-toediening dan na toepassing van kippenmest en vooral afvalwaterslib (Elliott *et al.*, 2002). Ook voor een leembodem werden gemiddeld twee keer hogere fosforverliezen via uitloging waargenomen bij kunstmestbemesting dan bij organische (dierlijke) bemesting (Kang *et al.*, 2011). In de groep van organische bemesting werden grotere verliezen waargenomen bij de

vloeibare producten, compost had de kleinste fosforverliezen. Bij vier Zweedse bodems werden gelijkaardige fosforverliezen via uitloging waargenomen bij bemesting met TSP of dierlijke mest (Ulén, 1999). In uitloogexperimenten bleek fosfor toegediend via as van varkensmest veel minder onderhevig aan uitloging dan fosfor uit kunstmest (Kuligowski and Poulsen, 2009).

De meerderheid van de studies vindt hogere verliezen bij organische bemesting dan bij kunstmest. Grotere uitlogingsverliezen met organische mesttypes ten opzichte van kunstmest kunnen verklaard worden door een hogere mobiliteit van organische fosforcomponenten dan anorganische fosfor (Brookes *et al.*, 1997; King *et al.*, 2015), een lagere fosfaatsorptiecapaciteit van bodems bij organische bemesting (Jiao *et al.*, 2007) en doordat organische zuren uit organische mesttypes in competitie treden met fosfaat voor bodemsorptieplaatsen en calciumfosfaatneerslagen kunnen voorkomen (McDowell and Sharpley, 2004; Delgado and Scalenghe, 2008). Door deze laatste zijn ook synergetische effecten mogelijk; bodems met een hoog bodemfosforgehalte waaraan organische mest werd toegediend, kunnen een extra verhoging van de fosforuitloging vertonen door mobilisatie van fosfor die reeds in de bodem aanwezig was, ten gevolge van de organische bemesting (Fangueiro *et al.*). Verschillen in fosforverliezen tussen organische bemestingsvormen onderling kunnen onder meer verklaard worden door de hoeveelheid organische zuren in de bemesting, deze kunnen bijvoorbeeld lager zijn voor compost dan voor stalmest (Vanden Nest *et al.*, 2016). Daarnaast zijn er ook organische mesttypes zoals compost en kippenmest die calcium bevatten en door calciumfosfaatneerslagen fosforuitloging kunnen beperken (Vanden Nest *et al.*, 2014). Fosfor kan via colloïden getransporteerd worden, en dit colloïdtransport wordt beperkt bij hoge calciumconcentraties (Warrinnier *et al.*, 2017). Dit kan eventueel ook verklaren waarom in sommige studies lagere fosforverliezen bij organische bemesting (vooral compost) dan bij kunstmest werden geobserveerd. In een uitloogstudie werden veel lagere fosforverliezen na bemesting met rotsfosfaat dan na bemesting met TSP gevonden (Gikonyo *et al.*, 2010), wellicht door de lage oplosbaarheid van de calciumfosfaatmineralen in rotsfosfaat.

### 32.7.5 Conclusie

Bij gebruik van andere mesttypes dan kunstmest moet voor heel wat types rekening gehouden worden met een lagere effectiviteit op korte termijn. Indien de fosforbeschikbaarheid in de bodem onder de streefzone ligt, moet het kortetermijn bemestingsadvies daarom verhoogd worden volgens de afgeleiden KME-waarden (zie 32.7.2.2). Het advies op lange termijn, voor het bereiken van de streefzone, dient echter niet aangepast te worden indien fosfor met een andere bemestingsvorm dan kunstmest wordt toegepast. Men dient wel alert te zijn voor mogelijk hogere fosforverliezen bij gebruik van organische bemesting in vergelijking met kunstmest. Daartegenover staan de positieve effecten van toepassing van organische bemesting op het organisch stofgehalte en bodemkwaliteit.

## 32.8 SAMENVATTING

Bemestingstype en bodemmanagement kunnen op verschillende manieren de fosforbeschikbaarheid, de gewasopbrengst en de fosforverliezen vanuit bodems beïnvloeden. Zo is duidelijk dat de fosforbeschikbaarheid verhoogd wordt door fosforbemesting, maar dat deze daarna langzaam daalt in de tijd door fosforvastlegging in de bodem. Het bemestingstijdstip kan echter enkel een invloed hebben op de opbrengst als een opbrengstverhoging mogelijk is via bemesting. In enkele veldexperimenten wordt vastgesteld dat voorjaarsbemesting soms hogere opbrengsten geeft dan bemesting het jaar voordien. Via **rijenbemesting** kan



fosfor dicht bij de plant gebracht worden en kan efficiënter bemest worden (dosis kan gereduceerd worden) in het geval de rijafstand voldoende groot is en fosforbemesting nodig is voor een grotere opbrengst. In de literatuur wordt soms een hogere opbrengst bij rijenbemesting versus vollelveldsbemesting waargenomen. Voor startfosfor bij maïs is dit soms ook het geval, maar vaak wordt een minder goede start bij afwezigheid van startfosfor in latere fases weggewerkt. Effecten van rijenbemesting op fosforverliezen zijn niet gekend. Ook met dierlijke mest kan rijenbemesting uitgevoerd worden, maar moet opgelet worden voor structuurschade.

Het **toepassen** van voldoende **N en K** kan fosforuitmijning maximaliseren. **Fosforvastleggende componenten** doen het P-gehalte in de bodem niet dalen, maar kunnen de beschikbaarheid voor verliezen wel sterk reduceren. Toepassingsmogelijkheden zijn biochar, en talrijke calcium-, ijzer- en aluminiumhoudende componenten. Er zijn hiermee reeds veel labostudies en enkele veldexperimenten uitgevoerd, die telkens wijzen op sterk verminderde fosforverliezen. Er werden nog geen negatieve gevolgen voor het gewas vastgesteld. Ook **bekalken** kan eventueel fosforverliezen beperken, maar hier zijn de resultaten veel onzekerder door een combinatie van een pH- en calciumeffect en het belang van de startcondities in de bodem. Daarom werd een algemeen bekalkingsadvies voor Vlaamse bodems afhankelijk van de bodem-pH en de fosforbeschikbaarheid in de bodem afgeleid.

Er zijn verschillende **types fosforbemesting**: kunstmest, dierlijke, andere organische vormen,... Aangezien fosfor niet in alle bemestingstypes even (snel) beschikbaar is, is de bemestende waarde op korte termijn (jaar van bemesting) soms lager dan deze van snelwerkende kunstmest als TSP. Op basis van proeven uit de literatuur en uitgevoerd door ILVO werden kunstmestequivalentwaarden voor verschillende bemestingstypes afgeleid. Op lange termijn wordt vastgesteld dat de bemestende waarde voor verschillende types zowel op het vlak van verhogen van fosforbeschikbaarheid als opbrengst, gelijkaardig is. In een veldproef van UGent werden ook nog geen (duidelijke) verschillen in fosforbeschikbaarheid en opbrengst bij verschillende bemestingstypes waargenomen na acht jaar. Soms worden hogere fosforverliezen vastgesteld bij bemesting met stalmest, digestaat en drijfmest in vergelijking met kunstmest, wat gelinkt kan worden aan effecten via organische zuren en calcium.

## 32.9 REFERENTIES

- Aarts, H.F.M., den Boer, D.J., van Middelkoop, J.C., Oenema, J., 2008. Landbouwkundige gevolgen van het aanscherpen en differentiëren van fosfaatgebruiksnormen voor de melkveehouderij.
- Achat, D.L., Sperandio, M., Daumer, M.L., Santellani, A.C., Prud'Homme, L., Ekhtar, M., Morel, C., 2014. Plant-availability of phosphorus recycled from pig manures and dairy effluents as assessed by isotopic labeling techniques. *Geoderma* 232-234, 24-33.
- Ackerman, J.N., Zvomuya, F., Cicek, N., Flaten, D., 2013. Evaluation of manure-derived struvite as a phosphorus source for canola. *Canadian Journal of Plant Science* 93, 419-424.
- ADHB, 2017. Nutrient Management Guide (RB209).
- Agyin-Birikorang, S., O'Connor, G.A., Jacobs, L.W., Makris, K.C., Brinton, S.R., 2007. Long-term phosphorus immobilization by a drinking water treatment residual. *Journal of Environmental Quality* 36, 316-323.
- Alblas, J., van der Schoot, J.R., 2000. Pw-getal zegt niet alles... Kennisakker.nl.
- Allen, B.L., Mallarino, A.R., 2008. Effect of liquid swine manure rate, incorporation, and timing of rainfall on phosphorus loss with surface runoff. *Journal of Environmental Quality* 37, 125-137.

- Andersson, H., Bergstrom, L., Djodjic, F., Ulen, B., Kirchmann, H., 2016. Lime placement on subsoil as a strategy to reduce phosphorus leaching from agricultural soils. *Soil Use and Management* 32, 381-389.
- Anonymous, 2013a. Bijlage I van het Koninklijk Besluit van 28 januari 2013 betreffende het in de handel brengen en het gebruiken van meststoffen, bodemverbeterende middelen en teeltsubstraten.
- Anonymous, 2013b. Koninklijk besluit betreffende het in de handel brengen en het gebruiken van meststoffen, bodemverbeterende middelen en teeltsubstraten, bl. 14890. 28 januari 2013.
- Anonymous, 2013c. Soil - Part 6: Phosphorus and potassium in the soil. Plant & Soil Sciences eLibrary, USA.
- Assinck, F.B.T., van der Salm, C., 2011. Oppervlakkige afspoeling op landbouwgronden; Bemestingstool: een instrument ter voorkoming van incidentele nutriëntenverliezen door oppervlakkige afvoer. Wageningen.
- Beckie, H.J., Ukrainetz, H., 1996. Lime-amended acid soil has elevated pH 30 years later. *Canadian Journal of Soil Science* 76, 59-61.
- Berecz, K., Balázs, J., Németh, I., Füleky, G., 2005. Studying the direct and residual effect of long-term fertilization using ammonium lactate and hot water extraction methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36, 203-213.
- Bertol, O.J., Rizzi, N.E., Favaretto, N., Lana, M.D., 2010. Phosphorus loss by surface runoff in no-till system under mineral and organic fertilization. *Scientia Agricola* 67, 71-77.
- Bittman, S., Liu, A., Hunt, D.E., Forge, T.A., Kowalenko, C.G., Chantigny, M.H., Buckley, K., 2012. Precision placement of separated dairy sludge improves early phosphorus nutrition and growth in corn (*Zea mays* L.). *Journal of Environmental Quality* 41, 582-591.
- Blake, L., Johnston, A.E., Poulton, P.R., Goulding, K.W.T., 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil* 254, 245-261.
- Bomans, E., Fransen, K., Gobin, A., Mertens, J., Michiles, P., Vandendriessche, H., 2005. Addressing phosphorus related problems in farm practice, Final report to the European Commission.
- Boon, R., 1974. Verslag over de opzoekingen 74: deel II, hoofdstuk 2 (NPK Kempen 1970-1974). Bodemkundige Dienst van België, Heverlee.
- Boon, R., 1976. Vergelijkende studie over bemesting met drijfmest enerzijds en scheikundige NPK meststoffen anderzijds (Reppel 1002) (1972-1976). Bodemkundige Dienst van België, Heverlee.
- Boon, R., 1977. Verslag proefveld 1027 - Geetbets NPK Mg-proef (1974-1977). Bodemkundige Dienst van België, Heverlee.
- Brennan, R.B., Healy, M.G., Grant, J., Ibrahim, T.G., Fenton, O., 2012. Incidental phosphorus and nitrogen loss from grassland plots receiving chemically amended dairy cattle slurry. *Science of the Total Environment* 441, 132-140.
- Brod, E., Ogaard, A.F., Hansen, E., Wragg, D., Haraldsen, T.K., Krogstad, T., 2015a. Waste products as alternative phosphorus fertilisers part I: inorganic P species affect fertilisation effects depending on soil pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 103, 167-185.
- Brod, E., Ogaard, A.F., Haraldsen, T.K., Krogstad, T., 2015b. Waste products as alternative phosphorus fertilisers part II: predicting P fertilisation effects by chemical extraction. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 103, 187-199.
- Brookes, P.C., Heckrath, G., De Smet, J., Hofman, G., Vanderdeelen, J., 1997. Losses of phosphorus in drainage water. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C., Johnston, A.E. (Eds.), *Phosphorus loss from soil to water*. CAB International, Cambridge, pp. 253-271.
- Bussink, D.W., Bakker, R.F., van der Draai, H., Temminghoff, E.J.M., 2011. Naar een advies voor fosfaatbemesting op nieuwe leest; deel 1 snijmaïs. Wageningen.

- Cabeza, R., Steingrobe, B., Romer, W., Claassen, N., 2011. Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91, 173-184.
- Callahan, M.P., Kleinman, P.J.A., Sharpley, A.N., Stout, W.L., 2002. Assessing the efficacy of alternative phosphorus sorbing soil amendments. *Soil Science* 167, 539-547.
- Chardon, W.J., Dorioz, J.M., 2010. Phosphorus immobilizing amendments to soil. Factsheet of the study of the COST action 869. In: Schoumans, O.F., Chardon, W.J. (Eds.), Wageningen.
- Condron, L.M., Harris, E.M., Clough, T.J., 2013. Impact of biochar amendment on phosphorus retention by riparian soil. SLU Dept of Soil and Environment.
- Coppens, G., Vandendriessche, H., Moens, W., Bries, J., 2009. De mestwegwijzer. Overzicht van 15 jaar mestanalyse door de Bodemkundige Dienst van België. Bodemkundige Dienst van België vzw, Heverlee.
- Costigan, P.A., 1984. The effects of placing small amounts of phosphate fertilizer close to the seed on growth and nutrient concentrations of lettuce. *Plant and Soil* 79, 191-201.
- Curtin, D., Syers, J.K., 2001. Lime-induced changes in indices of soil phosphate availability. *Soil Science Society of America Journal* 65, 147-152.
- D'Hose, T., Ruyschaert, G., Viaene, N., Debode, J., Nest, T.V., Van Vaerenbergh, J., Cornelis, W., Willekens, K., Vandecasteele, B., 2016. Farm compost amendment and non-inversion tillage improve soil quality without increasing the risk for N and P leaching. *Agriculture Ecosystems & Environment* 225, 126-139.
- De Blauwer, V., Odeurs, W., Goeminne, M., 2013. Rijenbemesting in de aardappelteelt.
- de Boer, H.C., 2008. Verkenning van de mogelijkheden om de opname van bodemfosfaat door blijvend grasland te verhogen. Lelystad.
- De Bolle, S., 2013. Phosphate saturation and phosphate leaching of acidic sandy soils in Flanders: analysis and mitigation options. Ghent University, Ghent.
- de Haan, J.J., van Geel, W., 2013. Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen 2013. Wageningen.
- de Ruijter, F.J., Smit, A.L., Meurs, E.J.J., 2009. Plaatsing als strategie voor een efficiëntere fosfaatbemesting. 2. Veldproeven. Wageningen.
- Dekker, P.H.M., Postma, R., 2008. Verhoging efficiëntie fosfaatbemesting. Wageningen.
- Delgado, A., Scalenghe, R., 2008. Aspects of phosphorus transfer from soils in Europe. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 171, 552-575.
- Delin, S., 2016. Fertilizer value of phosphorus in different residues. *Soil Use and Management* 32, 17-26.
- Denef, K., Roobroeck, D., Wadu, M., Lootens, P., Boeckx, P., 2009. Microbial community composition and rhizodeposit-carbon assimilation in differently managed temperate grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 144-153.
- Djordjic, F., Bergstrom, L., Grant, C., 2005. Phosphorus management in balanced agricultural systems. *Soil Use and Management* 21, 94-101.
- Djordjic, F., Borling, K., Bergstrom, L., 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality* 33, 678-684.
- Dodd, R.J., McDowell, R.W., Condron, L.M., 2014. Manipulation of fertiliser regimes in phosphorus enriched soils can reduce phosphorus loss to leachate through an increase in pasture and microbial biomass production. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 185, 65-76.
- Dorland, E., Fujita, Y., Chardon, W., Lida de Jong, A., 2017. Toepassing van drinkwaterslib op fosfaatrijke gronden t.b.v. natuurontwikkeling. Nieuwegein.

- Duboc, O., Santner, J., Fard, A.G., Zehetner, F., Tacconi, J., Wenzel, W.W., 2017. Predicting phosphorus availability from chemically diverse conventional and recycling fertilizers. *Science of the Total Environment* 599, 1160-1170.
- Ehlert, P.A.I., Dekker, P.H.M., van der Schoot, J.R., Visschers, R., van Middelkoop, J.C., van der Maas, A.A., Pronk, A.A., van Dam, A.M., 2009. Fosforgehalten en fosfaatafvoercijfers van landbouwgewassen. Eindrapportage., Wageningen.
- Ehlert, P.A.I., Pasterkamp, H.P., Bolhuis, P.R., 2004. Effecten van organische bodemverbeterende middelen op de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem op korte en lange termijn. Wageningen.
- Ehlert, P.A.I., van Middelkoop, J.C., van der Salm, C., Dekker, P.H.M., 2008. Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op lange termijn. Stand van zaken 2007., Wageningen.
- Ehlert, P.A.I., van Wijk, C.A.P., Dekker, P.H.M., 2003. Fosfaatbalansen op perceelsniveau. Scan van de resultaten van vier veeljarige veldproeven op bouwland. Lelystad.
- Ehlert, P.A.I., van Wijk, C.A.P., van den Berg, W., 2002. Fosfaatbehoefte van vollegrondsgroentegewassen. 3. Precisiebemesting. PPO-Projectrapport nr. 1125232. Wageningen.
- Eichler-Lobermann, B., Kohne, S., Koppen, D., 2007. Effect of organic, inorganic, and combined organic and inorganic P fertilization on plant P uptake and soil P pools. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 170, 623-628.
- Ekhholm, P., Turtola, E., Gronroos, J., Seuri, P., Ylivainio, K., 2005. Phosphorus loss from different farming systems estimated from soil surface phosphorus balance. *Agriculture Ecosystems & Environment* 110, 266-278.
- Ekhholm, P., Valkama, P., Jaakkola, E., Kiirikki, M., Lahti, K., Pietola, L., 2012. Gypsum amendment of soils reduces phosphorus losses in an agricultural catchment. *Agricultural and Food Science* 21, 279-291.
- Elliott, H.A., O'Connor, G.A., Brinton, S., 2002. Phosphorus leaching from biosolids-amended sandy soils. *Journal of Environmental Quality* 31, 681-689.
- Fangueiro, D., Vasconcelos, E., Ribeiro, H., Cabral, F., Graça, J., Roboredo, M., Coutinho, J., 2013. Soil residual phosphorous and manure type applied affect nutrient losses by leaching and ryegrass yield. *VCM*.
- Federolf, C.P., Westerschulte, M., Olf, H.W., Broll, G., Trautz, D., 2016. Enhanced nutrient use efficiencies from liquid manure by positioned injection in maize cropping in northwest Germany. *European Journal of Agronomy* 75, 130-138.
- Foeroid, B., 2017. Phosphorus availability in residues as fertilizers in organic agriculture. *Agricultural and Food Science* 26, 25-33.
- Gagnon, B., Demers, I., Ziadi, N., Chantigny, M.H., Parent, L.E., Forge, T.A., Larney, F.J., Buckley, K.E., 2012. Forms of phosphorus in composts and in compost-amended soils following incubation. *Canadian Journal of Soil Science* 92, 711-721.
- Gikonyo, E., Zaharah, A.R., Hanafi, M.M., Anuar, R., 2010. Phosphorus Leaching in an Acid Tropical Soil "Recapitalized" with Phosphate Rock and Triple Superphosphate. *TheScientificWorldJOURNAL* 10, 1498-1508.
- Guzman, V.L., Sanchez, C.A., Lucas, R.E., 1987. Banding fertilizers for improved fertilizer use efficiency for lettuce on everglads histosols. *Proc. Fla. State Hort. Soc* 100, 200-203.
- Hahn, C., Prasuhn, V., Stamm, C., Schulin, R., 2012. Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities. *Agriculture Ecosystems & Environment* 153, 65-74.
- Haustein, G.K., Daniel, T.C., Miller, D.M., Moore, P.A., Mcnew, R.W., 2000. Aluminum-containing residuals influence high-phosphorus soils and runoff water quality. *Journal of Environmental Quality* 29, 1954-1959.
- Haygarth, P.M., Jarvis, S.C., 1999. Transfer of phosphorus from agricultural soils. *Advances in Agronomy*, Vol 66 66, 195-249.

- Haynes, R.J., 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils - a critical review. *Plant and Soil* 68, 289-308.
- Hermans, I., Bries, J., 2008. *Maïs telen met de nieuwe fosfornormen*. Leuven.
- Holford, I.C.R., Crocker, G.J., 1994. Long-term effects of lime on pasture yields and response to phosphate fertilizers on eight acidic soils. *Australian Journal of Agricultural Research* 45, 1051-1062.
- Holford, I.C.R., Schweitzer, B.E., Crocker, G.J., 1994. Long-term effects of lime on soil-phosphorus solubility and sorption in eight acidic soils. *Australian Journal of Soil Research* 32, 795-803.
- Horta, C., 2017. Bioavailability of phosphorus from composts and struvite in acid soils. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 21, 459-464.
- Jiao, Y., Whalen, J.K., Hendershot, W.H., 2007. Phosphate sorption and release in a sandy-loam soil as influenced by fertilizer sources. *Soil Science Society of America Journal* 71, 118-124.
- Johnston, A.E., Dawson, C.J., 2005. *Phosphorus in agriculture and in relation to water quality*. Peterborough, United Kingdom.
- Johnston, A.E., Lane, P.W., Mattingly, G.E.G., Poulton, P.R., Hewitt, M.V., 1986. Effects of soil and fertilizer-P on yields, of potatoes, sugar-beet, barley and winter-wheat on a sandy clay loam soil at Saxmundham, Suffolk. *Journal of Agricultural Science* 106, 155-167.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Fixen, P.E., Curtin, D., 2014. Phosphorus: Its efficient use in agriculture. *Advances in Agronomy*, Vol 123 123, 177-228.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., White, R.P., 2013. Plant-available soil phosphorus. Part II: the response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam. *Soil Use and Management* 29, 12-21.
- Kang, J.H., Amoozegar, A., Hesterberg, D., Osmond, D.L., 2011. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources. *Geoderma* 161, 194-201.
- Karpinets, T.V., Greenwood, D.J., Ammons, J.T., 2004. Predictive mechanistic model of soil phosphorus dynamics with readily available inputs. *Soil Science Society of America Journal* 68, 644-653.
- King, K.W., Williams, M.R., Dick, W.A., LaBarge, G.A., 2016. Decreasing Phosphorus Loss in Tile-Drained Landscapes Using Flue Gas Desulfurization Gypsum. *Journal of Environmental Quality* 45, 1722-1730.
- King, K.W., Williams, M.R., Macrae, M.L., Fausey, N.R., Frankenberger, J., Smith, D.R., Kleinman, P.J.A., Brown, L.C., 2015. Phosphorus Transport in Agricultural Subsurface Drainage: A Review. *Journal of Environmental Quality* 44, 467-485.
- Kirkby, E.A., Johnston, A.E., 2008. Soil and fertilizer phosphorus in relation to crop nutrition. In: White, P.J., Hammond, J.P. (Eds.), *The ecophysiology of plant-phosphorus interactions*. Springer, London, pp. 177-224.
- Kleinman, P.J.A., Sharpley, A.N., McDowell, R.W., Flaten, D.N., Buda, A.R., Tao, L., Bergstrom, L., Zhu, Q., 2011. Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles for progress. *Plant and Soil* 349, 169-182.
- Koopmans, G.F., Chardon, W.J., Groenenberg, J.E., 2010. Karakterisatie van ijzerslib en -zand en een verkenning van de mogelijkheden van het gebruik van deze reststoffen om fosfaatverliezen vanuit landbouwgronden naar het oppervlak te verminderen., Wageningen.
- Koopmans, G.F., Chardon, W.J., Lubbers, I., Oenema, J., van den Toorn, A., van der Salm, C., 2009. Diffuse belasting van het oppervlaktewater met nutriënten vanuit grasland op een zware kleigrond; Monitoring van nutriëntenemissies en -verschijningsvormen op een melkveehouderij bij Waardenburg. Wageningen.
- Kratz, S., Haneklaus, S., Schnug, E., 2010. Chemical solubility and agricultural performance of P-containing recycling fertilizers. *Landbauforschung* 60, 227-240.

- Krebbers, H., 2010. Mest in rij, ook op klei. Techniek is er, capaciteit moet omhoog. Veehouderij Techniek. AgriMedia BV, Wageningen.
- Krey, T., Vassilev, N., Baum, C., Eichler-Löbermann, B., 2013. Effects of long-term phosphorus application and plant-growth promoting rhizobacteria on maize phosphorus nutrition under field conditions. *European Journal of Soil Biology*.
- Kuligowski, K., Poulsen, T.G., 2009. Phosphorus leaching from soils amended with thermally gasified piggery waste ash. *Waste Manage.* 29, 2500-2508.
- Kuligowski, K., Poulsen, T.G., Rubaek, G.H., Sorensen, P., 2010. Plant-availability to barley of phosphorus in ash from thermally treated animal manure in comparison to other manure based materials and commercial fertilizer. *European Journal of Agronomy* 33, 293-303.
- Kumaragamage, D., Flaten, D., Akinremi, O.O., Sawka, C., Zvomuya, F., 2011. Soil test phosphorus changes and phosphorus runoff losses in incubated soils treated with livestock manures and synthetic fertilizer. *Canadian Journal of Soil Science* 91, 375-384.
- Landmaatschappij, V., 2018. Mestrapport 2018. Vlaamse Landmaatschappij, Brussel.
- Lee, A., Prasad, M., Cassidy, J., Gaffney, M.T., 2012. Plant available nitrogen and phosphorus from composted waste materials. ORBIT2012: Global assessment for organic resources and waste management: Assessment of technologies for optimal organics management processes and enlightened environmental policies.
- Legrand, G., Roisin, C., Bries, J., Destain, J.-P., 2012. PK bemesting in de biet: Bedenkingen op de lange termijn! , *De Bietplanter*. vzw CBB, Brussel, pp. 7-8.
- Li, X., Dong, C.X., Liu, Y.R., Liu, Y.X., Shen, Q.R., Xu, Y.C., 2012. Interactive effects from combining inorganic and organic fertilisers on phosphorus availability. *Soil Research* 50, 607-615.
- Lookman, R., Freese, D., Merckx, R., Vlassak, K., van Riemsdijk, W.H., 1995. Long-term kinetics of phosphate release from soil. *Environmental Science & Technology* 29, 1569-1575.
- Maas, E.V., 1985. CROP TOLERANCE TO SALINE SPRINKLING WATER. *Plant and Soil* 89, 273-284.
- Malda, J.T., Rutgers, R., 2012. Fosfaat (rijen)bemesting in zaaiuien. Dronten.
- Mallarino, A.P., Barcos, S.R., Prater, J.R., Wittry, D.J., 2009. Timing of Broadcast Phosphorus Fertilization for No-Till Corn and Soybean. *Soil Science Society of America Journal* 73, 2143-2150.
- McDowell, R.W., 2015. Treatment of pasture topsoil with alum to decrease phosphorus losses in subsurface drainage. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 207, 178-182.
- McDowell, R.W., Condron, L.M., Stewart, I., 2016. Variation in environmentally- and agronomically-significant soil phosphorus concentrations with time since stopping the application of phosphorus fertilisers. *Geoderma* 280, 67-72.
- McDowell, R.W., Sharpley, A.N., 2004. Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer. *Agriculture Ecosystems & Environment* 102, 17-27.
- McLaren, T.I., McBeath, T.M., Simpson, R.J., Richardson, A.E., Stefanski, A., Guppy, C.N., Smernik, R.J., Rivers, C., Johnston, C., McLaughlin, M.J., 2017. Direct recovery of P-33-labelled fertiliser phosphorus in subterranean clover (*Trifolium subterraneum*) pastures under field conditions - The role of agronomic management. *Agriculture Ecosystems & Environment* 246, 144-156.
- McPharlin, I.R., Robertson, W.J., 1997. Response of spring-planted lettuce (*Lactuca sativa* L.) to freshly-applied and residual phosphorus and to phosphate fertiliser placement on a Karrakatta sand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 37, 701-708.
- McPharlin, I.R., Robertson, W.J., 1999. Response of onions (*Allium cepa* L.) to phosphate fertiliser placement and residual phosphorus on a Karrakatta sand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 39, 351-359.

- McPharlin, I.R., Robertson, W.J., Jeffery, R.C., Weissberg, R., 1995. Response of cauliflower to phosphate fertilizer placement and soil test phosphorus calibration on a Karrakatta sand. *Commun. Soil Sci. Plant Analysis* 26, 607-620.
- Messiga, A.J., Ziadi, N., Plenet, D., Parent, L.E., Morel, C., 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use and Management* 26, 354-364.
- Murphy, P.N.C., Stevens, R.J., 2010. Lime and gypsum as source measures to decrease phosphorus loss from soils to water. *Water Air and Soil Pollution* 212, 101-111.
- Nawara, S., 2018. PhD thesis: The availability of phosphorus in a soil depleting scenario. KU Leuven, Leuven.
- Nawara, S., Van Dael, T., Merckx, R., Amery, F., Elsen, A., Odeurs, W., Vandendriessche, H., McGrath, S., Roisin, C., Jouany, C., Pellerin, S., Denoroy, P., Eichler-Lobermann, B., Borjesson, G., Goos, P., Akkermans, W., Smolders, E., 2017. A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe. *European Journal of Soil Science* 68, 873-885.
- Nelissen, V., Ruyschaert, G., Manka'Abusi, D., D'Hose, T., De Beuf, K., Al-Barri, B., Cornelis, W., Boeckx, P., 2015. Impact of a woody biochar on properties of a sandy loam soil and spring barley during a two-year field experiment. *European Journal of Agronomy* 62, 65-78.
- O' Flynn, C.J., Fenton, O., Healy, M.G., 2012. Evaluation of amendments to control phosphorus losses in runoff from pig slurry applications to land. *Clean-Soil Air Water* 40, 164-170.
- Ogaard, A.F., Brod, E., 2016. Efficient Phosphorus Cycling in Food Production: Predicting the Phosphorus Fertilization Effect of Sludge from Chemical Wastewater Treatment. *J. Agric. Food Chem.* 64, 4821-4829.
- Pegtel, D.M., Bakker, J.P., Verweij, G.L., Fresco, L.F.M., 1996. N, K and P deficiency in chronosequential cut summer-dry grasslands on gley podzol after the cessation of fertilizer application. *Plant and Soil* 178, 121-131.
- Pizzeghello, D., Berti, A., Nardi, S., Morari, F., 2016. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution in three soils after long-term mineral and manure application. *Agriculture Ecosystems & Environment* 233, 214-223.
- Poulton, P.R., Johnston, A.E., White, R.P., 2013. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. *Soil Use and Management* 29, 4-11.
- Pronk, A., Smit, B., de Ruijter, F., 2013. Row application of fertilizers, manure and manure fractions to increase nutrient use efficiency. In: D'Haene, K., Vandecasteele, B., De Vis, R., Crappé, S., Callens, D., Mechant, E., Hofman, G., De Neve, S. (Eds.), *Nutrihort*.
- Prummel, J., Sissingh, H.A., 1983. Fosfaatwerking van dierlijke mest. *Bedrijfsontwikkeling*, p. 4.
- Prummel, J., van Barnau Sijthoff, P.A., 1975. Rijenbemesting met fosfaat bij stamslabonen en tuinbonen. *Bedrijfsontwikkeling* 6, 173-175.
- Reijneveld, J.A., Verloop, J., Hilhorst, G.J., 2003. Sanering van zandgrond met een hoge fosfaattoestand. Resultaten van een veldexperiment op proefbedrijf De Marke. Wageningen.
- Research, R., 2012. Guide to the classical and other long-term experiments. 1st print 2006. 52.
- Rollett, A., Sylvester-Bradley, R., Bhogal, A., Ginsburg, D., Griffin, S., Withers, P., 2017. Apparent soil phosphate requirements. Report on Work-Package 1 of Research project NO. 2160004 Cost-effective phosphorus management on UK arable farms. AHDB, UK.
- Sanchez, C.A., Porter, P.S., Ulloa, M.F., 1991. Relative Efficiency of Broadcast and Banded Phosphorus for Sweet Corn Produced on Histosols. *Soil Science Society of America Journal* 55, 871-875.
- Sattari, S.Z., Bouwman, A.F., Giller, K.E., van Ittersum, M.K., 2012. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, 6348-6353.

- Schärer, M., Stamm, C., Vollmer, T., Frossard, E., Oberson, A., Flühler, H., Sinaj, S., 2007. Reducing phosphorus losses from over-fertilized grassland soils proves difficult in the short term. *Soil Use and Management* 23, 154-164.
- Scholefield, D., Sheldrick, R.D., Martyn, T.M., Lavender, R.H., 1999. A comparison of triple superphosphate and Gafsa ground rock phosphate fertilisers as P-sources for grass-clover swards on a poorly-drained acid clay soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 53, 147-155.
- Schoumans, O., 2004. Inventarisatie van de fosfaatverzadiging van landbouwgronden in Nederland. Wageningen.
- Schoumans, O.F., Chardon, W.J., 2015. Phosphate saturation degree and accumulation of phosphate in various soil types in The Netherlands. *Geoderma* 237-238, 325-335.
- Schoumans, O.F., Kruijne, R., 1995. Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden. Wageningen.
- Schoumans, O.F., Rulkens, W.H., Oenema, O., Ehlert, P.A.I., 2010. Phosphorus recovery from animal manure; Technical opportunities and agro-economical perspectives., Wageningen.
- Schröder, J.J., Ten Holte, L., Brouwer, G., 1997. Response of silage maize to placement of cattle slurry. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 45, 249-261.
- Schröder, J.J., Vermeulen, G.D., van der Schoot, J.R., van Dijk, W., Huijsmans, J.F.M., Meuffels, G.J.H.M., van der Schans, D.A., 2015. Maize yields benefit from injected manure positioned in bands. *European Journal of Agronomy* 64, 29-36.
- Sharpley, A.N., McDowell, R.W., Kleinman, P.J.A., 2001. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. *Plant and Soil* 237, 287-307.
- Sharpley, A.N., Rekolainen, S., 1997. Phosphorus in agriculture and its environmental implications. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C., Johnston, A.E. (Eds.), *Phosphorus loss from soil to water*. CAB International, Cambridge, pp. 1-53.
- Shreve, B.R., Moore, P.A., Miller, D.M., Daniel, T.C., Edwards, D.R., 1996. Long-term phosphorus solubility in soils receiving poultry litter treated with aluminum, calcium, and iron amendments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 27, 2493-2510.
- Shuai, X., Yost, R.S., Wendroth, O., 2014. State-space estimation of the intrinsic soil phosphorus pools from soil phosphorus tests. *Geoderma* 214, 239-245.
- Sistani, K.R., Mays, D.A., Dawkins, R.A., 2006. Tall fescue fertilized with alum-treated and untreated broiler litter: Runoff, soil, and plant nutrient content. *Journal of Sustainable Agriculture* 28, 109-119.
- Smit, A.L., de Willigen, P., Pronk, A.A., 2009. Plaatsing als strategie voor een efficiëntere fosfaatbemesting. 1. Literatuur en modelonderzoek. Wageningen.
- Smit, B., 2012. Rijenbemesting met fosfaat: meer met minder. *Methode werkt in droog voorjaar*. *Nieuwe Oogst*, pp. 20-20.
- Smith, D.R., Moore, P.A., Maxwell, C.V., Haggard, B.E., Daniel, T.C., 2004. Reducing phosphorus runoff from swine manure with dietary phytase and aluminum chloride. *Journal of Environmental Quality* 33, 1048-1054.
- Smith, K.A., Chalmers, A.G., Chambers, B.J., Christie, P., 1998. Organic manure phosphorus accumulation, mobility and management. *Soil Use and Management* 14, 154-159.
- Smith, K.A., van Dijk, T.A., 1987. Utilisation of phosphorus and potassium from animal manures on grassland and forage crops. In: van der Meer, H.G., Unwin, R.J., van Dijk, T.A. (Eds.), *Animal manure on grassland and fodder crops*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 87-102.
- Smolders, E., Baetens, E., Verbeeck, M., Nawara, S., Diels, J., Verdievel, M., Peeters, B., De Cooman, W., Bakens, S., 2017. Internal loading and redox cycling of sediment iron explain reactive phosphorus concentrations in lowland rivers. *Environmental Science & Technology* 51, 2584-2592.



- Sorensen, J.N., 2013. Phosphorus placement for bulb onions - rates and distances. In: D'Haene, K., Vandecasteele, B., De Vis, R., Crappé, S., Callens, D., Mechant, E., Hofman, G., De Neve, S. (Eds.), *Nutrihort*, pp. 117-123.
- Spiegel, H., Lindenthal, T., Mazorek, M., Ploner, A., Freyer, B., Kochl, A., 2001. Results of three long-term P-field experiments in Austria. First report: Effects of different types and quantities of P-fertiliser on yields and P-CAL/DL-contents in soils. *Bodenkultur* 52, 3-17.
- Stutter, M.I., 2015. The composition, leaching, and sorption behavior of some alternative sources of phosphorus for soils. *Ambio* 44, S207-S216.
- Syers, J.K., Johnston, A.E., Curtin, D., 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, Rome.
- Talboys, P.J., Heppell, J., Roose, T., Healey, J.R., Jones, D.L., Withers, P.J.A., 2016. Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? *Plant and Soil* 401, 109-123.
- Tewelde, H., Way, T.R., Pote, D.H., Adeli, A., Brooks, J.P., Shankle, M.W., 2013. Method of soil sampling following subsurface banding of solid manures. *Agronomy Journal* 105, 519-526.
- Timmermans, B.G.H., van Eekeren, N., 2016. Phytoextraction of soil phosphorus by potassium-fertilized grass-clover swards. *Journal of Environmental Quality* 45, 701-708.
- Tits, M., Elsen, A., Deckers, S., Boon, W., Bries, J., Vandendriessche, H., 2016. Bodemvruchtbaarheid van de akkerbouw- en weilandpercelen in België en Noordelijk Frankrijk (2012-2015). *Bodemkundige Dienst van België*.
- Ulén, B., 1999. Leaching and balances of phosphorus and other nutrients in lysimeters after application of organic manures or fertilizers. *Soil Use and Management* 15, 56-61.
- Ulen, B., Etana, A., 2014. Phosphorus leaching from clay soils can be counteracted by structure liming. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 64, 425-433.
- Uusitalo, R., Ylivainio, K., Hyvaluoma, J., Rasa, K., Kaseva, J., Nylund, P., Pietola, L., Turtola, E., 2012. The effects of gypsum on the transfer of phosphorus and other nutrients through clay soil monoliths. *Agricultural and Food Science* 21, 260-278.
- Vadas, P.A., Jokela, W.E., Franklin, D.H., Endale, D.M., 2011. The effect of rain and runoff when assessing timing of manure application and dissolved phosphorus loss in runoff. *Journal of the American Water Resources Association* 47, 877-886.
- van Dam, A.M., Ehlert, P.A.I., 2008. Beschikbaarheid van fosfaat in organische meststoffen. Een studie voor bollenteelt in het westelijk zandgebied., Lisse.
- Van de Ven, G., 2014. Rijenbemesting met mengmest bij maïs. Geel.
- Van der Pauw, F., 1937. Het tijdstip van de aanwending van Thomasslakkenmeel. *Landbouwkundig tijdschrift* 51, 621-628.
- van der Salm, C., Chardon, W.J., Koopmans, G.F., van Middelkoop, J.C., Ehlert, P.A.I., 2009. Phytoextraction of phosphorus-enriched grassland soils. *Journal of Environmental Quality* 38, 751-761.
- van der Salm, C., van Middelkoop, J.C., Ehlert, P.A.I., 2017. Changes in soil phosphorus pools of grasslands following 17yrs of balanced application of manure and fertilizer. *Soil Use and Management* 33, 2-12.
- van der Zee, S.E.A.T.M., van Riemsdijk, W.H., de Haan, F.A.M., 1990. Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel I: Toelichting. Wageningen.
- van Dijk, T.A., Wander, J., Veldhorst, G.J., 2010. Rijenbemesting in korrelmaïs, proefveld 2009. Wageningen.
- van Dijk, W., Dekker, P.H.M., Postma, R., Moolenaar, S.W., 2007a. Bodembeheer op akkerbouwbedrijven in relatie tot het mineralenbeleid. Lelystad.

- van Dijk, W., Dekker, P.H.M., ten Berge, H.F.M., Smit, A.L., van der Schoot, J.R., 2007b. Aanscherping van fosfaatgebruiksnormen op bouwland bij akker- en tuinbouwgewassen: Verkenning van noodzaak en mogelijkheden tot differentiatie. Lelystad.
- van Dijk, W., van Geel, W., 2012. Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen. Lelystad.
- van Eekeren, N., Iepema, G., Smeding, F., 2007. Natuurherstel in grasland door klaver en kalibemesting. *De Levende Natuur*, pp. 27-31.
- van Geel, W., 2012. Verhoging benutting stikstof en fosfaat door rijenbemesting. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving*, Lelystad.
- van Keulen, H., Aarts, H.F.M., Habekotté, B., van der Meer, H.G., Spiertz, J.H.J., 2000. Soil-plant-animal relations in nutrient cycling: the case of dairy farming system 'De Marke'. *European Journal of Agronomy* 13, 245-261.
- van Middelkoop, J., 2007. Tien jaar fosfaatevenwichtsbemesting op grasland: bodemvruchtbaarheid daalt langzaam. *V-focus*.
- van Middelkoop, J., van Schooten, H., 2010. Fosfaatbemesting in maïs: hoe scherp kan het? , *V-focus*. AgriMedia, Wageningen, pp. 15-17.
- 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? *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 106, 93-111.
- van Schooten, H., 2010. Rijenbemesting met drijfmest in maïs met GPS-besturing. Wageningen.
- van Wijk, C., de Haan, J.J., Ehlert, P.A.I., van den Berg, W., 2013. Lange termijn effecten van fosfaatbalansen op bouwland; fosfaattrappen proefveld Lelystad. Wageningen.
- Vandecasteele, B., Reubens, B., Willekens, K., De Neve, S., 2014. Composting for increasing the fertilizer value of chicken manure: effects of feedstock on P availability. *Waste and Biomass Valorization*.
- Vandecasteele, B., Sinicco, T., D'Hose, T., Vanden Nest, T., Mondini, C., 2016. Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake. *Journal of Environmental Management* 168, 200-209.
- Vanden Nest, T., Ruysschaert, G., Vandecasteele, B., Cougnon, M., Merckx, R., Reheul, D., 2015. P availability and P leaching after reducing the mineral P fertilization and the use of digestate products as new organic fertilizers in a 4-year field trial with high P status. *Agriculture Ecosystems & Environment* 202, 56-67.
- Vanden Nest, T., Ruysschaert, G., Vandecasteele, B., Houot, S., Baken, S., Smolders, E., Cougnon, M., Reheul, D., Merckx, R., 2016. The long term use of farmyard manure and compost: Effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching. *Agriculture Ecosystems & Environment* 216, 23-33.
- Vanden Nest, T., Vandecasteele, B., Ruysschaert, G., Cougnon, M., Merckx, R., 2014. Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C levels, crop yield and P leaching in a long term trial on a silt loam soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 197, 309-317.
- Vandendriessche, H., Geypens, M., Bries, J., 1994. Effecten van de beperking van de P-bemesting op de gewasproductie en de bodemvoorraad. Studie- en vervolmakingsdag 'Gebruik van reststoffen in de land- en tuinbouw'. K.V.I.V., pp. 57-70.
- Vanderdeelen, J., Boon, R., Piot, R., Baert, L., 1985. Phosphorus and potassium balance of long-term fertilizer trials on two Belgian loamy soils. *Pédologie* 35, 191-204.
- Vandermoere, S., De Neve, S., 2016. Iron coated sand/glaucanite filters for phosphorus removal from artificially drained agricultural fields. In: Krämer, I., Häberle, S. (Eds.), 8th International Phosphorus Workshop. September 12-16, 2016., Rostock, Germany, pp. 74-74.

- Verhaeghe, M., 2014. Plantbakbehandeling met startfosfor: lage dosis en toch mooie meeropbrengst. *Proeftuinnieuws*, pp. 22-23.
- Verlinden, G., Callens, D., 2005. Eindrapport van resteffluenten van de mestverwerking. Deel 1: Literatuurstudie. p. 37.
- Wang, J.J., 2013. Minimizing phosphorus mobility in animal manure and animal manure-impacted soils using bauxite residues. SLU Dept of Soil and Environment.
- Warren, J.G., Phillips, S.B., Mullins, G.L., Zelazny, L.W., 2006. Impact of alum-treated poultry litter applications on fescue production and soil phosphorus fractions. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1957-1966.
- Warrinnier, R., Goossens, T., Verbeeck, M., Vanden Nest, T., Amery, F., Smolders, E., 2017. Colloids mediate phosphate leaching in agricultural soil: observations and CD-MUSIC modelling. *Goldschmidt Abstracts*, 2017 4199. 14-18 August 2017.
- Withers, P.J.A., Clay, S.D., Breeze, V.G., 2001. Phosphorus transfer in runoff following application of fertilizer, manure, and sewage sludge. *Journal of Environmental Quality* 30, 180-188.
- Withers, P.J.A., Peel, S., Chalmers, A.G., Lane, S.J., Kane, R., 2000. The response of manured forage maize to starter phosphorus fertilizer on chalkland soils in southern England. *Grass and Forage Science* 55, 105-113.
- Withers, P.J.A., Ulen, B., Stamm, C., Bechmann, M., 2003. Incidental phosphorus losses - are they significant and can they be predicted? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde* 166, 459-468.
- Xin, X.L., Qin, S.W., Zhang, J.B., Zhu, A., Yang, W.L., Zhang, X.F., 2017. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting long-term chemical fertilizer use with organic manure in a wheat-maize system. *Field Crops Research* 208, 27-33.
- Yusiharni, B.E., Ziadi, H., Gilkes, R.J., 2007. A laboratory and glasshouse evaluation of chicken litter ash, wood ash, and iron smelting slag as liming agents and P fertilisers. *Australian Journal of Soil Research* 45, 374-389.
- Zhang, T., Hao, X., Tan, C., Welacky, T., Hong, J., 2013. Cumulative contributions of various forms of swine manure to soil test phosphorus in a clay loam soil under long-term corn-soybean rotation. SLU Dept of Soil and Environment.