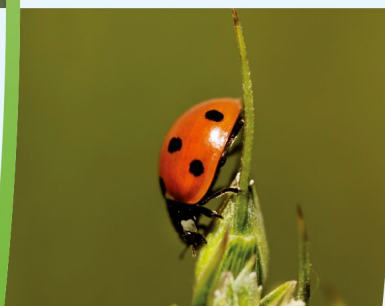


Soil for life



Rapport 1705.N.17

Samenstelling organische producten in relatie tot uitspoeling van fosfaat op zandgronden

Auteur(s): Dr. Ing. D. van Rotterdam

© 2018 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

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

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

Disclaimer

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

Verspreiding

Inhoud

	pagina
Samenvatting en conclusies	2
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doelstelling	2
2 Opzet en uitvoering	4
2.1 Meer grip op het karakteriseren en meten van de N- en P-beschikbaarheid van compost	4
2.2 Kolomproef naar het effect van compost op het risico van N- en P-uitspoeling	4
3 Resultaten organische stof en P-beschikbaarheid in organische producten	6
4 Resultaten uitspoelingsproef	8
4.1 Bodemeigenschappen	8
4.1.1 Fosfaatbalans	9
4.2 Start van de proef	10
4.3 Verandering over de tijd: algemene processen	12
4.4 Effect behandeling op P-uitspoeling	16
4.5 Samenvatting en conclusies uitspoelingsproef	17
5 Synthese: compost in relatie tot N- en P-uitspoeling	19
5.1 Theoretisch kader: P-uitspoeling in zandgronden	19
5.2 Organische meststoffen / bodemverbeteraars en P-uitspoeling	21
5.2.1 De directe interactie-effecten tussen organisch product en de bodem	21
5.2.2 De indirecte interactie-effecten tussen organisch product en de bodem	23
6 Conclusies	25
7 Dankwoord	26
8 Literatuurlijst	27

Samenvatting en conclusies

Belangrijkste conclusie

Deze studie laat zien dat de fosfaat (P) uitspoeling lager is bij het gebruik van organische bodemverbeteraars (hoog gehalte effectief organische stof en lage netto P-mineralisatie) dan bij het gebruik van organische meststoffen (laag gehalte effectief organische stof en hoge P-mineralisatie). De beschikbaarheid van P in het product speelt een rol maar ook het effect van de interactie van het product met de bodem. De milieuwinst als gevolg van het toepassen van organische bodemverbeteraars in plaats van organische meststoffen kan met name worden bereikt voor uitspoelingsgevoelige gronden die (sterk) zijn opgeladen met fosfaat. Dit is relevant omdat meer dan de helft van de Nederlandse landbouwgronden fosfaatverzadigd is met een verhoogd risico op P-uitspoeling naar het ondiepe grondwater. In het zesde actieprogramma nitraatrichtlijn wordt voor bodems met een fosfaattoestand dat gedefinieerd is als hoog, het gebruik van organische bodemverbeteraars gestimuleerd. Dit onderzoek toont aan dat dit beleid bijdraagt aan het beperken van P-uitspoeling.

Aanleiding en doelstelling

Binnen de landbouw is het op peil houden van het organische stofgehalte van de bodem belangrijk voor het waarborgen van de bodemkwaliteit en de ecosysteemdiensten die de bodem levert. Een voldoende hoge organische stofgehalte in de bodem is met name van belang op de van nature armere zandgronden. Organische stof kan worden aangevoerd in de vorm van organische meststoffen en bodemverbeteraars. De totale hoeveelheid die van deze producten mag worden toegediend wordt beperkt door de fosfaat (P) gebruiksnormen. Primaire doel van organische meststoffen is het voeden van de plant met nutriënten en van de bodemverbeteraars is het primaire doel om de bodemkwaliteit op peil te houden of te brengen.

In opdracht van de vereniging afvalbedrijven (VA) is door NMI BV de samenstelling van verschillende organische producten onderzocht in relatie tot de uitspoeling van fosfaat (P) op zandgronden.

Karakterisatie organische producten

De mineralisatie snelheid van het organische stof, de directe beschikbaarheid en het beschikbaar komen van fosfaat door mineralisatie is gekarakteriseerd voor compost, bermmaaisel en drijfmest met een aangepaste Oxitop® methode. Dit onderdeel is uitgevoerd door Milieutechnologie (WUR).

Voor runderdrijfmest was de hoeveelheid mineraliseerbare organische stof en de afbraaksnelheid ongeveer 20 x hoger dan bij compost. Ondanks dat in de runderdrijfmest het totale P-gehalte bijna 5 keer lager was dan in compost, was de P die vrijkwam door mineralisatie 3 keer hoger dan in compost. Zowel de P-gehalten van de organische producten als de verhouding tussen het gehalte effectieve organische stof en het P-gehalte bleken niet representatief te zijn voor de netto P-mineralisatie.

Uitspoeling van fosfaat

Het effect van het toedienen van verschillende organische meststoffen en bodemverbeteraars op de uitspoeling van P is onderzocht in een kolomproef. De onderzochte organische producten waren compost, bermmaaisel dat al drie maanden op het veld lag, vaste mest en drijfmest. De proef is uitgevoerd op twee zandgronden die beide een hoge fosfaattoestand hadden, maar voor de rest sterk verschilden in eigenschappen.

De kolomproef toont aan dat het binnen de P-gebruiksnorm toedienen van compost en bermmaaisel (dat al een aantal maanden op het veld heeft gelegen en binnen de gebruiksnormen niet meetelt), **niet** leidt tot een verhoging van de P-uitspoeling op twee zeer uiteenlopende zandgronden ten opzichte van de controle behandeling waaraan niets is toegediend. Het toedienen van vaste mest leidt wel tot een verhoogde P-

uitspoeling. Op één van de twee gronden leidt ook het toedienen van drijfmest tot een verhoogde P-uitspoeling. Kanttekening hierbij is dat voor één van de gronden de omstandigheden in de kolom anaerob werden. Voor de andere grond was de P-concentratie en de totale P-vracht in het effluent zeer laag.

Conceptuele onderbouwing van de resultaten

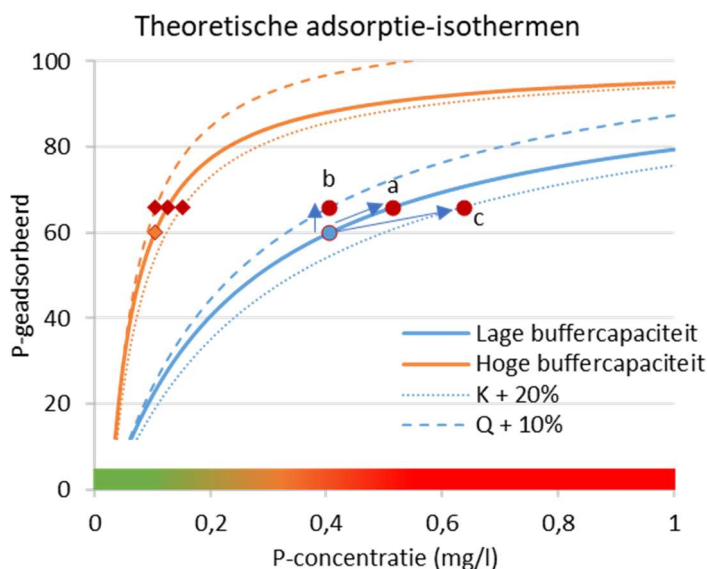
Het effect van het toedienen van organische meststoffen dan wel organische bodemverbetersaars op de uitspoeling van P uit de bodem wordt bepaald door:

- De bodem; de bodem bepaalt het concentratieniveau waarmee P uitspoelt en is een functie van een combinatie van een maat voor de P-concentratie in de bodemoplossing, de hoeveelheid geadsorbeerd P en het adsorptiemaximum van de bodem (sorptie-isotherm, Figuur 1);
- De P-beschikbaarheid van het toegevoegde product; die kan worden gemeten met de aangepaste Oxitop® methode;
- De interactie tussen product en bodem en met name het effect op de adsorptiecapaciteit van de bodem.

De uiteindelijke P-uitspoeling wordt dus in de bodem gedictieerd door het 'natuurlijke' evenwicht tussen de P-concentratie in de bodemoplossing en het adsorptiecomplex in de bodem. Het toedienen van producten die P bevatten verandert de fosfaattoestand van de bodem. Het toegevoegde P zal, afhankelijk van het product snel, of minder snel vrijkomen. Het P dat vrijkomt kan in de bodem aan het adsorptiecomplex adsorberen of in de bodemoplossing terecht komen. De mate waarin het toedienen van een bepaald organisch product de P-concentratie in de bodemoplossing verandert, en daarmee de P-uitspoeling, is afhankelijk van:

- de adsorptie-isotherm van de bodem, én;
- de mate waarin het product deze adsorptie-isotherm beïnvloed.

Producten kunnen op verschillende manieren de adsorptie-isotherm beïnvloeden (Figuur 1). Factoren die van invloed kunnen zijn, zijn de aanwezigheid van minerale delen in het product zelf, de aanwezigheid van vrij calcium in het product, de interactie tussen het bodemoppervlak en kleine- en grotere organische moleculen in de toegediende producten. Het wordt aanbevolen om de belangrijkste interactieprocessen tussen organische (mest)stof en bodem nader te onderzoeken om het netto effect op P-uitspoeling beter te kunnen duiden en bovenstaande hypothese te onderbouwen. :



Figuur 1. Twee theoretische adsorptie-isothermen; één met een lage buffercapaciteit (blauwe lijn) en één met een hoge buffercapaciteit bij lage P-concentratie (oranje lijn). Naast deze doorgetrokken lijnen zijn ook de situaties weergegeven wanneer het adsorptiemaximum wordt verhoogd met 10% (gestreepte lijnen) en wanneer de sorptieconstante met 20% wordt verlaagd (gestippelde lijnen). De gekleurde balk geeft een inschatting van het risico op P-emissie naar het watersysteem.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De mogelijkheden om organische stof aan te voeren via organische meststoffen en bodemverbeteraars aan de bodem zijn de afgelopen jaren beperkt door een aanscherping van gebruiksnormen (vooral voor fosfaat). Op basis van de plannen voor het 6^{de} Actieprogramma nitraatrichtlijn (AP, 2018-2021) lijkt er meer ruimte te komen voor het gebruik van compost binnen de fosfaatgebruiksnormen (kamerbrief van Van Dam van 4 juli 2017). Wanneer de fosfaattoestand 'neutraal' is zullen de fosfaatgebruiksnormen worden verruimd om deze beter in balans te brengen met de fosfaatonttrekking. Waar de fosfaattoestand 'hoog' is zullen de gebruiksnormen worden verlaagd. Daarnaast wordt ook het stimuleren van het gebruik van bodemverbeterende meststoffen een speerpunt in het 6^{de} AP. Daarom wordt het mogelijk de verlaagde fosfaatgebruiksnorm op bouwlandpercelen met fosfaattoestand 'hoog' te compenseren. Voorwaarde is dat van de totale gift een wezenlijk deel (>20 kg P₂O₅/ha) bestaat uit bodemverbeterende meststoffen met een hoog organische stofgehalte, bijvoorbeeld GFT-compost, groencompost of strotijke mest.

Daarnaast wordt in het 6^{de} AP ingezet op regio specifiek maatwerk, inclusief de mogelijkheid tot versoepeling van regels. Bedrijfsspecifiek afrekenen is een wens maar kan nog niet worden geborgd, ook niet door de kringloopwijzer. Regio-specifiek maatwerk houdt in dat in gebieden waar bijvoorbeeld op droge, uitspoelingsgevoelige gronden een probleem is met N-uitspoeling (zuidelijke zand- en lössgronden) er mogelijk meer ruimte komt voor een maatwerkoplossing. Versoepeling van regels wordt ook expliciet genoemd. Momenteel zijn er veel verschillende initiatieven vanuit zowel waterschappen als (lokale) overheden die landbouw-bodem gerelateerde knelpunten koppelen aan mitigerende maatregelen. Een positieve organische stofbalans op bedrijfsniveau in combinatie met een meerjarenplan wordt als één van de belangrijke maatregelen gezien. Deze maatregel is op perceelsniveau ook onderdeel van Milieukeur.

Randvoorwaarden voor een (regio-)specifieke versoepeling van regels kunnen worden afgeleid van de eisen die zijn gesteld aan bedrijfsspecifieke verantwoording (Kamerbrief Kamp 7-9 2017) en zijn onder andere:

1. De systematiek is wetenschappelijk gevalideerd; en
2. Het gebruik leidt niet tot negatieve consequenties voor het milieu, en bij voorkeur tot een voordeel. Milieuneutraliteit geldt niet alleen voor de specifieke ondernemer, maar ook voor de groep ondernemers als geheel.

Zowel de algemene aanpassingen van de fosfaatgebruiksnormen als het regiospecifieke maatwerk lijken meer ruimte te bieden voor het gebruik van bodemverbeteraars zoals compost. Ook in de vele initiatieven om met maatwerk de bodem- en agrarische waterkwaliteit te verbeteren wordt een positieve organische stofbalans benadrukt. Dit moet echter niet leiden tot negatieve consequenties voor het milieu en bij voorkeur tot positieve. Het is dan ook van belang om op basis van een degelijke onderbouwing de mogelijkheden te vergroten om organische stof aan te voeren, zonder dat dat leidt tot een toename van uitspoeling van stikstof en fosfaat. Het in dit rapport beschreven onderzoek naar de relatie tussen verschillende organische producten en de uitspoeling van nutriënten draagt hier aan bij.

In een eerdere verkennende bureaustudie (Van Rotterdam & Postma, 2016) is nagegaan wat het effect is van compostgebruik op de fosfaatbeschikbaarheid en – uitspoeling uit de bodem. De resultaten lieten een grote spreiding zien. Verschillende factoren, zoals fosfaattoestand van de bodem, tijd, en de gebruikte meetmethode zijn van belang voor het vaststellen van de werkingscoëfficiënt van compost ten opzichte van een referentiemeststof, zoals tripelsuperfosfaat (TSP). Aanbevolen werd om nader te specificeren onder welke omstandigheden de P-uitspoeling positief wordt beïnvloed door het gebruik van organische bodemverbeteraars, en wat de randvoorwaarden zijn wat betreft de productsamenstelling. Een uitgebreide

studie in België laat zien dat de uitspoeling van P uit compost lager is dan uit dierlijke mest (VandenNest et al., 2016). Dit zou er voor kunnen pleiten om in bepaalde situaties (bijvoorbeeld op gronden met een hoge fosfaatverzadigingsgraad) de voorkeur te geven aan compost ten opzichte van dierlijke mest. Dit sluit ook aan bij de ontwikkelingen in het 6^{de} AP: maatwerk – zonder afwenteling.

Net als voor fosfaat bestaat er ook geen eenduidigheid over de relatie tussen organische stofaanvoer en nitraatuitspoeling. Op basis van rekenmodellen lijkt het gebruik van organische stof tot grotere N-overschotten en daardoor tot een hogere nitraat-uitspoeling te leiden (onder andere Schröder et al., 2007). Dit lijkt niet overeen te komen met de resultaten van het bedrijfssystemenonderzoek 'Bodemkwaliteit op zand', waar het systeem met de hoogste aanvoer van organische stof leidde tot de laagste nitraatuitspoeling (De Haan, 2016). In een recent gestart project (Toplaag project van R. Postma, NMI) worden op twee locaties meerjarige veldproeven met bodemverbeteraars aangelegd. De proef vindt plaats op droogtegevoelige zandgrond met een laag organische stofgehalte in een akkerbouwrotatie en op maïs waar het risico op nitraatuitspoeling hoog is, zodat de verwachte effecten van een toediening van organische meststoffen en/of bodemverbeteraars zo groot mogelijk zijn.

Om de discussie rond organische stofaanvoer zonder afwenteling op nutriëntemissies beter te duiden lijkt het zinvol om onderscheid te maken tussen organische meststoffen en bodemverbeteraars. Organische meststoffen worden primair ingezet voor de levering van nutriënten. Bodemverbeteraars worden daarentegen primair ingezet voor de levering van organische stof. Er is een voorstel gedaan (Veeken et al., 2017) om een onderscheid te maken tussen organische meststoffen en bodemverbeteraars op basis van de verhouding tussen de hoeveelheid effectieve organische stof (EOS) enerzijds en beschikbare nutriënten (voor stikstof in de vorm van nitraat en ammonium (N_{min}) en voor fosfaat op basis van het totaalgehalte) anderzijds. Voorgestelde grenswaarden liggen bij een EOS/N_{min} van 150 kg/kg en bij een EOS/P₂O₅ van 35 kg/kg. Als de actuele waarden voor beide parameters hoger zijn dan de grenswaarden is sprake van een bodemverbeteraar en als ze (of één van beide) lager zijn van een organische meststof. Een nadere onderbouwing van deze grenswaarden is gewenst.

Ook in België zijn 2 indices ontwikkeld om te kunnen beoordelen of producten mineralenrijk of mineralenarm - humusrijk zijn door de link te leggen tussen EOS en nutriënten (onderzoek van de OVAM, 2002):

Index 1: $(\%OC * \%EOS) / (\%N_{tot} * 10)$

Index 2: $(\%OC * \%EOS) / ((\%N_{tot} + 5 * \%P_{tot}) * 10)$

Index 1 houdt rekening met de verhouding tussen de absolute hoeveelheid effectieve organische stof (berekend op droge stofinhoud) en de totale stikstofinhoud. Binnen het nutriëntenbeheer in Vlaanderen is, net als in Nederland, de fosforinhoud minstens even belangrijk als het stikstofgehalte van organisch materiaal dat aan de bodem wordt toegediend. Index 2 houdt daarom rekening met de fosforinhoud van het materiaal.

1.2 Doelstelling

Om nader te onderbouwen en af te bakenen wat het effect is van het toedienen van verschillende organische producten aan de bodem op fosfaat- en stikstofuitspoeling door:

1. Meer grip op het karakteriseren van de N- en P-beschikbaarheid van compost ten opzichte van andere organische reststromen (van organische mest tot onbewerkt plantaardig materiaal) met de Oxitop® methode. Het gaat daarbij expliciet om de directe beschikbaarheid en het beschikbaar komen van nutriënten door mineralisatie in relatie tot het gehalte aan effectieve organische stof (EOS). Dit onderdeel is een samenwerking met de afdeling Milieutechnologie, WUR waar de karakterisatie en methode-

ontwikkeling is uitgevoerd;

2. Een kolomproef naar het effect van compost op het risico van (N- en) P-uitspoeling ten opzichte van het toedienen van bermmaaisel, vaste mest en drijfmest op twee sterk van elkaar verschillende zandgronden; en
3. Een verdiepende studie naar de intrinsieke eigenschappen van verschillende organische reststromen en het effect van het toedienen aan uitspoelingsgevoelige zandgronden op de (N- en) P-uitspoeling.

2 Opzet en uitvoering

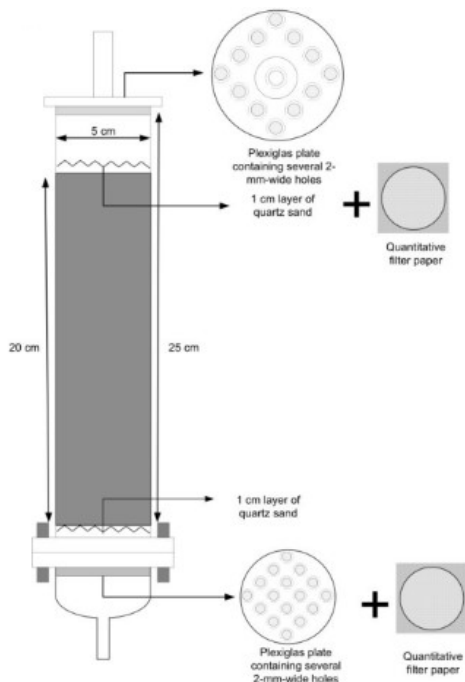
2.1 Meer grip op het karakteriseren en meten van de N- en P-beschikbaarheid van compost

Bij Milieutechnologie (Wageningen Universiteit) is onderzocht wat de mogelijkheden zijn om met de Oxitop® methode naast de beschikbaarheid van N ook de beschikbaarheid van P te bepalen in verschillende organische producten waaronder compost. De afbraak en afbraaksnelheid van het organische materiaal en het beschikbaar komen van N uit organische producten wordt met de Oxitop® methode bepaald door in een aerobe incubatie de cumulatieve zuurstof opname en de zuurstofopnamesnelheid te meten onder optimale omstandigheden in een gestandaardiseerde suspensie. Deze worden gecreëerd door naast vocht en lucht (geen grond), extra nutriënten en een pH-buffer toe te voegen. Deze methode is niet geschikt om de P-mineralisatie te meten omdat met de pH-buffer en de nutriënten oplossing P wordt toegevoegd. Onderzocht is of een andere buffer (MOPS in plaats van een fosfaatbuffer) gebruikt kan worden en wat de experimentele omstandigheden zijn om de potentiële netto mineralisatie van zowel N als P te meten. Metingen met de aangepaste methode zijn uitgevoerd aan gft-compost, bermmaaisel en runderdrijfmest. Hiervoor zijn monsters van dezelfde organische (mest)stoffen gebruikt die ook voor de kolomproef zijn gebruikt.

2.2 Kolomproef naar het effect van compost op het risico van N- en P-uitspoeling

Een kolomproef is uitgevoerd om het effect van verschillende organische producten op N- en P-uitspoeling uit twee zandgronden te onderzoeken. De zandgronden zijn afkomstig uit een bollenperceel in Noordwijk (Noord-Holland) en een gras/maïs perceel in Harreveld (Achterhoek). Zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** voor een schematische proefopstelling. De kolommen zijn van beneden naar boven gevuld met 1 grof filterpapier, 1 cm kwartzand, 10 cm grond, 10 cm grond met behandeling, 1 cm kwartzand. De kolommen stonden in een klimaatkamer met constante temperatuur van 18°C.

De vijf behandelingen bestonden uit het toevoegen van niets (controle), verschillende organische meststoffen (drijfmest en vaste mest), bodemverbeteraar (compost) en/of vers organisch materiaal in de vorm van bermmaaisel dat al 3 maanden in een bult op het perceel had gelegen. Deze producten lopen naar verwachting sterk uiteen ten aanzien van de levering van organische stof en nutriënten.



Figuur 2-1 Schematische weergave van de kolomopstelling (naar Zheng et al., 2012).

De aanvoer van P is voor de behandelingen met drijfmest en vaste mest gelijk aan 50 kg P_2O_5 /ha en in de behandelingen met compost en bermmaaisel is deze gelijk aan 100 kg P_2O_5 /ha. De totale aanvoer aan andere nutriënten verschilt tussen de behandelingen door verschillen in gehalten en werkingscoëfficiënten van de organische meststoffen. De samenstelling van de vier organische producten is gemeten volgens het voor dat product geldende standaardpakket van Eurofins-agro. Voor elk product is in ieder geval drogestof, organische stof, en de nutriënten N_{tot} , (N- NO_3), P, K, S, Mg en Ca gemeten.

De proef is in duplo uitgevoerd. De duplo kolommen zijn gevuld vanuit één bak waarin de bodem en behandeling zijn gemengd. Aan het begin van de proef zijn de kolommen op veldcapaciteit gebracht door deze te verzadigen met water en het overtollige water gedurende enige dagen op te vangen. Tijdens de proef is gedurende een periode van 8 weken elke 7 dagen 20 ml water op de kolommen gebracht. De totale hoeveelheid water die is toegevoegd (100 mm neerslagoverschot) komt overeen met een nat voorjaar. In een proefexperiment bleek dat de waterretentie van het toegevoegde water in de Noordwijk duinzand veel kleiner was dan de zandgrond uit Harreveld. Daarom is voor de kolommen met Harreveld grond het water op vrijdagmiddag 17:00 toegevoegd en is op de volgende dinsdagmorgen 10:00 het effluent bemonsterd (na 89 uur). Voor de Noordwijk grond is het water op maandagochtend 10:00 toegevoegd en is op dinsdagmorgen 10:00 het effluent bemonsterd (24 uur). De uitspoeling van N en P is gedurende de looptijd van de proef elke week gemeten. Monsters van het effluent zijn gefiltreerd over een 0,2 μm filter en gemeten met ICP-MS (totaal-analyse) en met anion specifieke (kleur)reacties die geautomatiseerd worden uitgevoerd en gemeten met een Discreet Analyser (DA). Met ICP zijn in het effluent de totaal gehalten van de elementen P, S, B, Na, Mg, Al, Fe, K, Ca, Mn, Zn, V, Co, Ni, Cu en Mo gemeten. Met de DA zijn de anionen PO_4 , Cl, SO_4 , NO_3 en NO_2 gemeten. Redox potentiaal en pH zijn niet gemeten. Voor P is zowel P-totaal als P-anorganisch gemeten waaruit ook P-organisch kan worden afgeleid. De met een kleurreactie gemeten fosfaat wordt ook 'dissolved reactive P' (DRP) genoemd. Voor N is naast nitraat en nitriet, in een deel van de monsters ook ammonium gemeten (Hach-lange cuvetten). Voor een betere duiding van de resultaten is ook het opgelost organische stof gemeten. Van een deel van de monsters is bij het Chemisch Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB) het TOC-gehalte gemeten. Voor een deel van de monsters is ook de UV-absorptie bij 254nm gemeten met een UV-VIS spectrofotometer als indicatie voor TOC (Amery et al., 2008).

De bodemsamenstelling (organische stof, pH, minerale samenstelling) en de voorraad en beschikbaarheid van de verschillende nutriënten (N, P, K, etc.) is van de twee uitgangsronden aan het begin van de proef gemeten en aan het eind van de proef van de verschillende behandelingen.

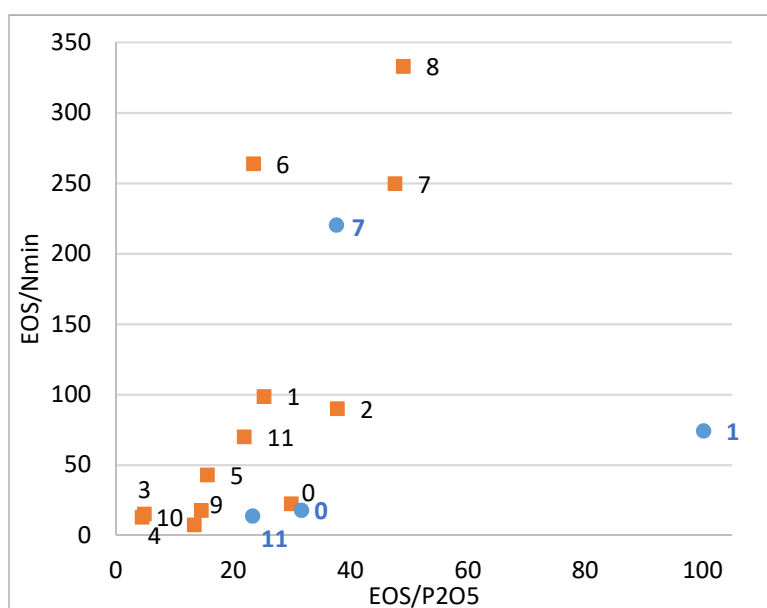
3 Resultaten organische stof en P-beschikbaarheid in organische producten

Het organische stofgehalte en de afbreekbaarheid van de organische stof verschillen per product. De afbreekbaarheid wordt uitgedrukt in de humificatiecoëfficiënt en is het percentage van de toegediende organische stof dat na een jaar nog over is, 'effectieve organische stof' (EOS) genoemd. Tabel 3-1 geeft een overzicht van de gemiddelde gehalten zoals gevonden in de literatuur aan organische stof en effectieve organische stof (EOS) en gemiddelde samenstelling van verschillende meststoffen en organische bodemverbeteraars (champost, strorijke vaste mest, digestaat van Cosun, berm- en slootmaaisel, vaste fractie van mestverwerking, gft- en groencompost, Postma en Veeken, 2017).

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van compost, bermmaaisel, vaste mest en drijfmest. In Tabel 3-2 staat de samenstelling van deze organische (mest)stoffen uitgedrukt per ton product. Dezelfde producten zijn gebuikt voor de uitspoelingsproef (Hoofdstuk 4).

Tabel 3-1 Gemiddelde samenstelling van 11 organische producten. RM staat voor rundermest en VDM voor varkensdrijfmest, dig. voor digestaat, DS voor drogestof, OS voor organische stof en HC voor humificatiecoëfficiënt (Postma en Veeken 2017).

	Product	DS kg/ton	OS kg/ton	HC	N-tot kg/ton	Nmin kg/ton	Norg kg/ton	NWC %	P ₂ O ₅ kg/ton	K ₂ O kg/ton
0	Runderdrijfmest	85	64	0,70	4,1	2,0	2,1	45-60	1,5	5,2
1	Vaste RM grupstal	267	155	0,70	7,7	1,1	6,6	40	4,3	8,8
2	Vaste RM potstal	247	167	0,70	6,1	1,3	4,8	40	3,1	9,9
3	Dikke fractie VDM	246	185	0,33	10,2	4,0	6,2	55	12,7	5,3
4	Dikke fractie VDM-dig	290	220	0,35	11,2	6,0	5,3	55	17,3	5,1
5	Dikke fractie RDM-dig	256	183	0,75	8,8	3,2	5,6	40	8,8	5,2
6	Champost	336	211	0,50	7,6	0,4	7,2	25	4,5	10,0
7	GFT-compost	652	222	0,90	7,8	0,8	7,0	10	4,2	6,7
8	Groencompost	594	185	0,90	5,3	0,5	4,8	10	3,4	6,9
9	Betafert vast (Cosun)	370	160	0,50	9,0	4,5	4,5	50	5,5	6,0
10	Betafert vloeibaar	75	40	0,50	4,0	2,7	1,3	50	1,5	5,5
11	Berm- & slootmaaisel	350	140	0,25	3,5	0,5	3,0	50	1,6	4,2



Figuur 3-1 Relatie tussen EOS/Nmin en EOS/P₂O₅ voor verschillende organische producten. De getallen komen overeen met de gemiddelde productsamenstelling (oranje datapunten, obv Tabel 3-1, Postma en Veeken, 2017). De blauwe datapunten zijn de producten die in de uitspoelingsproef zijn gebruikt.

Tabel 3-2 Samenstelling van de organische (mest)stoffen die zijn gebruikt in de uitspoelingsproef (Hoofdstuk 4). Samenstelling is uitgedrukt per kg product.

Product	kg P ₂ O ₅ /ton	kg K ₂ O/ton	kg Nt/ton	OS (g/kg)	DS (kg/ton)
Compost	5,2	9,4	9,0	218	585
Bermmaaisel	0,9	2,6	6,3	109	273
Vaste rundveemest	1,4	7,6	4,9	206	272
Runderdrijfmest	1,4	5,2	4,4	61	82

Een inzichtelijk manier om organische producten te karakteriseren is op basis van de verhouding tussen EOS/N_{min} en EOS/P₂O₅ (Postma et al., 2017) of op basis van EOS/P₂O₅ én EOS/N_{wz} (Staps et al., 2017 in opdracht van Stichting Milieukeur). Wanneer deze twee parameters tegen elkaar worden gezet worden verschillen tussen de producten duidelijk (Figuur 3-1). De dikke fracties uit verwerkte varkensdrijfmest (3 en 4 in Figuur 3-1) bevatten relatief veel fosfaat: met 1000 kg EOS wordt meer dan 200 kg P₂O₅ aangevoerd. Vooral gft- en groencompost springen eruit door zowel een hoge EOS/N_{min} als een hoge EOS/P₂O₅ (7 en 8 in Figuur 3-1). Per kg EOS wordt voor deze producten dus relatief weinig N en P aangevoerd.

Van de producten die zijn gebruikt in dit onderzoek zijn zowel de gebruikte compost als de runderdrijfmest in samenstelling vergelijkbaar met de landelijk gemiddelde samenstelling. De in de proef gebruikte vaste mest had echter een veel lager fosfaatgehalte dan het landelijk gemiddelde waardoor de EOS/P₂O₅ ratio ook veel hoger uitkomt (Figuur 3-1). Het in de proef gebruikte bermmaaisel had al enkele maanden op het veld gelegen waardoor een deel van het organische stof al was afgebroken en een deel van de mineralen, met name stikstof en het vrijgekomen P, al waren uitgespoeld.

Bij de afdeling Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit is van de compost, bermmaaisel en drijfmest monsters die in de uitspoelingsproef zijn gebruikt ook de afbraak (cumulatieve O₂ opname) afbraaksnelheid (O₂ opname snelheid) en netto P-mineralisatie gemeten met de Oxitop® methode (Tabel 3-3, resultaten Maurizio Degli Innocenti, MT-WU). Bermmaaisel heeft een iets hogere afbraak en afbraaksnelheid dan compost en de P die vrijkomt door mineralisatie is voor beide producten van dezelfde orde grootte. Voor de runderdrijfmest is de hoeveelheid mineraliseerbaar organische stof en de afbraaksnelheid ongeveer 20 x hoger dan in compost. Ondanks dat in de runderdrijfmest het P-gehalte bijna 5 keer lager is dan in compost (1, 4 versus 5,2 kg P₂O₅/ton product) is de P die vrijkomt door mineralisatie 3 keer hoger in runderdrijfmest dan in de compost. Compost heeft ook een ruim 5 keer hoger P-gehalte dan bermmaaisel maar het vrijkomen van P door mineralisatie is van dezelfde orde grootte. Het verschil in P-mineralisatie kan ook niet worden geduid door de verhouding EOS/P₂O₅. In de runderdrijfmest was deze verhouding (32) slechts beperkt lager dan de verhouding in compost (38). Op basis van deze verhouding zou de P-beschikbaarheid het laagst zijn voor het bermmaaisel.

Het is duidelijk dat zowel P-gehalten van de organische producten als de verhouding EOS/P₂O₅ niet representatief is voor de netto P-mineralisatie. De oorzaak hiervoor is dat de hoeveelheid gemineraliseerd organische stof en de mineralisatiesnelheid voor compost veel lager is dan voor runderdrijfmest in de Oxitop® metingen. Daarnaast bestaat deze compost voor 60% uit minerale delen waar in de methode niet voor wordt gecorrigeerd. Uit eerder onderzoek is gebleken dat het fosfaatgehalte van deze minerale delen laag is en potentieel het P dat vrijkomt door mineralisatie weer kan binden.

Tabel 3-3 De afbraak, afbraaksnelheid en P-mineralisatie in compost, bermmaaisel en runderdrijfmest zoals gemeten met de aangepaste Oxitop® methode - resultaten Maurizio Degli Innocenti, MT-WU.

Materiaal	cum O ₂ opname mol O ₂ kg ⁻¹ VS	O ₂ opname snelheid (OUR) mmol O ₂ kg ⁻¹ VS h ⁻¹	Mineralisatie na 4 dagen incubatie mg P g ⁻¹ ds	% van totaal P
Compost	4,1 ± 0,04	10 ± 0,6	0,30 ± 0,01	8 ± 0,2
Bermmaaisel	6,7 ± 0,4	17,5 ± 1,3	0,35 ± 0,07	23 ± 5
Runderdrijfmest	83 ± 1	198 ± 5	0,96 ± 0,28	13 ± 4

4 Resultaten uitspoelingsproef

4.1 Bodemeigenschappen

Voor de uitspoelingsproef zijn twee gronden gebruikt en vijf organische producten. De gronden zijn zandgronden met een hoge fosfaattoestand omdat het de verwachting is dat voor deze gronden binnen het 6^{de} AP meer ruimte komt voor het gebruik van compost. De proef sluit aan bij de eerder genoemde veldproef die in het Toplaag project (R. Postma) wordt uitgevoerd (2018 – 2021).

De algemene bodemsamenstelling is getoond in Tabel 4-1. De bodem uit Noordwijk is een kalkhoudende zandgrond met een laag organische stof-, en kleigehalte. De CEC is hierdoor ook laag. De bodem laat geen aggregaatvorming zien en het watervasthoudendvermogen is laag. Voor duinzandgronden kan ontmenging plaatsvinden tussen het organische stof en de minerale bodembestanddelen (pers. com. W. Bussink).

De bodem uit Harreveld bevat geen kalk. Omdat de bodem organische stof rijk is, en wat klei en silt bevat is de structuur korrelig met natuurlijke aggregaatvorming. Het watervasthoudendvermogen is hoog.

Tabel 4-1 Algemene bodemsamenstelling van de twee gronden die voor de uitspoelingsproef zijn gebruikt. Parameters zijn uitgedrukt per kg droge grond.

Parameter		Noordwijk	Harreveld
Organische stofgehalte	%	2,1	6,5
CN verhouding van het organische stof	-	15	18
Klei gehalte	%	1	2
Silt gehalte	%	13	17
Zand gehalte	%	83	74
pH	-	6,7	5,9
Koolzure kalk gehalte	%	2,4	0,3
Kationen adsorptie capaciteit (CEC)	cmol/kg	53	111
Ca-bezetting van de CEC	%	92	87
Mg-bezetting van de CEC	%	4,7	10
K-bezetting van de CEC	%	2,3	2
Na-bezetting van de CEC	%	0,1	0,6
Ca-voorraad	kg/ha	1390	2375
Vochtgehalte	ml/kg	158	250
Maximum vochtvasthoudendvermogen	ml/kg		395

Beschikbaarheid nutriënten in de bodem

De twee gronden die voor de uitspoelingsproef zijn gebruikt zijn geanalyseerd op hoeveelheid en beschikbaarheid van nutriënten (Tabel 4-2 **Fout! Ongeldige bladwijzerverwijzing.**). Beide zandgronden hebben een hoge P-AL waarde (>50 mg P₂O₅/100g). In de grond uit Noordwijk is de directe P-beschikbaarheid, zoals gemeten in een P-CaCl₂ extract, ruim 4 keer hoger dan in de Harreveld grond. Voor de adsorptie van P zijn met name ijzer- en aluminium (hydr-)oxiden belangrijk; 50% van de som van Fe-ox en Al-ox wordt als maat genomen voor de maximale P-adsorptiecapaciteit van een kalkarme zandgrond (Q_{max}). De totale hoeveelheid geadsorbeerd P wordt benaderd met P-ox. De beschikbaarheid neemt toe naarmate het adsorptieoppervlak meer is verzadigd met P. Dit wordt benaderd door de fosfaatverzadigingsgraad (FVG) welke de verhouding is tussen P-ox en Q_{max}. In de Noordwijk grond kan de oorzaak voor de hoge directe P-beschikbaarheid worden gevonden in de zeer hoge verzadiging van het adsorptieoppervlak met P. Door zowel een zeer lage P-ox als een zeer lage Q_{max} is de berekende P-verzadiging (FVG) 100% in de Noordwijk grond. In de Harreveld grond is de totale hoeveelheid geadsorbeerd P groter (P-ox is 20 mmol/kg) maar omdat Q_{max} ook groter is (51 mmol/kg) is de verzadiging met 39% lager dan in de Noordwijk grond. Dit is nog steeds hoog ten opzichte van de 25% die is vastgesteld als de grens waarboven de P-uitspoeling ongewenst hoog zou zijn voor kalkarme zandgronden (Van der Zee et al., 1990).

Tabel 4-2 Beschikbaarheid nutriënten in de grond uit Noordwijk (NW) en Harreveld (HV).

Meting	NW	NW	HV	Meting	Unit	NW	HV	streven
P-AL	mg P ₂ O ₅ /100g	60	65	N-Totaal	mg N/kg	840	2120	
P-CaCl ₂	mg P/kg	4,1	1,0	N-Levering	kg/ha	15	30	93-147
P-ox	mmol P/kg	7	20	K-CaCl ₂	mg K/kg	49	45	75-108
Qmax*	mmol/kg	7	51	K-voorraad	mmol/kg	1,2	2,2	2,6-3,8
FVG	%	103	39	S-totaal	mg S/kg	360	445	
Al-ox	mmol/kg	4,9	86	S-levering	kg/ha	11	6	20-30
Fe-ox	mmol/kg	9,1	16	Mg-CaCl ₂	mg Mg/kg	57	178	89-134
				Na-CaCl ₂	mg Na/kg	6	10	51-86

* P adsorptiemaximum (0,5x(Fe-ox+Al-ox))

Tabel 4-3 Toegediende organische (mest)stoffen in proef uitgedrukt in hoeveelheid product en nutriënten.

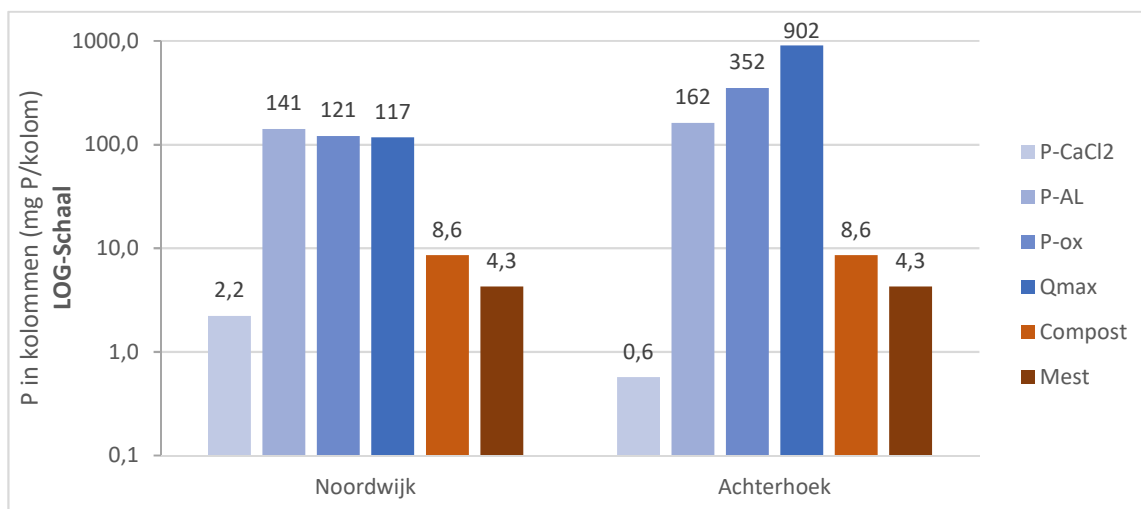
Product	Toegediende nutriënten in experiment						
	g product	ton/ha	kg P ₂ O ₅ /ha	kg K ₂ O/ha	kg Nt/ha	kg Nw/ha	kg OS/ha
Compost	3,8	19,1	100	179	172	17	818
Bermmaaisel	10,5	53,3	100	138	335	134	2858
Vaste rundveemest	6,8	34,7	50	264	168	84	1404
Runderdrijfmest	7,3	37,0	50	193	161	81	444

In tegenstelling tot de hoge P-toestand van de gronden is de voorraad en beschikbaarheid van de andere nutriënten laag ten opzichte van de landbouwkundige streefwaardes voor grasland. In overeenstemming met een hoger organische stofgehalte en kationen adsorptieoppervlak (CEC) in de grond uit Harreveld zijn ook de N-levering en de gehalten aan basische kationen hoger dan in de grond uit Noordwijk.

4.1.1 Fosfaatbalans

Uitgangspunt van de proef was dat, conform de gebruiksnormen, met compost en bermmaaisel 100 kg P₂O₅/ha werd toegediend en met vaste mest en drijfmest 50 kg P₂O₅/ha (Tabel 4-3). Om de hoeveelheid en beschikbaarheid van P in de bodem en in de verschillende organische (mest)producten te kunnen duiden zijn de behandelingen en verschillende bodemextractiemethodes omgerekend en uitgedrukt in mg P per kolom (zie Figuur 4-1).

Het bijzondere aan de duinzandgrond uit Noordwijk wordt direct duidelijk; P-AL is gelijk aan de totaal beschikbare P-reserve (P-ox) en aan het maximale adsorptieoppervlak voor P (Qmax). P-CaCl₂ is daardoor hoog – de evenwichtsconcentratie in het extract is 0,41 mg P/l (extractie is een verhouding van 1: 10 tussen bodem en extractievloeistof).



Figuur 4-1 De hoeveelheid P die met verschillende extractiemethodes uit de bodem is geëxtraheerd en met de behandelingen aan de kolommen is toegevoegd, alles uitgedrukt in mg P/kolom. De y-as is LOG-schaal!

Ondanks dat in de Noordwijk grond P-CaCl₂ hoog is, worden met de compost- en bermmaaisel-behandelingen 4 keer, en met de vaste- en drijfmestbehandelingen 2 keer zoveel P toegevoegd als de hoeveelheid P in deze direct beschikbare bodemfractie. De hoeveelheid P die wordt toegevoegd in de compost- en bermmaaiselbehandelingen is ruim 7% van de totale P-reserves en de maximale adsorptiecapaciteit van de Noordwijk duinzandbodem. Voor de vaste- en drijfmest behandelingen is dit 3,5%.

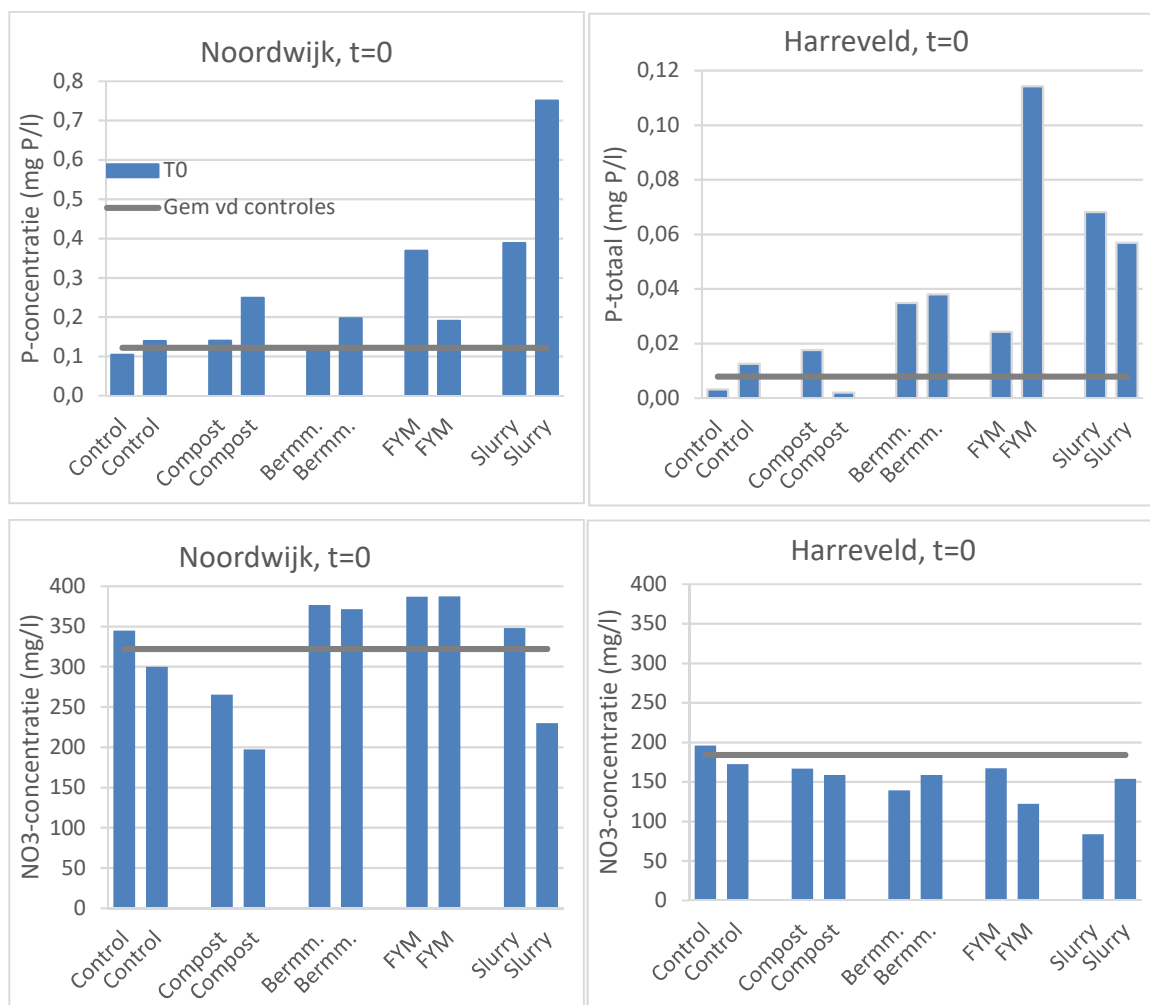
De hoeveelheid P die wordt toegediend met de verschillende organische behandelingen in de proef is relatief groot ten opzichte van de hoeveelheid en beschikbaarheid van P in de Noordwijk grond. Omdat het oppervlak waar P aan kan binden al verzadigd is met P zou deze toevoeging van P in de vorm van organische (mest)producten grotendeels beschikbaar kunnen zijn / komen afhankelijk van de mineralisatiesnelheid en adsorptieoppervlak van het toegediende product. De Oxitop® experimenten laten zien dat de toegediende hoeveelheid P varieert in beschikbaarheid. Voor compost is met de Oxitop bepaald dat 8% van P-beschikbaar komt door mineralisatie. Voor drijfmest is dit 13% en voor de bermmaaisel 23%. In bermmaaisel is het P-gehalte laag (0,92 mg/kg product) maar is de beschikbaarheid relatief groot.

Voor de zandgrond uit Harreveld liggen de zaken wat genuanceerder. P-AL is in de bodem in Harreveld vergelijkbaar met de bodem in Noordwijk. Echter in Harreveld is P-AL ongeveer de helft van de totale P-reserves (P-ox) en het adsorptieoppervlak (Q_{max}) is slechts gedeeltelijk gevuld met P (39%). De hoeveelheid P die wordt toegediend met de verschillende behandelingen is relatief klein; de hoeveelheid P in de compost- en bermmaaisel behandelingen komt overeen met 5% van P-AL en slechts 2,5% van de totale P-reserves. Daarnaast komt de hoeveelheid P die wordt toegevoegd overeen met slechts 1% van het maximale adsorptieoppervlak. Door de sterkere binding van P in de Harreveld bodem is de directe P-beschikbaarheid laag; P-CaCl₂ is 1,0 mg/kg en omgerekend komt dit overeen met een evenwichtsconcentratie in het extract van 0,1 mg P/l. De hoeveelheid P die wordt toegevoegd met de verschillende organische (mest)producten is daarom wel hoog ten opzichte van de direct beschikbare P-fractie; voor de compost- en bermmaaisel behandelingen is deze 15 keer hoger. Met de vaste- en drijfmest behandelingen wordt de helft minder P toegevoegd.

4.2 Start van de proef

Aan het begin van de proef zijn de kolommen op veldcapaciteit gebracht door een overmaat aan water toe te voegen en dit gedurende enkele dagen uit te laten lekken. Dit vocht is opgevangen en geanalyseerd (t=0). Daarna begon de proef door wekelijks 20 ml milliQ-water op de kolom te brengen. De duplo kolommen zijn gevuld vanuit één bak waarin de bodem en behandeling zijn gemengd. Met deze aanpak zou het verschil tussen duplo's klein moeten zijn. Dit bleek echter niet het geval. In Figuur 4-2 is te zien dat er aan het begin van de proef al grote verschillen bestaan tussen enkele duplo kolommen. Ondanks eventuele verschillen is duidelijk dat in beide gronden zowel vaste- als drijfmest direct na toevoegen zorgen voor een verhoogde P-uitspoeling. In de Harreveld grond zorgt ook bermmaaisel voor een initieel hogere P-concentratie.

Tussen de gronden is het verschil in de concentratie P-totaal in het effluent groot. In de controle behandeling (niets toegevoegd) is op t=0 de gemiddelde P-concentratie in de Noordwijk grond (0,12 mg/l) een factor 15 hoger dan in de Harreveld grond (0,008 mg/l). P-CaCl₂ is een extractiemethode die een maat is voor de directe P-beschikbaarheid en is gerelateerd aan de P-concentratie in de bodemoplossing (Van Rotterdam-Los, 2010). In de Noordwijk grond wordt op basis van P-CaCl₂ een P-concentratie van 0,41 mg/l verwacht. Op t=0 is deze 0,12 mg/l maar na 1 week is de evenwichtsconcentratie in het effluent met 0,37 mg/l conform verwachting.



Figuur 4-2 De P- totaal concentratie (boven, aangepaste assen) en nitraat concentratie (onder) aan het begin van de proef voor de verschillende behandelingen. Elke behandeling is in duplo uitgevoerd in de Noordwijk grond (links) en de Harreveld grond (rechts). De grijze lijn is het gemiddelde van de twee controle behandelingen.

In de Harreveld grond wordt op basis van P-CaCl₂ een P-concentratie van 0,1 mg/l verwacht. In de controle kolommen is de gemeten P-totaal concentratie op T=0 echter een factor 10 lager. Na een week is de concentratie iets hoger (0,03 mg/l) maar nog ruim onder de verwachte P-CaCl₂ concentratie. Dit verschil kan het gevolg zijn van de aggregaatvorming in de Harreveld grond waardoor minder oppervlak in aanraking komt met de bodemoplossing die uitspoelt. Tijdens de extractie wordt sterk geschud waardoor aggregaten uiteen vallen. In de Noordwijk grond is er geen aggregaatvorming en is P-CaCl₂ daarom een redelijk goede indicatie van de P-concentratie in het effluent.

Voor nitraat is de concentratie aan het begin van de proef hoger in de Noordwijk grond (322 mg/l) dan in de Harreveld grond (184 mg/l, Figuur 4-2). Deze concentraties zijn hoog ten opzichte van de streefwaarde van 50 mg/l in het bovenste grondwater. In tegenstelling tot de waarneming zou de verwachting - op basis van het organische stofgehalte en stikstofleverende vermogen - zijn dat de nitraatconcentratie in de Harreveld grond hoger zou zijn. Een belangrijke verschil tussen de gronden in de proef is dat in de Harreveld grond de waterretentie hoog is; het duurt dagen voordat water door de kolom is gelopen. In de Noordwijk grond is de waterretentie laag; het water loopt binnen enkele uren na toevoegen uit de kolom. Het is mogelijk dat tijdens de retentie het opgeloste nitraat is gereduceerd tot N₂ (gas). Een andere mogelijkheid is dat het organische stofgehalte in de Harreveld grond de nitraat buffert op een lagere evenwichtsconcentratie dan de Noordwijk grond.

Vanaf één week na de start van de proef ($t=1$) is de DOC-concentratie in het effluent gemeten. In de Noordwijk grond was deze op $t=1$ week 25 mg/l en in de Harreveld grond 35 mg/l. Het verschil in DOC-concentratie tussen de gronden is relatief klein ten opzicht van het verschil in organische stofgehalte; deze is in Harreveld 3x hoger dan in Noordwijk. Er was geen significant effect van de verschillende behandelingen behalve dat op de Noordwijk grond de DOC-concentratie in de bermmaaisel behandeling lager was.

4.3 Verandering over de tijd: algemene processen

De twee gronden reageren sterk verschillend van elkaar en worden hieronder apart van elkaar besproken.

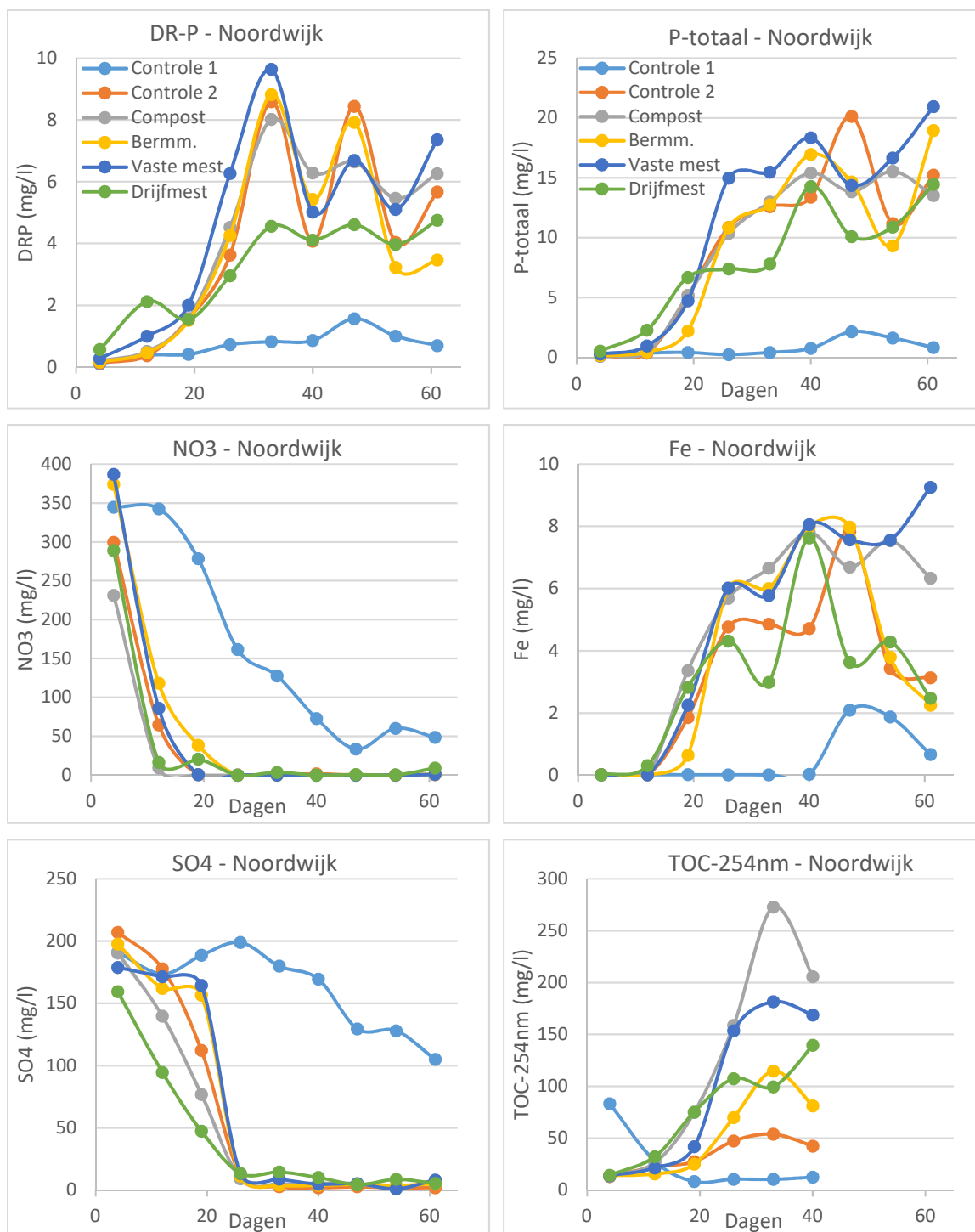
Noordwijk

Figuur 4-3 toont de verandering in fosfaat (DRP en P-totaal), nitraat, Fe, sulfaat en TOC in het effluent van de kolommen over de tijd. In de kolommen met Noordwijk grond treden reducerende omstandigheden op. Het ontstaan van gereduceerde omstandigheden is een microbiel gedreven proces waarbij onder zuurstofloze (anaerobe) omstandigheden micro-organismen gebruik moeten gaan maken van een andere elektronen-donor om organische stof te oxideren. Voor micro-organismen is na zuurstof, de reductie van nitraat energetisch het meest gunstig. Als dit op is wordt Mn gereduceerd, daarna ijzer en daarna sulfaat.

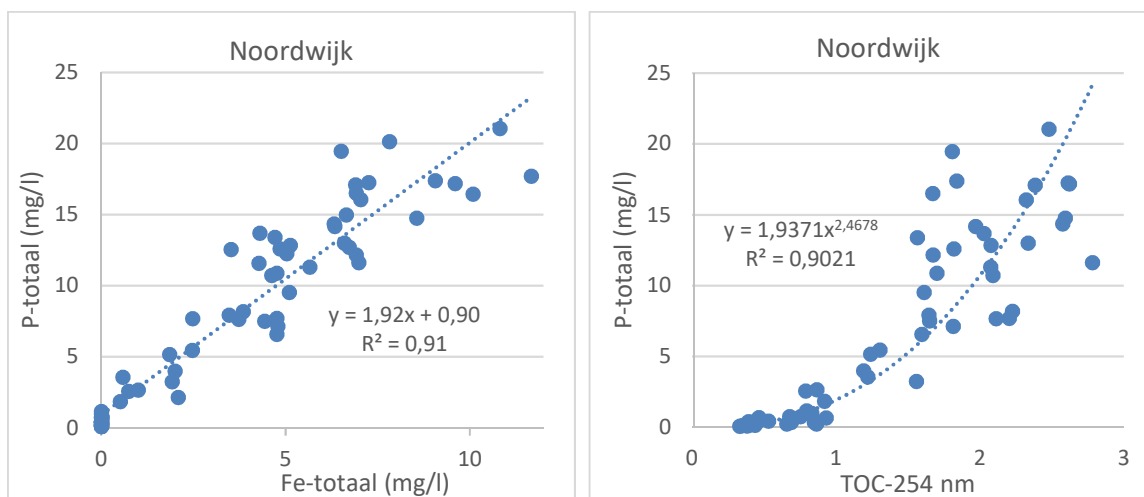
Binnen één week is de situatie in de kolommen anaeroob. Dit blijkt uit de sterke daling in NO_3 -concentratie. Na twee weken is ook de NO_3 -concentratie zeer laag geworden. Na één week begint de Fe^{2+} -concentratie toe te nemen door het reduceren en in oplossing gaan van Fe-(hydr-)oxiden. Na 2 weken start de afname in sulfaat (SO_4) door sulfaatreductie. Het gevormde gereduceerde zwavel slaat neer met het opgeloste Fe^{2+} tot FeS_2 en de Fe-concentratie stabiliseert zich. In de kolommen waar al het sulfaat is gereduceerd neemt vervolgens de Fe-concentratie weer toe. De reductie en het dientengevolge in oplossing gaan van Fe heeft een sterke toename in P-concentratie tot wel 30 mg/l als gevolg. De P-totaal concentratie en de Fe-concentratie zijn sterk aan elkaar gecorreleerd ($r^2=0.91$, Figuur 4-4). Het in oplossing gaan van P wordt dus bepaald door het in oplossing gaan van Fe. De molaire verhouding waarmee P in deze grond uitspoelt ten opzichte van Fe is 3,9: voor elke Fe-molecuul spoelt 3,9 P molecuul uit. In de bodem gaat meer Fe in oplossing maar dit slaat neer als het zeer onoplosbare FeS_2 . De enige uitzondering is controle 1; hier treden de reducerende omstandigheden niet op en blijft de P-concentratie gedurende de proef relatief laag (tussen 0,1 en 2,1 mg P/l). Zoals gezegd treden de genoemde reductiereacties op door micro-organismen die energie nodig hebben om organische stof af te breken. De initiële opgeloste organische stof concentratie (TOC) van rond 14 mg/l stijgt gedurende de proef tot rond 300 mg/l (compost behandeling). De TOC op basis van de extinctie bij 254nm laat meer variatie tussen behandelingen zien dan de traditionele TOC methode. Op basis van TOC-254 neemt de TOC toe in de volgorde controle, bermmaaisel, drijfmest, vaste mest en compost. De stijging in TOC is gerelateerd aan de stijging in Fe-concentratie ($r^2=0.72$) en is het resultaat van de reductieprocessen.

De sterk reducerende condities die ontstaan in de Noordwijk grond zijn tegen de verwachting in omdat de kolommen niet verzadigd waren met water en ook de waterretentie laag was; de doorlooptijd van het toegevoegde water door het duinzand was hoog. In een vergelijkbare uitspoelingsproef (Vanden Neste et al. 2016) werd in het effluent een P-concentratie tot 6 mg/l gemeten terwijl op basis van P- CaCl_2 een concentratie lager dan 1 mg/l werd verwacht. Het anaeroob worden van kolommen is dus mogelijk een vaker voorkomend fenomeen. Ook in het veld zijn duidelijke aanwijzingen dat in de bollenteelt op duinzand, waar de grondwaterstand op ongeveer 50 cm onder maaiveld wordt gezet, P vrijkomt als gevolg van anaerobe omstandigheden. De gemeten P-concentratie in het watersysteem is namelijk veel hoger (tot meer dan 10 mg P per liter; Van Aartrijk et al., 1997; Groot et al., 2003; LMB, 2007) dan verwacht kan worden op basis van metingen onder aerobe omstandigheden (P- CaCl_2).

Naast P-totaal is ook direct beschikbaar P in het effluent gemeten – dit wordt ook wel “dissolved reactive P” (DRP) genoemd. In de eerste week (t=0 en t=1) is DRP gelijk aan P-totaal. Wanneer P-totaal stijgt als gevolg van de reducerende omstandigheden, stijgt ook de DRP. De DRP stijgt echter minder dan de P-totaal waardoor de verhouding tussen P-totaal en DRP daalt van 1 naar gemiddeld 0,4 voor alle behandelingen en gedurende de rest van de proef ongeveer op deze verhouding gebufferd blijft. De 60% van het totaal P dat niet als ortho-fosfaat in oplossing is, bestaat uit een combinatie van organisch P en P gebonden aan nanadeeltjes van voornamelijk Fe-oxides.



Figuur 4-3 De gemiddelde verandering van opgelost anorganisch P (DRP), P-totaal, nitraat, sulfaat, ijzer en TOC in het effluent van de duplo kolommen met Noordwijk grond gedurende 8 weken. Door de grote verschillen zijn van de controle de resultaten van beide kolommen getoond. TOC is gemeten met een snelle analyse methode waarbij in de oplossing de extinctie bij 254 nm is gemeten.



Figuur 4-4 Verhouding tussen P-totaal en Fe-totaal (links) en tussen P-totaal en TOC (rechts) in het effluent van de Noordwijk grond voor de verschillende behandelingen.

Harreveld

In de kolommen met Harreveld grond is de situatie heel anders dan in de kolommen met Noordwijk grond. Figuur 4-5 toont de verandering in fosfaat (DRP en P-totaal), nitraat, Fe, sulfaat en TOC in het effluent van de kolommen over de tijd.

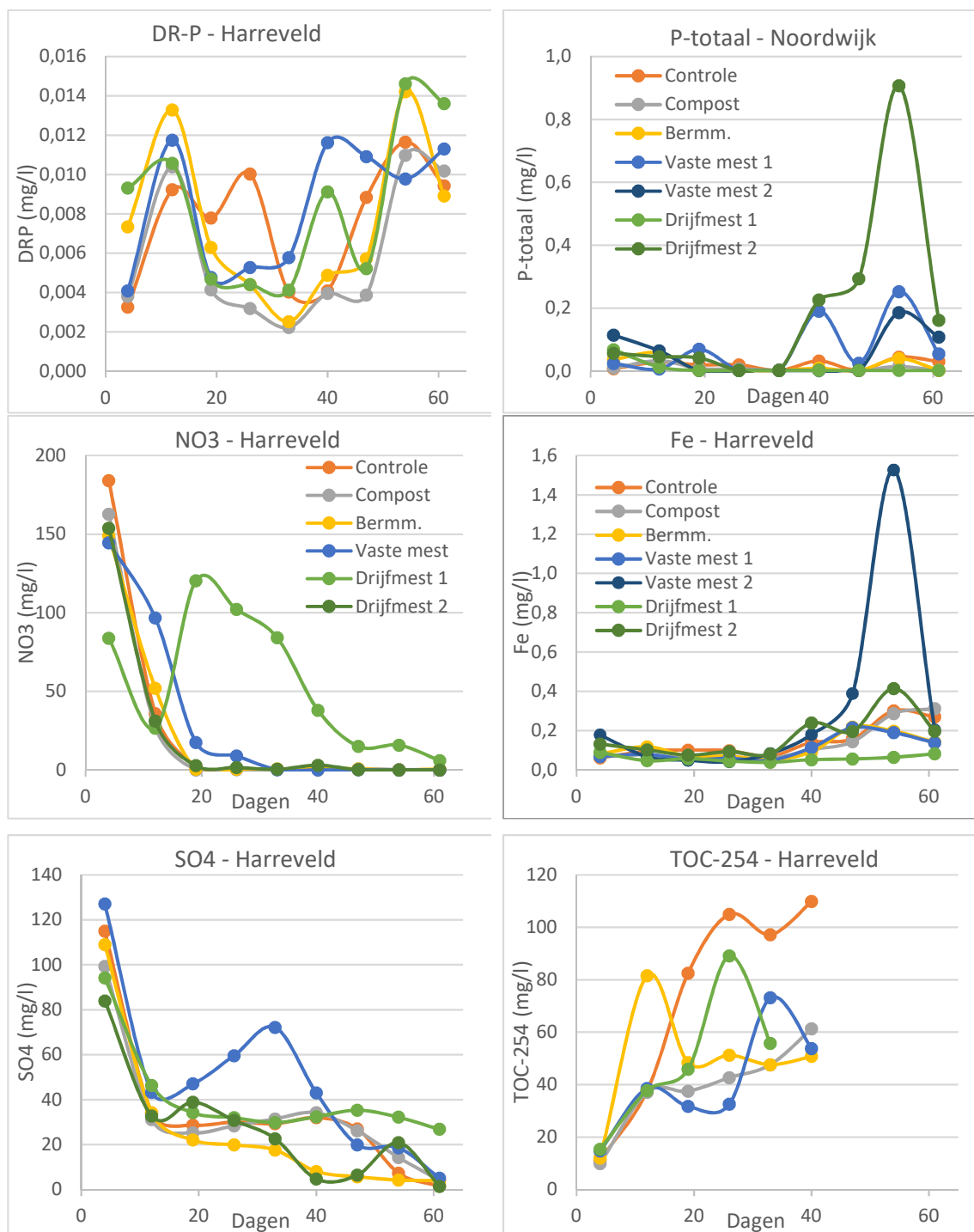
In de Harreveld grond blijft gedurende het grootste deel van de proef de P totaal-concentratie in het effluent onder 0,1 mg/l. Tegen het einde van de proef, na vijf weken, zijn er enkele uitschieters tot boven 0,2 mg/l met één enkele uitschieter tot 0,9 mg/l. Daar staat tegenover dat de concentratie opgelost anorganisch P (DRP) gedurende de proef voor alle behandelingen zeer laag blijft (rond 0,008 mg/L). De initiële hoge nitraat concentraties dalen binnen twee weken. Uitzondering is één van de kolommen met de drijfmestbehandeling waar de nitraatconcentratie langer hoog blijft en pas na 30 dagen begint te dalen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat op deze kolom na, in alle kolommen tot op zekere hoogte anaerobe omstandigheden ontstaan.

Het ontstaan van anaerobe omstandigheden wordt ook bevestigd door een daling van de initiële hoge sulfaatconcentraties. Deze daling start binnen de eerste week en de sulfaat concentratie blijft daarna constant of licht dalend maar wordt niet nul. De Fe-concentratie blijft in de meeste kolommen gedurende de proef laag (rond 0,1 mg/l). Na 5 weken neemt de Fe-concentratie in enkele kolommen licht toe met een enkele uitschieter tot 1,5 mg/l in één van de kolommen met de vaste mestbehandeling en naar 0,4 mg Fe/l in één van de twee kolommen met drijfmest behandeling. Deze twee uitschieters in de Fe-concentratie zijn het gevolg van een verlaging van het redoxpotentiaal in de kolommen en resulteren ook in een toename in de P-totaal concentratie in het effluent van deze twee kolommen.

Op enkele uitschieters na, is in de kolommen met de Harreveldgrond de totale fosfaatconcentratie, en op een bepaald niveau ook de sulfaatconcentratie, redelijk gebufferd. In alle kolommen was de waterretentie hoog en in een aantal kolommen liep het opgebrachte water zeer beperkt door. De reducerende omstandigheden leiden wel tot nitraat reductie maar niet tot Fe-reductie en een daaraan gekoppelde in oplossing gaan en uitspoeling van P. Uitzondering zijn de enkele uitschieters in de vaste mest- en drijfmestbehandeling (Figuur 4-5).

In tegenstelling tot in de Noordwijk grond waar DRP en P-totaal één op één aan elkaar waren gerelateerd voordat Fe-reductie optrad, is er in de Harreveld grond geen relatie tussen DRP en P-totaal. DRP blijft gedurende de proef zeer laag (tussen 0,002 (= detectielimiet) en 0,015 mg/l) terwijl P-totaal een veel grotere

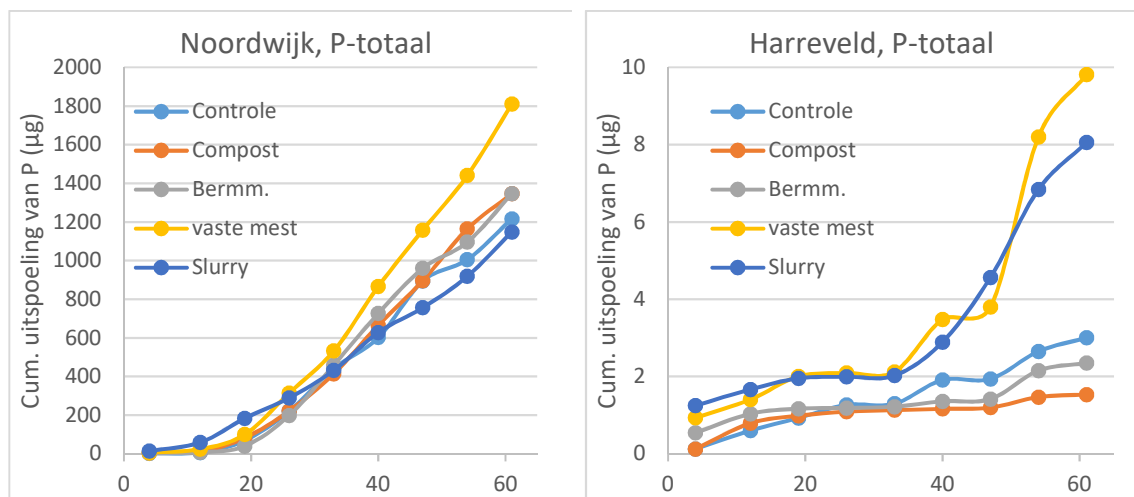
spreiding laat zien (varieert tussen 0,003 (= detectielimiet) en 0,253 mg/l). DRP lijkt sterk te zijn gebufferd en verandert daardoor niet mee als P-totaal verandert.



Figuur 4-5 De gemiddelde verandering van opgelost reactief P (DRP), P-totaal, nitraat, sulfaat, ijzer en TOC in het effluent van de duplo kolommen met Noordwijk grond gedurende 8 weken. TOC is gemeten met een snelle analyse methode waarbij in de oplossing de extinctie bij 254 nm is gemeten. Voor sommige parameters is niet het gemiddelde maar de data van beide kolommen getoond.

4.4 Effect behandeling op P-uitspoeling

Zoals hierboven beschreven werden de kolommen met Noordwijk grond (op één kolom na) sterk gereduceerd met een sterke stijging in P-concentratie als gevolg. De P-concentratie in de Harreveld grond was gebufferd; zeer lage P-concentraties in relatie tot de relatief grote P-voorraad in de bodem. Maar ook in enkele kolommen met Harreveld grond speelde redox processen een rol. Binnen deze kaders spelen ook de verschillende behandelingen een rol. Omdat door de redoxprocessen NO_3 wordt gereduceerd tot N_2 -gas kan het effect van de verschillende behandelingen op NO_3 -uitspoeling niet worden bepaald. Om voor P de behandelingen goed te kunnen vergelijken is de P-concentratie omgerekend naar de cumulatieve hoeveelheid P in het effluent (concentratie x water volume effluent, Figuur 4-6).



Figuur 4-6 Cumulatieve hoeveelheid P-totaal in het effluent (concentratie x water volume effluent) in de kolommen met Noordwijk grond (links) en met Harreveld grond (rechts).

Noordwijk

In de kolommen met Noordwijk grond had alleen de behandeling met vaste mest een significant ($p < 0.05$) verhogende effect op de totale hoeveelheid P in het effluent ten opzichte van de controle zonder toevoeging. De toename van 1,2 naar 1,8 mg P, staat gelijk aan 14% van de met vaste mest toegevoegde hoeveelheid P (4,3 mg/kolom, Figuur 4-1). Door de reducerende omstandigheden kan echter niet eenduidig worden gezegd dat de toename in P afkomstig is van de met vaste mest toegevoegde hoeveelheid P. De vaste mest kan ook voor omstandigheden hebben gezorgd waardoor meer P in oplossing komt onder gereduceerde omstandigheden. In de behandeling met vaste mest was ook de cumulatieve Fe vracht het hoogst van de verschillende behandelingen.

De behandeling met compost, bermmaaisel en drijfmest hadden geen significant effect op de totale P-uitspoeling ten opzichte van de controle behandeling. Kanttekening is uiteraard de sterke reductie die plaatsvond in alle kolommen, op één na, tijdens de proef. Het toevoegen van makkelijk afbreekbaar organische stof zou naar verwachting de reductie versnellen. In drijfmest is de P-mineralisatie en de afbreekbaarheid van het organische stof respectievelijk 3 en 20 keer hoger dan in compost. In compost en bermmaaisel is de P-mineralisatie van dezelfde orde grootte (Tabel 3-3, resultaten Oxitop® MT-WU, vaste mest is niet gemeten). Ondanks de grote verschillen in afbraaksnelheid en P-mineralisatie tussen drijfmest aan de ene kant en compost en bermmaaisel aan de andere kant lijkt dit echter geen effect te hebben op de uitspoeling van P in de Noordwijk grond.

In de Noordwijk duinzandgrond blijkt dat gemakkelijk reducerende omstandigheden kunnen ontstaan. In deze situatie heeft het toevoegen van vaste mest een significante verhoging van de P-uitspoeling tot gevolg.

Voor drijfmest zou op basis van de afbraaksnelheid en P-mineralisatie ook een verhoging van de P-uitspoeling worden verwacht maar dit werd niet aangetoond. Het toevoegen van compost en bermmaaisel, had, net als drijfmest, geen effect op de P-uitspoeling. Ondanks dat met compost en bermmaaisel 4 keer zoveel P werd toegevoegd aan de kolom dan aanwezig was in de direct beschikbare fractie (Figuur 4-1) was de P-uitspoeling vergelijkbaar met de behandeling waar niets aan was toegevoegd.

Harreveld

Het toevoegen van de twee organische meststoffen, drijfmest en vaste mest, leidde in de kolommen met Harreveld grond tot een verhoging van de cumulatieve totale P-uitspoeling met een factor 3 na 8 weken ten opzichte van de controle waar niets aan was toegevoegd. Het verschil tussen de controle en de twee organische meststoffen was vanaf het begin van de proef aanwezig. Het verschil over de tijd is onder andere het gevolg van redoxprocessen die zich in de kolom afspeelen. Daarnaast hebben zowel drijfmest als vaste mest een hoge P-beschikbaarheid wat dus direct – maar ook over de tijd - leidt tot een hogere P-uitspoeling.

Voor de behandelingen met de organische bodemverbeters compost en bermmaaisel werd pas na 4 weken een verschil met de controle behandeling zichtbaar. Voor compost was de cumulatieve P-uitspoeling na 8 weken 50% van de uitspoeling in de controle. Voor bermmaaisel was de P-uitspoeling na 8 weken 80% van de uitspoeling in de controle. Compost en bermmaaisel geven een verlaging van de P-uitspoeling te zien in de Harreveld grond, maar dat effect is statistisch niet significant.

Voor de Harreveld grond geldt dus wel dat de organische meststoffen met een hoge organische stof mineralisatie en hoge P-mineralisatie (Tabel 3-3) leiden tot een significante verhoging van de P-uitspoeling met een factor 3 over 8 weken. Het toevoegen van organische bodemverbeters met een lage organische stof en P-mineralisatie leiden niet tot een verhoogde P-uitspoeling in vergelijking tot de situatie waar niets is toegevoegd.

Een belangrijke kanttekening is dat de totale hoeveelheid P die gedurende de 8 weken is uitgespoeld varieert tussen 1,5 en 10 µg en daarmee een factor 1000 (!) lager is dan de hoeveelheid die aan de kolommen is toegevoegd. Dus ondanks dat met de organische bodemverbeters 8,6 mg en met de organische meststoffen 4,3 mg extra P aan de kolommen werd toegevoegd steeg de uitspoeling van 3 naar 10 µg. Hiermee kan gesteld worden dat, ondanks een relatief effect, het absolute effect zeer klein is en dat de fosfaat buffercapaciteit van de bodem de bepalende factor is in de hoeveelheid P die uitspoelt in de Harreveld grond.

Wanneer de Noordwijk en Harreveld grond worden vergeleken is duidelijk dat de bodem de bepalende factor is in de P-concentratie in de bodemoplossing en in de P-uitspoeling. Het effect van de behandelingen is daaraan ondergeschikt.

4.5 Samenvatting en conclusies uitspoelingsproef

Voor twee zandgronden (uitspoelinggevoelige duinzand uit Noordwijk en een organische stof rijke zandgrond uit Harreveld) is een kolomproef uitgevoerd met 5 behandelingen (controle zonder toevoeging, compost, bermmaaisel, vaste mest en drijfmest). Van de gebruikte organische (mest)producten werd met een aangepaste Oxitop® methode vastgesteld dat de organische stof- en P mineralisatie in drijfmest respectievelijk 3 en 20 keer hoger was dan in compost. In compost en bermmaaisel (dat enkele maanden op het veld heeft gelegen) was de P-mineralisatie van dezelfde orde grootte (vaste mest was niet gemeten). Compost bestaat voor een groot deel uit minerale delen (gemiddeld 65%) met een laag P-gehalte. Het is goed mogelijk dat P dat vrijkomt tijdens mineralisatie tijdens de incubatie deels wordt gebonden aan het minerale bodemoppervlak in de compost. Met de Oxitop® methode wordt dus een 'netto' P-mineralisatie bepaald.

De twee zandgronden hebben een hoge fosfaattoestand op basis van de beschikbare P-reserves (P-AL). Ze verschillen echter sterk in de directe beschikbaarheid van het aanwezige P (P-CaCl₂), de totale P-voorraad in de bodem (P-ox) en de P-adsorptiecapaciteit (Q_{max}). Aan het begin van de proef kwam dit tot uiting in het verschil in de P-concentratie in het effluent van de kolommen: deze benaderde / overschreed de grens voor goed ecologisch potentieel (GEP) van 0,15 mg/l in de Noordwijk grond (0,1-0,4 mg/l) en was laag in de Harreveld grond (0,01-0,03 mg/l). In de Noordwijk grond was dit in overeenstemming met P-CaCl₂ en in de Harreveld grond was dit een factor 3 tot 10 lager dan verwacht op basis van P-CaCl₂. Mogelijk zorgden aan het begin van de proef aggregaatvorming en waterretentie voor een lage(re) P-evenwichtsconcentratie in het effluent van de Harreveld grond. Gedurende de proef reageren de twee gronden verschillend van elkaar.

In de **Noordwijk** duinzandgrond ontstonden gereduceerde omstandigheden. Dit is een microbieel gedreven proces waarbij onder zuurstofloze (anaerobe) omstandigheden micro-organismen andere electronendonoren dan zuurstof moeten gebruiken om organische stof te oxideren. Voor micro-organismen is de reductie van nitraat energetisch het meest gunstig. Als dit op is wordt Mn gereduceerd, daarna ijzer en daarna sulfaat. In de kolommen gebeurde dit ook. De reductie en het dientengevolge in oplossing gaan van Fe(hydr)oxiden leidde tot een sterke toename van de P-concentratie (tot wel 30 mg/l!). De sterke reductie was tegen de verwachting in omdat de kolommen niet verzadigd waren met water en ook de waterretentie laag was; de doorlooptijd van het toegevoegde water was hoog. De hoge P-concentraties in het watersysteem in de bollenteelt op duinzandgronden suggereren echter dat ook in het veld reductieprocessen een rol spelen.

In de Noordwijk grond leidde het toevoegen van vaste mest tot een significante verhoging van de P-uitspoeling. Het toevoegen van drijfmest, compost en bermmaaisel hadden geen effect op de P-uitspoeling. Dit is tegen de verwachting in omdat met drijfmest 2 keer zoveel en met compost en bermmaaisel 4 keer zoveel P werd toegevoegd aan de bodem in de kolom dan aanwezig was in de direct beschikbare P fractie. Daarnaast was deze bodem aan het begin van de proef al verzadigd met P. Voor drijfmest zou op basis van de dosis en relatief hoge afbraaksnelheid en P-mineralisatie ook een verhoging van de P-uitspoeling worden verwacht maar dit werd niet aangetoond. Met compost en bermmaaisel werd 4 keer zoveel P toegevoegd aan de bodem van de kolom dan aanwezig was in de direct beschikbare fractie maar de afbraaksnelheid en netto P-mineralisatie van deze producten waren laag. Voor zowel compost als het gebruikte bermmaaisel (had al enkele maanden op het veld gelegen) was de P-uitspoeling vergelijkbaar met de behandeling waar niets aan was toegevoegd.

In de **Harreveld** grond bleef gedurende het grootste deel van de proef de P-concentratie in het effluent laag (onder 0,1 mg/l). De lage P-concentraties in relatie tot de relatief grote P-voorraad in de bodem geeft aan dat de fosfaatconcentratie bodemchemisch sterk gebufferd was. Voor een aantal kolommen liep het water zeer beperkt door en de grond had in deze kolommen een hoge waterretentie. Deze omstandigheid leidde slechts zeer beperkt tot Fe-reductie en een daaraan gekoppeld in oplossing gaan van P.

Het toevoegen van organische meststoffen (vaste mest en drijfmest) met een hoge mineralisatie van organische stof en een hoge P-mineralisatie leidde in de Harreveld grond tot een significante verhoging van de P-uitspoeling met een factor 3 over 8 weken. Het toevoegen van compost en bermmaaisel met een lage organische stof- en P-mineralisatie leidde niet tot een verhoogde P-uitspoeling in vergelijking tot de situatie waar niets was toegevoegd. Een belangrijke kanttekening is dat de totale hoeveelheid P die gedurende de 8 weken uit spoelde zeer laag was. Ondanks dat met de organische bodemverbeteraars 8,6 mg en met de organische meststoffen 4,3 mg extra P aan de kolommen werd toegevoegd bleef de totale hoeveelheid uitgespoelde P ongeveer 3 µg/kolom of steeg deze respectievelijk naar 10 µg/kolom (een factor 1000 lager!). Het absolute effect van organische meststoffen op P-uitspoeling is in deze grond dus zeer klein.

De bodem is de meest bepalende factor voor de P-concentratie in de bodemoplossing en daarmee ook voor P-uitspoeling wanneer organische (mest)stoffen binnen de gebruiksnorm aan de bodem worden toegediend.

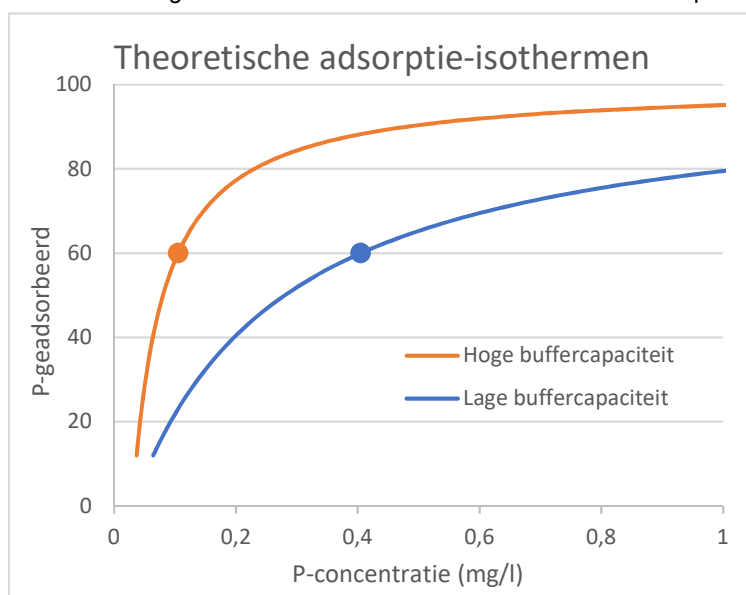
5 Synthese: compost in relatie tot N- en P-uitspoeling

Om een goede inschatting te kunnen maken van het effect van het toedienen van een organische bodemverbeteraar dan wel organische meststoffen op de uitspoeling van P zal het theoretisch kader worden besproken wat betreft P-uitspoeling in de bodem. De discussie beperkt zich tot zandgronden omdat droge, uitspoelingsgevoelige gronden in het 6^{de} AP specifiek worden genoemd als voorbeeld waar regionaal maatwerk, inclusief de mogelijkheid tot versoepeling van regels, een optie zou kunnen zijn. Op basis van het theoretische kader kan vervolgens worden geïdentificeerd wat het effect van organische meststoffen dan wel organische bodemverbeteraars op P-uitspoeling kan zijn.

5.1 Theoretisch kader: P-uitspoeling in zandgronden

P-uitspoeling is direct gerelateerd aan de P-concentratie in de bodemoplossing. Het risico op P-uitspoeling is in Nederlands onderzoek vanaf het begin gekoppeld aan adsorptie/desorptieprocessen in de bodem (Van Breeuwsma en Schoumans 1986 tot Schoumans 2015). De reden hiervoor is dat de P-concentratie in de bodemoplossing wordt bepaald door adsorptie/desorptie processen die zich afspelen aan het oppervlak van deeltjes (adsorptiecomplex) in de bodem. De relatie tussen de P-concentratie in de bodemoplossing (C) en de hoeveelheid P die aan het adsorptiecomplex is geadsorbeerd (Q) wordt beschreven door een adsorptie-isotherm (Figuur 5-1). In de Langmuir isotherm bepalen de bodemspecifieke affiniteitsconstante (K) en de bodemspecifieke maximum adsorptiecapaciteit (Q_{max}) de relatie tussen Q en C. Q_{max} is 0,5 keer de som van het gehalte Fe- en Al(hydr-)oxiden in de bodem zoals bepaald in een oxalaatextractie (0,5x(Fe-ox+Al-ox), onder andere Van der Zee et al., 1988, Schoumans 2000). De affiniteitsconstante K is gerelateerd aan de hoeveelheid Fe-oxiden en beschikbaar Al; de affiniteit om P te binden neemt toe wanneer er meer Fe-ox en Al aanwezig is (Schoumans et al., 2013). De hoeveelheid P die aan het adsorptiecomplex is geadsorbeerd (Q) kan door verschillende extractiemethodes worden benaderd, bijvoorbeeld door P-AL.

De sorptie-isotherm geeft een beeld van het verwachte effect van het toevoegen dan wel onttrekken van P aan de bodem. Bij een lage buffercapaciteit leidt het toevoegen dan wel onttrekken van P tot een sterke verandering van de P-concentratie. Wanneer het toevoegen dan wel onttrekken van P leidt tot geen, dan wel een kleine verandering van de P-concentratie spreken we van een hoge buffercapaciteit. In dat geval wordt een verandering van de P-concentratie voorkomen door P-adsorptie/desorptie processen.



Figuur 5-1 Twee theoretische adsorptie-isothermen; één met een lage buffercapaciteit (blauwe lijn) en één met een hoge buffercapaciteit bij lage P-concentratie (oranje lijn). De buffercapaciteit is de capaciteit van de bodem om een verandering van P in de bodemoplossing te weerstaan als gevolg van het toevoegen dan wel onttrekken van P. De twee stippen zijn representatief voor de Noordwijk en Harreveld grond in de proef.

De verhouding tussen P-ox en Qmax is de fosfaatverzadigingsgraad (FVG). Wanneer het adsorptieoppervlak meer is opgeladen met P neemt de buffercapaciteit af en neemt de P-concentratie in de bodemoplossing toe. Het toevoegen van P aan de bodem zal in dat geval dan ook een relatief groot effect hebben op de P-concentratie in de oplossing.

Het overschrijden van de kritieke P-concentratie in het grondwater is gekoppeld aan de FVG (onder andere Breeuwsma en Schoumans 1986, Schoumans 2015). In kalkarme zandgronden wordt de normconcentratie van 0,15 mg/l bereikt als de capaciteit van de bodemlaag tussen maaiveld en de gemiddeld hoogste grondwaterstand om fosfaat te binden met 25% is verbruikt (FVG>25%, Van der Zee et al., 1990). Er wordt dus over een fosfaatverzadigde grond gesproken als 25% van de maximum bindingscapaciteit benut is. Op basis van dit criterium is afgeleid dat 56% van het areaal landbouwgrond als verzadigd beschouwd kan worden (grondanalyses uitgevoerd in de jaren 1992-1998, Schoumans 2004, dit onderzoek wordt dit jaar (2018) geactualiseerd). Bijna de helft van deze 56% bestaat uit kalkarme zandgronden waarvan de verzadiging het gevolg is van de grote hoeveelheden dierlijke mest die sinds begin jaren '60 van de vorige eeuw zijn toegepast.

Resumerend is het belangrijkste proces dat de P-concentratie in de bodemoplossing bepaalt de binding van het negatief geladen fosfaat aan het positief geladen Fe- en Al (hydr)oxide. De bepalende parameters hierbij zijn het adsorptie maximum (Qmax), de hoeveelheid gebonden P (Q), en de affiniteitsconstante (K).

Adsorptie-desorptie reacties van P aan Fe-oxides worden beïnvloed door de pH van de bodem, de calcium-concentratie in het bodemvocht en opgelost organische stof (Weng et al., 2012). Calcium zorgt voor co-adsorptie waardoor meer P kan worden gebonden aan het oppervlak. Daarnaast beïnvloedt Ca de interactie met pH. De lading van Fe- en Al(hydr-)oxiden is niet constant maar is afhankelijk van de pH. Bij een hogere pH wordt het Fe-oxide oppervlak minder positief waardoor minder P kan adsorberen en er dus meer P in de bodemoplossing komt. Echter wanneer er voldoende Ca aanwezig is, neemt de adsorptie van Ca toe met toenemende pH (boven pH 5) en daarmee ook de co-adsorptie met P.

Naast co-adsorptie met Ca, kan er ook competitie plaatsvinden tussen fosfaat en andere negatief geladen deeltjes in de bodem. Bijvoorbeeld een toename van sulfaat, en kleine organische moleculen kan leiden tot een hogere P-concentratie door competitie aan het oppervlak. Opgeloste organische moleculen kunnen ook aan het Fe-oxide adsorberen waardoor het adsorptie maximum voor P afneemt (Weng et al., 2012, Van Rotterdam et al., 2009).

Om P-uitspoeling op zandgronden goed te kunnen duiden kan op basis van bovenstaande onderscheid worden gemaakt tussen neutraal tot basische zandgronden en kalkhoudende zandgronden enerzijds en zure kalkloze zandgronden anderzijds (Devau et al., 2011). In zure kalkloze zandgronden kan de P-concentratie snel toenemen met toenemende pH. In de neutraal tot basische zandgronden en kalkhoudende zandgronden speelt de co-adsorptie van P met Ca een belangrijke rol. Door deze co-adsorptie kan het negatief geladen fosfaat ook aan negatief geladen kleimineralen adsorberen (Devau et al., 2011).

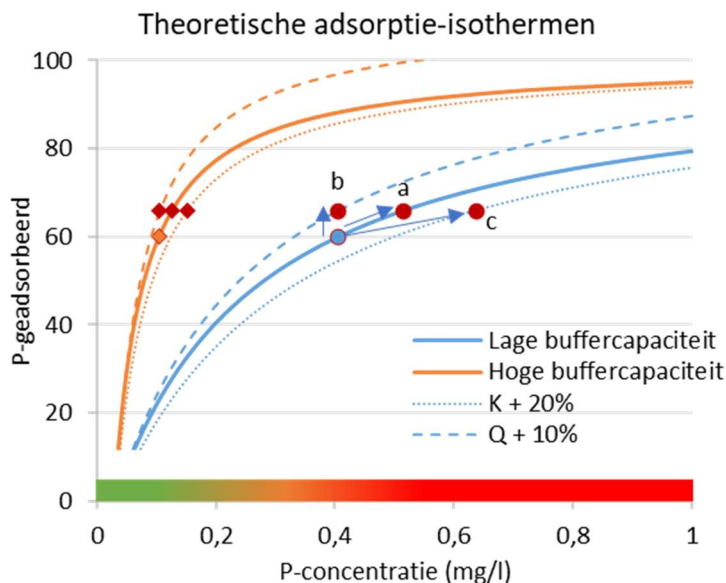
Om het risico op P-uitspoeling te voorspellen zijn extracties die een maat zijn voor P in de bodemoplossing – ofwel direct beschikbaar P - vaak gedefinieerd als goede indicatoren. Verschillende studies tonen aan dat P-CaCl₂ en/of P-water sterk zijn gecorreleerd aan oppervlakkige afspoeling en uitspoeling (Maguire en Sims, 2002, McDowell en Sharpley 2001, Schoumans en Groenendijk 2000, Turner et al., 2004). In een uitspoelingsexperiment (VandenNest et al., 2016) en een desorptie-experiment (Van Rotterdam et al., 2009) werden de P-uitspoeling en beschikbaarheid bepaald door een maat voor de P-concentratie in de oplossing. Over de tijd veranderen deze door de snelheid waarmee het aan het oppervlak van Fe- al(hydr)oxiden gebonden P wordt nageleverd – ook wel P-buffering genoemd.

5.2 Organische meststoffen / bodemverbeteraars en P-uitspoeling

Om een goede inschatting te kunnen maken van het effect van het toedienen van een organische bodemverbeteraar dan wel een organische meststof op de uitspoeling van N en P wordt onderscheid gemaakt tussen de directe effecten en de indirecte effecten.

5.2.1 De directe interactie-effecten tussen organisch product en de bodem

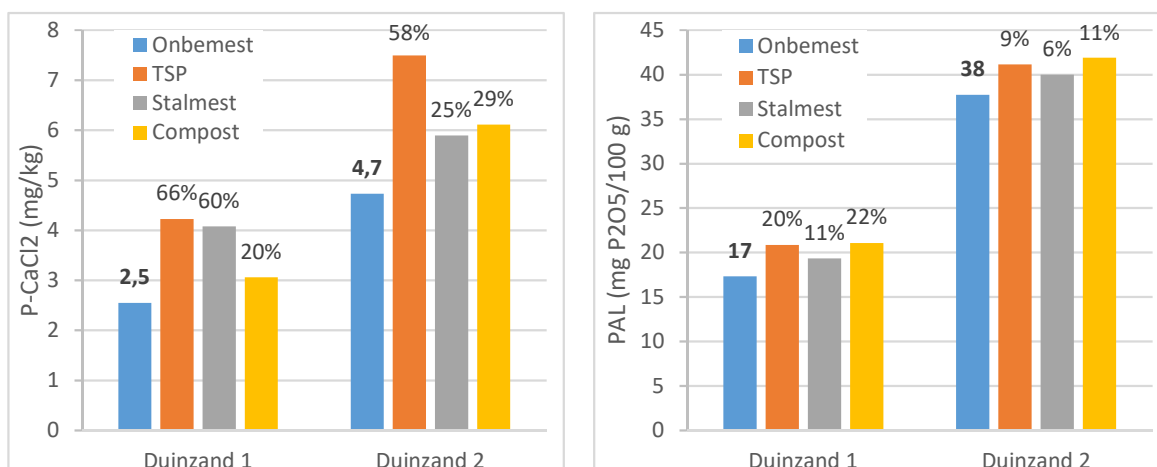
De directe effecten zijn gerelateerd aan het toevoegen van P en het daarmee verhogen van de fosfaattoestand van de bodem. Of het toegevoegde P resulteert in het verhogen van de directe P-beschikbaarheid in de bodemoplossing dan wel in het verhogen van de hoeveelheid geadsorbeerd P is afhankelijk van de adsorptie-isotherm van de bodem (Figuur 5-2). Vanuit een milieuperspectief is het ongewenst dat de P concentratie in de bodemoplossing wordt verhoogd omdat dit ook direct effect heeft op het risico op P-emissies naar het watersysteem. Het verwachte effect van het toedienen van P aan de bodem op de P-uitspoeling is versimpeld getoond in Figuur 5-2.



Figuur 5-2 Twee theoretische adsorptie-isothermen; één met een lage buffercapaciteit (blauwe lijn) en één met een hoge buffercapaciteit bij lage P-concentratie (oranje lijn). Naast deze doorgetrokken lijnen zijn ook de situaties weergegeven wanneer het adsorptiemaximum wordt verhoogd met 10% (gestreepte lijnen) en wanneer de sorptieconstante met 20% wordt verlaagd (gestippelde lijnen). De gekleurde balk geeft een inschatting van het risico op P-emissie naar het watersysteem.

Wanneer een P-bron met een hoge directe P-beschikbaarheid aan de bodem wordt toegevoegd die geen effect heeft op de bodemeigenschappen die de sorptie-isotherm bepalen, kan het effect op de P-concentratie in de bodemoplossing worden bepaald op basis van de sorptie-isotherm. Voor gronden met een hoge buffercapaciteit zal het toevoegen dan wel onttrekken van P resulteren in een verandering in de hoeveelheid geadsorbeerd P (Q) en slechts een gering effect hebben op de P-concentratie in de oplossing (C, oranje lijn in Figuur 5-2). Daarentegen zal in gronden met een lage buffercapaciteit het toevoegen dan wel onttrekken van P een relatief groot effect hebben op de concentratie in de bodemoplossing en daarmee ook op de P-uitspoeling (a op blauwe lijn in Figuur 5-2).

Voor organische bodemverbeteraars moet aan bovenstaande basisprincipe nog een extra dimensie worden toegevoegd: de eigenschappen van het product en de interactie met de bodem. De Oxitop® methode laat zien dat zowel de mineralisatiesnelheid als de directe P-beschikbaarheid van deze producten laag is. Daarnaast bestaat compost voor 60% uit minerale delen met een lage P verzadiging. Wanneer met het toegediende product het adsorptie-oppervlak voor P (Q_{max}) vergroot verandert de sorptie-isotherm. De



Figuur 5-3 Effect van tripelsuperfosfaat (TSP), stalmest en compost op de directe P-beschikbaarheid (links) en de beschikbare P-reserves (rechts) op twee duinzandgronden (data van Ehlert et al., 2004). De percentages geven de relatieve verhoging ten opzichte van de controle weer.

verandering in de P-concentratie in de bodemoplossing als gevolg van het toedienen van P zal dan niet langer gebaseerd zijn op de sorptie-isotherm in de uitgangssituatie (doorgetrokken lijnen in Figuur 5-2) maar de aangepaste isotherm gaan volgen met een lagere P-concentratie in de bodemoplossing (gestreepte lijnen in Figuur 5-2). Het toevoegen van zo'n product hoeft dan, zelfs in een bodem met een lage buffercapaciteit, niet te leiden tot een verhoging van de P-concentratie in de bodemoplossing.

Deze theorie wordt bevestigd in de uitspoelingsproef (hoofdstuk 4) waar werd aangetoond dat er op korte termijn geen effect is van het toedienen van compost en bermmaaisel (dat enkele maanden heeft gelegen) op de P-uitspoeling, ondanks dat een relevante hoeveelheid P werd toegediend (dosis 100 kg P₂O₅/ha) aan beide zandgronden. Bij de organische mestproducten met een hoge P-beschikbaarheid was er met de helft van de dosis (50 kg P₂O₅/ha) en uitgezonderd drijfmest op de duinzandgrond, wel een significante verhoging van de P-uitspoeling.

Deze resultaten komen overeen met een incubatieproef (1 jaar) waar is onderzocht wat het effect is van het toedienen van tripelsuperfosfaat (TSP, hoge P-beschikbaarheid), stalmest en keur-compost (beide voor toevoegen eerst gedroogd en gemalen) in een dosis van 140 kg P₂O₅ ha⁻¹ aan twee duinzandgronden op de fosfaattoestand (Ehlert et al., 2004, Figuur 5-3). In duinzand 1 waren de directe P-beschikbaarheid en de beschikbare reserves lager dan in duinzand 2. Beide gronden hadden echter een lage buffercapaciteit. Hierdoor kon door het toevoegen van TSP de directe P-beschikbaarheid sterk toenemen (met +/- 60%, linker figuur). Compost had ook een verhoogd effect op de directe P-beschikbaarheid maar deze was, ondanks dezelfde dosis, voor beide gronden twee tot drie keer lager dan bij TSP (20 tot 30% toename van P-CaCl₂). Het effect van stalmest is niet eenduidig; in duinzand 1 had dit een vergelijkbaar verhogend effect als TSP op de directe P-beschikbaarheid maar in duinzand 2 was het effect van stalmest vergelijkbaar met compost.

Toedienen van meststoffen met een hoge P-beschikbaarheid (kunstmest) resulteert in een verhoging van de P-concentratie in de bodemoplossing (en daarmee in P-uitspoeling) zoals gedicteerd door de bodemspecifieke adsorptie-isotherm. Met organische bodemverbeteraars met een lage P-beschikbaarheid is bij eenzelfde dosis het effect op de directe P-beschikbaarheid in de bodem veel kleiner of afwezig. De P-beschikbaarheid van een product en het effect op de bodemeigenschappen die de isotherm bepalen dient dus te worden meegenomen bij het vaststellen van het risico op P-emissies na toedienen. Naast de lagere P-beschikbaarheid van het product zelf is het mogelijk dat organische bodemverbeteraars en mogelijk ook organische meststoffen, de ad- en desorptie-eigenschappen van de bodem wijzigen, omdat met deze producten ook organische stof en minerale bodembestanddelen worden aangevoerd. Compost bestaat voor

gemiddeld 60 tot 80% uit minerale bodem met een lage P-verzadiging en daarnaast kan vooral gft-compost ook veel Calcium bevatten (Van Rotterdam 2016). Calcium kan in de compost zelf leiden tot slecht beschikbare Ca-fosfaat precipitaten maar Calcium kan in de bodem ook zorgen voor een verhoogde P-adsorptie (Weng et al., 2012). Dit kan na toediening aan de bodem tot een verhoging van het P-adsorptie-maximum (Q_{max}) leiden waardoor de sorptie-isotherm verschuift naar een evenwicht met een lagere P-concentratie in de bodemoplossing (b in Figuur 5-2).

Op basis van bovenstaande kan voor de korte termijn (< 1 jaar) geconcludeerd worden dat de adsorptie isotherm van de bodem bepaalt hoe groot het effect zal zijn van het toedienen van een hoeveelheid direct beschikbaar P aan de bodem. Bij een lage buffercapaciteit kan de P-concentratie – en daarmee ook het risico op P-uitspoeling – sterk toenemen. Bij een hoge buffercapaciteit zal het effect van het toevoegen van P op de P-concentratie – en daarmee ook op de P-uitspoeling – gering zijn.

Binnen dit kader is er een nuancering voor organische producten met een lage P-beschikbaarheid. Door de lage beschikbaarheid in het toegediende product is de verandering van de directe P-beschikbaarheid in de bodem ($P-CaCl_2$) twee tot drie keer lager dan wanneer een product met een hoge oplosbaarheid wordt toegediend (Ehlert et al., 2004). In de uitspoelingsproef (Hoofdstuk 4) was er zelfs geen toename in P-uitspoeling bij het toedienen van compost en bermmaaisel.

Op uitspoelingsgevoelige zandgronden met een lage buffercapaciteit en een hoge fosfaattoestand zal het toevoegen van organische bodemverbeteraars met een lage P-beschikbaarheid en een verhogend effect op het P-adsorptiemaximum van de bodem leiden tot lagere P-emissies dan P-producten met een hoge P-beschikbaarheid.

Bij het ILVO (België) is onderzoek gedaan naar de lange termijn effecten op P-uitspoeling van het toevoegen van verschillende organische producten ten opzichte van TSP en een controle behandeling. Ondanks dat met compost (en ook kunstmest) P werd aangevoerd ($50-100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$) had dit op twee zandleemgronden (één met neutrale- en één met hoge fosfaattoestand) na respectievelijk 8 en 16 jaar geen effect op de P-uitspoeling in vergelijking met de behandeling zonder P. In deze periode nam een maat voor de directe P-beschikbaarheid ($P-CaCl_2$) ook niet toe, maar weerspiegelde de verandering in de P-reserves wel het bemestingsniveau van de behandelingen. Ook het toedienen van kunstmest P (lagere dosering dan compost) had in deze proef geen effect op de P-uitspoeling. Bijzonder is dat het toedienen van runderstalmest wél een duidelijk significante verhoging gaf van de P-uitspoeling en ook van de P-beschikbaarheid (zoals gemeten met $P-CaCl_2$ en P-AL) ten opzichte van de controle. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de jarenlange continue toediening van runderstalmest heeft geleid tot een verlaging van de affiniteit van de bodem voor P (verlaging van de sorptieconstante K van de Langmuir-isotherm). Wanneer de affiniteit voor P kleiner wordt verandert de sorptie-isotherm (gestippelde lijn in Figuur 5-2) en kan de P-concentratie in de bodemoplossing, en daarmee het risico op P-emissie naar het watersysteem, snel toenemen (verandering naar punt c in Figuur 5-2).

Na het her-analyseren van oude proefveldmonsters lijkt het veeljarig gebruik van organische bodemverbeterende middelen de sorptiemaxima van de bodem voor P te verlagen ten opzichte van uitsluitend gebruik van minerale meststoffen (Ehlert et al., 2004). Dit wordt tegengesproken door een recentere studie (VandenNest et al., 2014) waar proefresultaten laten zien dat de adsorptiecapaciteit van de bodem lijkt te worden verhoogd door het langdurig gebruik van compost.

5.2.2 De indirecte interactie-effecten tussen organisch product en de bodem

Verschillende studies tonen het indirecte effect van organische bodemverbeteraars ten opzichte van (organische) meststoffen op P-uitspoeling. Deze indirecte effecten omvatten een verandering van onder andere pH, vocht karakteristieken van de bodem, bodemstructuur en bewortelbaarheid. Een verbetering van

het vochtvasthoudendvermogen en van structuur en bewortelbaarheid kunnen een positief effect hebben op gewasopbrengsten en daarmee op de P-onttrekking door het gewas. Bij een hogere onttrekking is de verwachte uitspoeling lager.

Wanneer de toegevoegde dosis compost of een ander organisch product in grote hoeveelheden (ruim boven de gebruiksnormen) wordt toegediend, worden naast de bodemprocessen de eigenschappen van de producten steeds bepalender voor de P-uitspoeling. In een uitspoelingsexperiment met een hoge dosis compost en digestaat (240 kg P₂O₅/ha) kon de P-uitspoeling op drie verschillende gronden niet alleen worden bepaald door de bodem of door de P-beschikbaarheid in het organische product. De auteurs stellen dat naast de P-beschikbaarheid ook de verandering in de waterretentie – gerelateerd aan deeltjesgrootte (interactie-oppervlak) van het toegediende product – belangrijk is voor P-uitspoeling (Garcia-Albacete et al., 2014).

Een ander belangrijk aspect is pH. Compost, maar ook andere organisch producten hebben een hoge pH en kunnen, afhankelijk van de bodem, de pH verhogen (Sinaj et al., 2002). Zoals eerder beschreven kan dit resulteren in een verhoging van de P-concentratie in de bodemoplossing wanneer in een zure zandgrond het adsorptiecomplex voor P minder positief geladen wordt en daardoor P minder sterk bindt. In neutrale en basische gronden kan een verhoging van de pH echter leiden tot een sterkere binding van P door co-adsorptie met calcium-ionen. Het is goed mogelijk dat de redelijk grote hoeveelheden beschikbaar Ca in met name gft-compost en de co-adsorptie met P aan negatief geladen bodemdeeltjes (één van) de reden(en) is waarom het toedienen van compost weinig tot geen effect heeft op P-uitspoeling bij een dosis binnen de fosfaat-gebruiksnormen. Wat precies het effect is van Ca in compost op de fosfaatbeschikbaarheid en uitspoeling dient echter nader onderzocht te worden.

Bovenstaande processen en parameters die de interactie tussen organische producten en P-uitspoeling bepalen en beïnvloeden zijn samengevat in onderstaande tabel.

	P-uitspoeling
Bodem	<ul style="list-style-type: none"> • Direct beschikbaar P (P-CaCl₂) zoals gedicteerd door de bodemspecifieke adsorptie-isotherm en bepaald door de adsorptiecapaciteit voor P (som van Fe-ox en Al-ox) de mate waarin het adsorptieoppervlak is verzadigd (P-AL en P-verzadigingsgraad) . • Vochtgehalte i.r.t. redox – door oplossen van Fe-(hydr)oxiden komt veel P vrij • Bodemstructuur – aggregaatvorming en verdichting leidt tot lagere uitspoeling en mogelijk lagere P-concentratie in de bodemoplossing
Additief	<ul style="list-style-type: none"> • Samenstelling en beschikbaarheid van P in het product • pH en Ca beschikbaarheid • Interactieoppervlak
Interactie	<ul style="list-style-type: none"> • Verhouding tussen toegediende hoeveelheid beschikbaar P en de fosfaattoestand van de bodem. • Additief kan naast een directe manier ook op een indirecte manier invloed uitoefenen op N en P-uitspoeling door: <ul style="list-style-type: none"> - Invloed op bodemstructuur wat de vochtthuishouding en daarmee uitspoeling beïnvloedt (effect vooral bij hoge en/of langdurige giften, Garcia-Albacete et al., 2014) - Invloed op de bewortelbaarheid waardoor gewasgroei en P-opname wordt bevorderd - Verhoging pH van de bodem (Sinaj et al., 2002), effect kan zowel positief als negatief zijn op P-uitspoeling. - Toevoegen van Ca-ionen wat co-adsorptie en vastlegging van P bevordert

6 Conclusies

Fosfaat (P) uitspoeling wordt bepaald door processen in de bodem en is een functie van de P-concentratie in het bodemvocht vermenigvuldigd met dat deel van het neerslagoverschot dat uitspoelt. In de bodem is de P-concentratie in evenwicht met het P dat is geadsorbeerd aan het oppervlak van Fe- en Al(hydr-)oxiden. Hoe sterker de bodem is opgeladen met P des te hoger is de P-concentratie in het bodemvocht. De relatie tussen geadsorbeerd P (Q) en de P-concentratie (C) wordt beschreven met een isotherm waarin het maximale adsorptieoppervlak (Q_{max}) en de bindingssterkte (K) de curve bepalen.

Het effect van het toedienen van een hoeveelheid direct beschikbaar P op P-uitspoeling wordt bepaald door de adsorptie isotherm van de bodem. Wanneer P wordt toegevoegd (of onttrokken) aan een bodem veranderen zowel Q als C. De mate waarin C verandert is belangrijk voor P-uitspoeling en wordt bepaald door de buffercapaciteit. Een bodem met een hoge buffercapaciteit kan een verandering in C 'bufferen' door het toegevoegde P te adsorberen aan vrij beschikbaar adsorptieoppervlak. Een bodem met een lage buffercapaciteit is al sterk opgeladen met P of heeft een lagere bindingssterkte waardoor het toevoegen van P direct resulteert in het verhogen van C. En dus ook in het verhogen van de potentiële P-uitspoeling.

Organische producten met een lage P-beschikbaarheid leiden tot een lagere P-uitspoeling dan (organische) producten met een hoge P-beschikbaarheid. Een kolomproef toont aan dat het binnen de P-gebruiksnorm toedienen van compost en bermmaaisel (dat al een aantal maanden op het veld heeft gelegen), **niet** leidt tot een verhoging van de P-uitspoeling op twee zeer uiteenlopende zandgronden. Zowel bij de P-verzadigde zandgrond met een lage buffercapaciteit als bij de zandgrond met een hoge buffercapaciteit neemt de P-uitspoeling niet toe ten opzichte van de situatie zonder P toevoeging. Bij het gebruik van stalmest (beide gronden) en drijfmest (één van de twee gronden) nam de P-uitspoeling wel significant toe. In andere studies worden vergelijkbare resultaten gevonden.

Compost en andere organische bodemverbeteraars met een lage P-beschikbaarheid, beïnvloeden de adsorptie-isotherm van de bodem. Het adsorptiemaximum voor P kan worden verhoogd door het toevoegen van minerale delen met compost (minder aanwezig in bv bermmaaisel) en/ of door co-adsorptie van P met beschikbaar calcium in de organische producten. Daarnaast kan organische stof op allerlei manieren interacteren met de bodem. Kleine negatief geladen opgeloste organische moleculen kunnen door competitie het negatief geladen P van het oppervlak verwijderen. Daarnaast kunnen grotere organische moleculen het oppervlak afschermen waardoor er minder P kan adsorberen. Beide processen verhogen de P-oplosbaarheid. Organische stof kan ook aggregaatvorming en de vochthuishouding en bewortelbaarheid verhogen. Wanneer deze mogelijke veranderingen ook leiden tot een verhoogde P-opname zal dit indirect ook een positief effect hebben op P-uitspoeling.

Het effect van het toedienen van organische meststoffen dan wel organische bodemverbeteraars op de uitspoeling van P uit de bodem wordt bepaald door:

- De bodem; zoals bepaald door de bodemspecifieke sorptie-isotherm, en te meten door een combinatie van een maat voor de P-concentratie in de bodemoplossing, de hoeveelheid geadsorbeerd P en het adsorptiemaximum;
- De P-beschikbaarheid van het toegevoegde product; te meten met de aangepaste Oxitop® methode;
- De interactie tussen product en bodem en met name het effect op de adsorptiecapaciteit van de bodem.


De resultaten van deze studie laten zien dat voor uitspoelingsgevoelige gronden die sterk zijn opgeladen met fosfaat én een lage buffer capaciteit hebben, winst te behalen is in de milieubelasting met fosfaat bij het gebruik van organische producten met een netto lage P-mineralisatie dan bij het gebruik van producten met een netto hoge P-mineralisatie.

7 Dankwoord

Aan dit onderzoek hebben verschillende mensen meegewerkt die ik bij deze hartelijk wil bedanken. Eyal Ben-Simchon thank you for your diligent work in performing the column experiments. Odalys Jimenez, thank you for your skill and patience in analysing all the leachate samples. Maurizio Degli Innocenti and Mirjam van Eekert thank you for the nice cooperation between Environmental Technology (WUR) and NMI. Maurizio thank you for the extra analyses you performed for the leaching experiment.

8 Literatuurlijst

- Amery F., F. Degryse, K. Cheyens, I. De Troyer, J. Mertens, R. Merckx, E. Smolders (2008) The UV-absorbance of dissolved organic matter predicts the fivefold variation in its affinity for mobilizing Cu in an agricultural soil horizon. *European Journal of Soil Science* Volume 59, Issue 6
- Breeuswa, A., & Schoumans, O. (1986). Fosfaatophoping en -uitspoeling in de bodem van mestoverschotgebieden.
- De Haan J, Verstegen H & Van Geel W (2016). Effect van organische stof op opbrengst, stikstofuitspoeling en bodemkwaliteit. Presentatie tijdens het symposium Beter Bodembeheer, Lunteren, 4 oktober 2016.
- Devau, N., Hinsinger, P., Le Cadre, E., Colomb, B., & Gérard, F. (2011). Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.02.034>
- Ehlert, P.A.I., H.P. Pasterkamp & P.R. Bolhuis, 2004. Effecten van organische bodemverbeterende middelen op de beschikbaarheid van fosfaat in de bodem op korte en lange termijn. Wageningen, Alterra, Alterrarapport 991. 30 blz.; 5 fig.; 12 tab.; 16 ref.
- Ehlert, P.A.I., 2005. Toepassing van de basisvruchtbehandeling op fosfaat van compost; Advies. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 5. 66 blz. 10 fig.; 7 tab.; 18 ref.; 2 bijl.
- García-Albacete, M., Tarquis, A., & Cartagena, M. (2014). Risk of leaching in soils amended by compost and digestate from municipal solid waste. *Scientific World Journal*.
- Maguire, R., & Sims, J. (2002). Soil Testing to Predict Phosphorus Leaching. *Journal of Environment Quality*.
- Mcdowell, R., & Sharpley, A. (2001). Approximating Phosphorus Release from Soils to Surface Runoff and Subsurface Drainage. *Journal of Environmental Quality*, 30(2), 508–520.
- Schoumans, O.F., 2004. Inventarisatie van de fosfaatverzadiging van landbouwgronden in Nederland. Alterra rapport 730.4. Alterra, Wageningen. In het kader van de Evaluatie Meststoffenwet 2004
- Schoumans, O. F. (2015). Phosphorus leaching from soils: process description, risk assessment and mitigation. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen.
- Schoumans, O.F. en P. Groenendijk, 2000. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands. *J. environ. Qual.* 29 (2000), 1: 111-116.
- Schröder, J.J., H.F.M. Aarts, J.C. van Middelkoop, M.H.A. de Haan, R.L.M. Schils, G.L. Velthof, B. Fraters & W.J. Willems, 2007. Permissible manure and fertilizer use in dairy farming systems on sandy soils in The Netherlands to comply with the Nitrates Directive target. *European Journal of Agronomy* 27, 102-114.
- Sinaj S., Traore O., Frossard E. (2002): Effect of compost and soil properties on the availability of compost phosphate for white clover (*Trifolium repens* L.). *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 62: 89–102.
- Vanden Nest et al. (2014a) en Vanden Nest et al. (2014b) Bodemorganische stof opbouwen zonder P-verliezen te verhogen: compost of stalmest? in ILVO MEDEDELING nr 171: BODEM, NUTRIËNTEN, COMPOST: ONDERZOEK VOOR EEN DUURZAME LANDBOUW
- Vanden Nest, T., Vandecasteele B., Ruysschaert, G., Cougnon, M., Merckx, R., Reheul, D., 2014a. Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C levels, crop yield and potential P leaching in a long term trial on a silt loam soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 197, 309-317.
- Vanden Nest, T., Ruysschaert, G., Vandecasteele B., Houot, S., Baken, S., Smolders, E., Cougnon, M., Reheul, D., Merckx, R., 2014b. The long term use of farmyard manure and compost: effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching. *AMBIO*.
- Van Rotterdam-Los A.M.D., (2010) The potential of soils to supply phosphorus and potassium; processes and predictions. Ph.D. thesis Wageningen University, Wageningen. 144 p.
- Van Rotterdam AMD, E.J.M. Temminghoff, W.D.L. Schenkeveld, T. Hiemstra, W.H. van Riemsdijk (2009) Phosphorus removal from soil using Fe oxide-impregnated paper: Processes and applications. *Geoderma* 151 p. 282–289
- Van Der Zee, S., & Van Riemsdijk, W. (1988). Model for Long-term Phosphate Reaction Kinetics in Soil.
- Weng, L., Van Riemsdijk, W., & Hiemstra, T. (2012). Factors Controlling Phosphate Interaction with Iron Oxides. *Journal of Environment Quality*.
- Zheng, S., Zheng, X., & Chen, C. (2012). Leaching Behavior of Heavy Metals and Transformation of Their Speciation in Polluted Soil Receiving Simulated Acid Rain. *PLoS ONE*.



www.nmi-agro.nl

nutriënten management
instituut nmi bv
nieuwe kanaal 7c
6709 pa wageningen
nmi@nmi-agro.nl