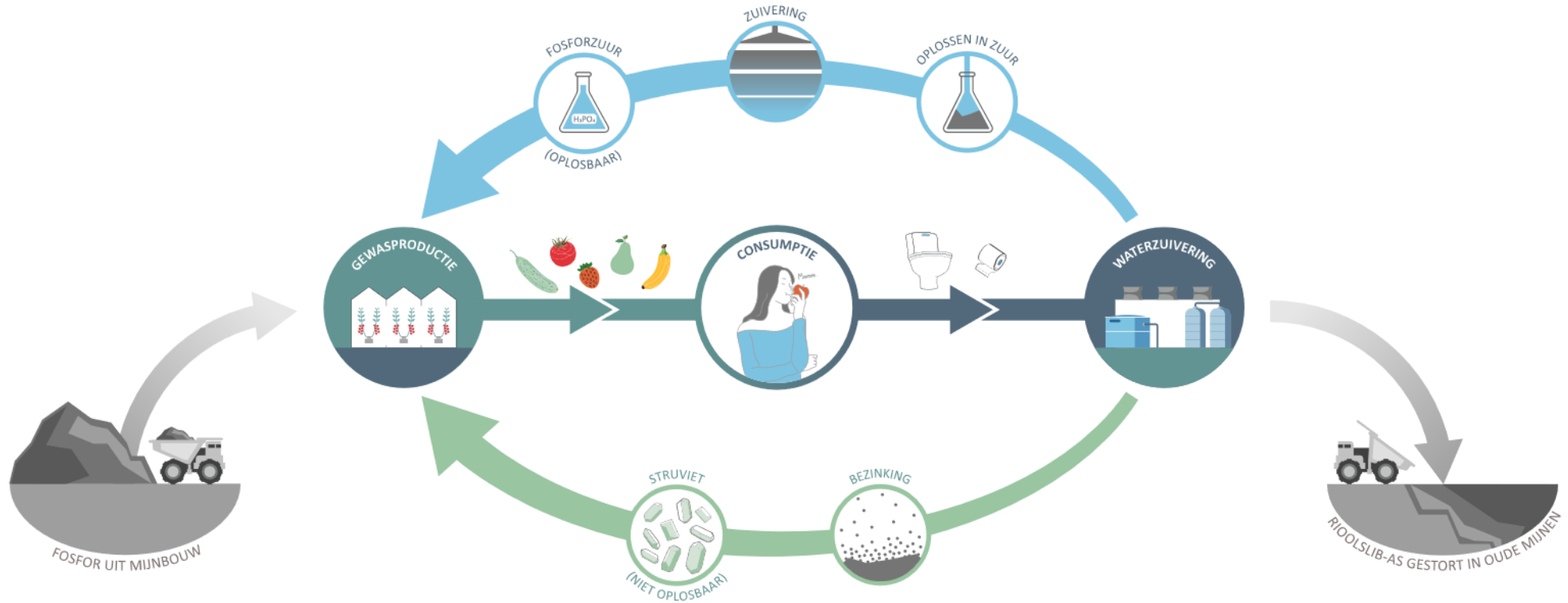


Fosforterugwinning uit reststromen voor de glastuinbouw



Alexander van Tuyl¹, Marc Lanting², Erik de Lange³, Alexander Boedijn¹, Jolanda van Medevoort², Andries Koops³

1 Business Unit Glastuinbouw & Bloembollen, Wageningen Plant Research

2 Wageningen Food & Biobased Research

3 Wageningen Food Safety Research

Introductie

Nederland heeft een sterke positie opgebouwd in het produceren en exporteren van veilige en hoogwaardige landbouwproducten door in te zetten op innovatie en hoge efficiëntie. Er moeten echter dringende uitdagingen worden aangepakt, zoals het verminderen van de uitstoot van nutriënten door het agrovoedingssysteem en het verminderen van de afhankelijkheid van minerale hulpbronnen. Om deze uitdagingen het hoofd te bieden, moet de agrarische voedselketen overstappen van een 'lineair' systeem naar een meer 'circulair' systeem. Zo'n transitie vraagt om veranderingen in het gedrag van voedselproducenten, afvalverwerkers en consumenten. In dit circulaire systeem worden nutriënten uit mest, industrie, huishoudelijk afval en andere reststromen zoveel mogelijk teruggevoerd naar het voedselproductiesysteem om verliezen voor het milieu tot een minimum te beperken.



Figuur 1: Een foto van een glastuinbouwbedrijf

Fosfaatmeststof brengt unieke uitdagingen met zich mee vanwege zijn cruciale rol in de groei van gewassen. Net als stikstof wordt een te hoge fosfaatuitstoot in verband gebracht met milieuproblemen zoals eutrofiëring. In tegenstelling tot stikstof is mineraal fosfaat beperkt beschikbaar omdat het afkomstig is van eindige fosfaatgesteente. De maximale wereldwijde productiesnelheid van fosfaat, bekend als 'piek fosfaat', zal naar verwachting tussen 2060 en 2100 plaatsvinden, waarna fosfaat moeilijker te winnen zal zijn en/of duurder zal worden [2, 3]. Recente ontdekkingen van nieuwe fosfaatreserves in Noorwegen kunnen dit uitstellen, maar mineraal fosfor blijft een eindige hulpbron. De concurrentie om deze hulpbron zal de komende decennia toenemen, met name door het gebruik ervan in batterijen. Bovendien schrijft de Nederlandse regelgeving voor dat de uitstoot van P door de tuinbouwproductie in 2027 vrijwel nul moet zijn vanwege milieuoverwegingen [5, 6]. Dit vereist een nauwkeurig beheer van voedingsstoffen voor planten tijdens de productiecycli van gewassen. Daardoor is de glastuinbouw bijzonder afhankelijk van zuivere (fosfaat)meststoffen.

In Nederland vindt een aanzienlijk deel van de groente- en sierteelt plaats in klimaatgestuurde kassen. In deze kassen worden de planten gekweekt in kunstmatige groeimateriaal met een voedingsoplossing. In tegenstelling tot vollegrondslandbouw, is de glastuinbouw voornamelijk afhankelijk van nauwkeurig geformuleerde voedingsoplossingen, met nutriënten afkomstig uit eindige natuurlijke reserves. Deze whitepaper richt zich op het circulaire potentieel van een van de belangrijkste voedingsmineralen: fosfor (P).

De principes van de circulaire economie stellen voor om P-rijke reststromen te hergebruiken in het agrarisch voedselsysteem, waarbij de glastuinbouw mogelijk een sleutelrol speelt. Deze whitepaper is een samenvatting van een rapport dat WUR in 2024 publiceerde [7], en houdt het volgende in:

- 1) beschikbare P-rijke reststromen in Nederland;
- 2) de huidige technologieën om reststromen om te zetten in meststoffen die geschikt zijn voor de glastuinbouw;
- 3) de toepasbaarheid van teruggewonnen P-producten in de glastuinbouw;
- 4) de mogelijke risico's van aanwezige verontreinigingen.

Toepassing van P in de huidige fertigatiesystemen

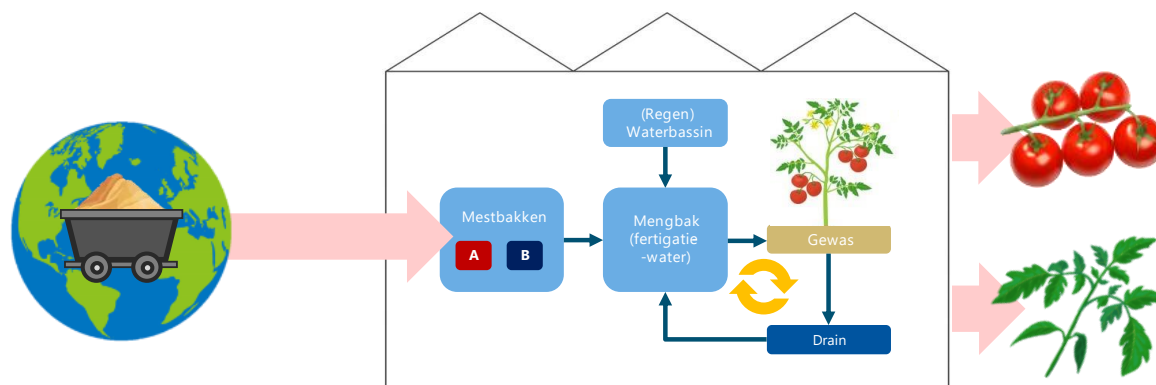
In fertigatiesystemen worden nutriënten automatisch toegevoerd aan het circulatiewater dat de wortels van het gewas voedt (Figuur 2). Twee bakken (de zogenaamde 'A'- en 'B'-bakken) worden vaak gebruikt om verschillende soorten meststoffen geconcentreerd op te slaan en af te geven. Elke bak bevat meststoffen die compatibel zijn wanneer ze in één tank worden gemengd. Cruciaal is dat P apart moet worden opgeslagen van calcium (Ca) en ijzer (Fe) om neerslag te voorkomen. Daarom worden Ca- en Fe-meststoffen opgeslagen in de A-bak en P-meststoffen in de B-bak. Tijdens fertigatie wordt water met de juiste hoeveelheden meststoffen uit de A- en B-bakken gemengd, voordat de voedingsoplossing aan de wortels van de plant wordt afgegeven. Het overschot dat niet door het gewas wordt opgenomen, de zogenaamde 'drain', wordt weer opgevangen en opnieuw in het systeem gebracht. Dit systeem zorgt voor nauwkeurige controle en efficiënte toediening van voedingsstoffen op basis van de specifieke behoeften van het gewas tijdens de teelt. Het is van cruciaal belang dat de meststoffen die in grondloze teeltsystemen worden gebruikt, volledig oplosbaar zijn en geen neerslag vormen onder typische concentraties en pH-waarden die aanwezig zijn in het fertigatiesysteem. Dit is een gegeven voor veel producten die momenteel worden gebruikt, gepresenteerd in Tabel 1.

Tabel 1. De namen en chemische formules van producten die worden gebruikt in minerale meststoffen in de glastuinbouw, aangepast van Sonneveld & Voogt [8].

Naam	Chemische formule	%P	Oplosbaarheid	Gebruikt bij fertigatie
(Ortho)fosforzuur	H_3PO_4	32	Hoog	Ja
Mono kaliumfosfaat	KH_2PO_4	22	Hoog	Ja
Mono-ammoniumfosfaat	$NH_4H_2PO_4$	26	Hoog	Ja
Polyfosfaat	$HO(HPO_3)_nH$	Merkaafhankelijk ^a	Hoog	Ja
Super fosfaat	$Ca(H_2PO_4)_2$	20	Laag	Nee
Dicalciumfosfaat	$CaHPO_4$	20	Laag	Nee

^aExacte chemische samenstelling wordt niet gepubliceerd

^bProducten met een hoge oplosbaarheid worden verkocht in vast- en vloeibare vorm, met uitzondering van fosforzuur, dat alleen als waterige oplossing wordt verkocht.



Figuur 2: P-toepassing in een fertigatiesysteem met behulp van lineaire bronnen van voedingsstoffen

Fosfaatrijke reststromen als potentiële bron van circulair P

Het totale glasareaal in Nederland is ongeveer 10.000 ha. Van der Lugt [9] schat dat de glastuinbouw ongeveer 2.500 ton P per jaar gebruikt. Verschillende organische rest- en afvalstromen, waaronder bijproducten van de agrarische voedselproductie en de behandeling van stedelijk afvalwater, leveren voldoende P om aan de vraag van de sector te voldoen, zoals blijkt Figuur 3. De belangrijkste fosfaatrijke reststromen zijn:

Mest. Mest komt naar voren als de grootste circulaire bron van P, waarbij verschillen in concentratie en verwerking de bruikbaarheid beïnvloeden. Het direct uitrijden van drijfmest op agrarische grond is gebruikelijk, maar wordt beperkt door wettelijke limieten waardoor er in Nederland een mestoverschot ontstaat. De betaalbaarheid van mest per ton P varieert met het type mest, waarbij digestaat van herkauwers wordt beoordeeld als de meest betaalbare optie. Deze optie bevat echter ook de laagste concentratie P, waardoor P-terugwinning een grotere uitdaging wordt.

Zuiveringsslib. In Nederland verwerken rioolwaterzuiveringsinstallaties jaarlijks ongeveer 9.000 ton P, wat voldoende is om aan de P-vraag van de glastuinbouw te voldoen. Slib wordt ontwaterd en soms verwerkt met anaërobe vergisting om biogas te genereren. Het ontwaterde slib, of digestaat, (in totaal 1,4 miljoen ton) wordt verbrand tot zuiveringsslibas, waar het grootste deel van P terecht komt. Het is technologisch haalbaar om P terug te winnen uit rioolwater en slib.

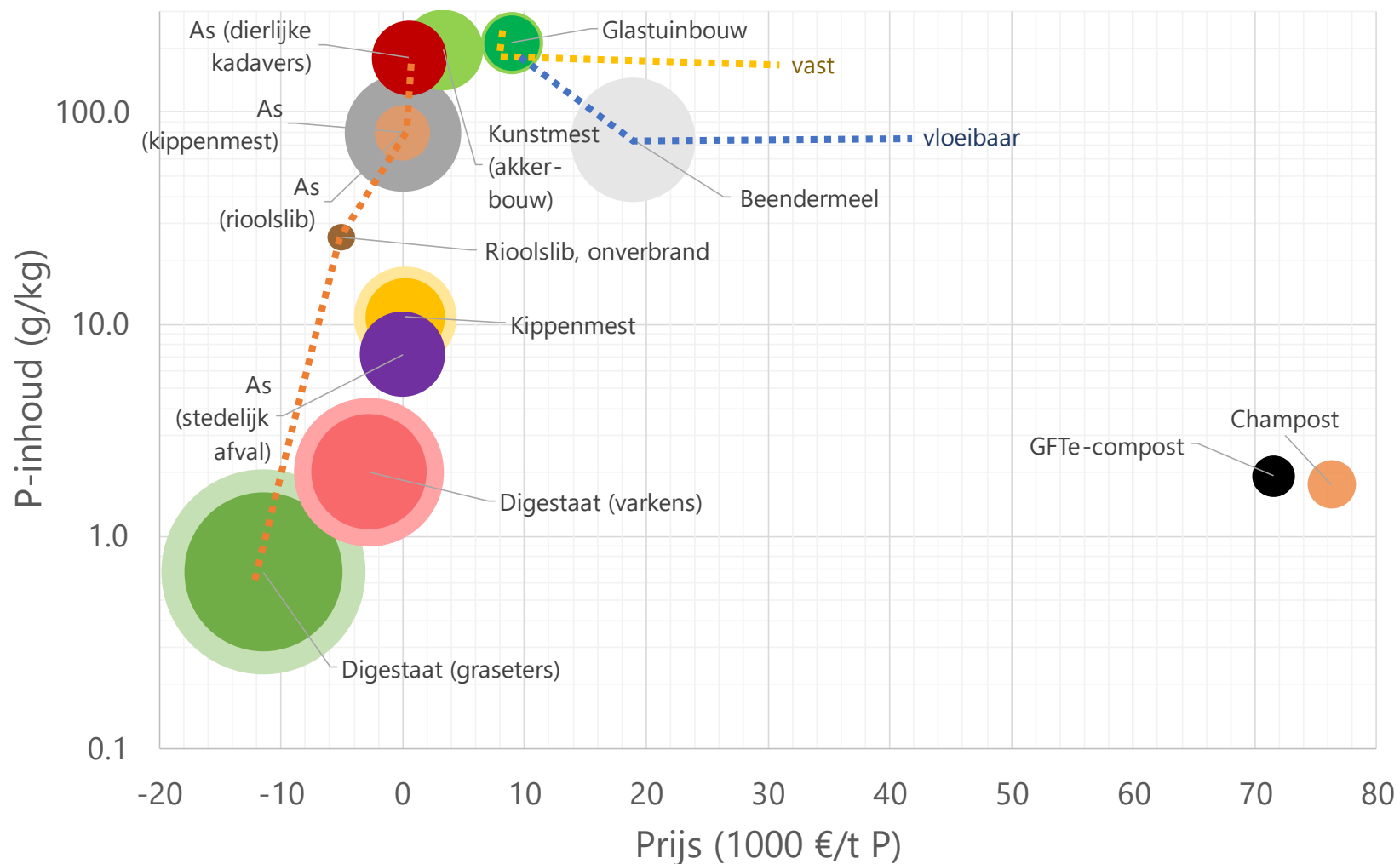
As van mest en slib. Verschillende assen die vrijkomen bij de verbranding van reststromen zijn een bron van P. Naast zuiveringsslibas is Nederland kippenmest een andere bijzonder relevante bron. Jaarlijks wordt ongeveer 30% van de kippenmest momenteel verbrand, waarbij een as achterblijft die rijk is aan P en K en die vaak wordt geëxporteerd voor gebruik als meststof. Op dezelfde wijze wordt 95% van het zuiveringsslib in Nederland verbrand, waarbij een zuiveringsslibas van ongeveer 10% P ontstaat. De zuiveringsslibas wordt voornamelijk gestort of gebruikt in de bouw waardoor kostbare P verloren gaat. Verbrandingsinstallaties hebben een aanzienlijke potentie om P-meststoffen te produceren, waardoor P binnen de nutriëntencyclus wordt gehouden. Als gevolg van wettelijke vereisten

komen er steeds meer initiatieven en ontwikkelingen rond het terugwinnen van P uit zuiveringsslibas. Zo verplicht de aankomende wetgeving in Duitsland de terugwinning van P uit zuiveringsslib(as), waardoor de export van Nederlands slib(-as) naar het land wordt beperkt en alternatieve routes voor slibverwerking noodzakelijk worden.

Beendermeel. Ongeveer 10.000 ton P per jaar zit in beendermeel, wat een bijproduct is van kadavers van dieren of slachthuisafval. Twee derde van het Nederlandse beendermeel wordt al gebruikt als additief in keramiek of als langzaam vrijkomende meststof vanwege het fosforgehalte van 7-9%. Daarom is het gebruik van beendermeel als P-bron in de glastuinbouw misschien niet direct behulpzaam voor het duurzaam sluiten van de nutriëntenkringloop, maar eerder een heroriëntering van een bestaande route.

Compost en Champost. Compost bestaat voor een groot deel uit gecomposteerd groente-, fruit- en tuinafval en champost is een gebruikte champignonsubstraat bestaande uit een mengsel van paardenmest, kippenmest, stro en gips. De verbruikte champost is min of meer uitgeput van N, maar bevat nog steeds wat P. De P-volumes van beide composten zijn relatief klein en beide stromen worden al gebruikt in potgrond of bodemverbeteraars. Bovendien zijn ze duur per kg P en ligt hun toegevoegde waarde niet alleen in hun mineraalgehalte, maar ook in hun organische stofgehalte. Het grote volume in combinatie met het lage P-gehalte betekent dat compost en champost geen goede P-bronnen zijn voor de glastuinbouw, tenzij de organische fractie grotendeels wordt verwijderd (omgezet in energie) door fermentatie of verbranding, waardoor een fosfaatrijke as over zou blijven.

Deze opgesomde reststromen worden gevisualiseerd met drie criteria: 1) de totale jaarlijkse hoeveelheid P in Nederland; 2) de concentratie van P in de reststroom; en 3) de verwachte prijs per kg P (Figuur 3). In deze figuur is ook de totale hoeveelheid P weergegeven die nodig is in de glastuinbouw.



Figuur 3: Een overzicht van de belangrijkste fosforhoudende reststromen in Nederland. De horizontale as toont de prijs (1000 €/ton P); de verticale as (logaritmisch) geeft de P-concentratie (g P / kg) weer. De afmetingen van de cirkels komen overeen met de totale hoeveelheid P (ton) die ze vertegenwoordigen. Voor mest geeft de lichtgekleurde omtrek de organische fractie fosfor in de totale stroom weer. Het donkergroene deel van de glastuinbouw vertegenwoordigt de P-vraag (ton en actuele mediane prijs) van grondloze systemen. De gele en blauwe stippellijnen geven het scala aan mogelijkheden weer voor respectievelijk vaste en vloeibare meststoffen. Een oranje stippellijn is toegevoegd als Pareto-front.

Figuur 3 toont een wisselwerking tussen de P-concentratie en de prijs van reststromen. Het Pareto-front toont de reststromen waarvoor het onmogelijk is om op het ene criterium te verbeteren zonder het andere op te offeren. Pluimveemest staat bijvoorbeeld niet op het Pareto-front omdat er goedkopere reststromen zijn die een hogere P-concentratie hebben. De mogelijke reststromen aan het Pareto-front zijn digestaat van herkauwers, onverbrand zuiveringsslib, zuiveringsslibas, pluimveemest en as van kadavers van dieren. Compost en champost worden vanwege hun lage P-gehalte en hoge kosten ongeschikt geacht als grondstof voor P-terugwinning voor de glastuinbouw.

Misschien wel de belangrijkste constatering van Figuur 3 is de plaatsing van de cirkels die synthetische P-meststof in de akkerbouw en glastuinbouw voorstellen. In Nederland gebruikt de glastuinbouw een derde van de totale synthetische P-meststoffen, omdat de akkerbouw ook dierlijk mest gebruikt. Bovendien is de prijs van deze meststoffen zo'n drie tot tien keer hoger dan in de akkerbouw doordat de glastuinbouw pure en wateroplosbare P-meststoffen gebruikt. Hoewel de glastuinbouw strengere eisen stelt (die in een latere hoofdstuk aan bod komen), kan dit meer economische ruimte laten voor producten op basis van P-terugwinning door middel van nieuwe technologieën.

Kostprijzen en concentraties zijn de meest relevante factoren waarmee rekening moet worden gehouden, maar niet de enige. Een andere factor is de chemische of zoutvorm waarin de P aanwezig is, die de geschiktheid voor P-terugwinningstechnologieën kan bepalen. Andere aspecten zijn onder meer productieschalen en terugwinningskosten van P-terugwinningstechnologieën. Een ander criterium waarmee rekening moet worden gehouden bij de keuze van reststromen is de aanwezigheid van contaminanten, wat niet zozeer een kostenbeperkende factor is, maar eerder mogelijke risico's en wetsovertredingen van de bemestingswetgeving met zich meebrengt. Deze aspecten worden kort behandeld in afzonderlijke hoofdstukken, die betrekking hebben op technologieën, tussenproducten en verontreinigingskwesaties.



Technologieën om P te herwinnen uit reststromen

Dit hoofdstuk behandelt P-terugwinning uit mest, zuiveringslib en as. De belangrijkste technologieën voor P-terugwinning worden gepresenteerd, met de nadruk op processen die op korte termijn kunnen worden geïmplementeerd. P-terugwinningsprocessen maken gebruik van grondstoffen die in twee groepen kunnen worden ingedeeld: waterige oplossingen (vloeibare fractie uit mest, afvalwater) en vaste materialen (zuiveringslib, as, ontwaterde mest).

Wanneer P opgelost is in afvalwater, kan het worden teruggewonnen of verwijderd door gebruik te maken van (een combinatie van) vier principes: kristallisatie & precipitatie, adsorptie, biologische verwijdering en membraanscheidingsprocessen (Figuur 4). Met biologische verwijdering wordt P opgehoopt in micro-organismen, die uiteindelijk in de vaste zuiveringslib terecht komen. Bij kristallisatie en precipitatie worden Ca-, Mg- of Fe-zouten aan het water toegevoegd om de opgeloste P neer te slaan: als Ca-P ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), $\text{Ca}(\text{HPO}_4)$ of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$), struviet ($(\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4 \cdot 6(\text{H}_2\text{O}))$) of vivianiet ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$).

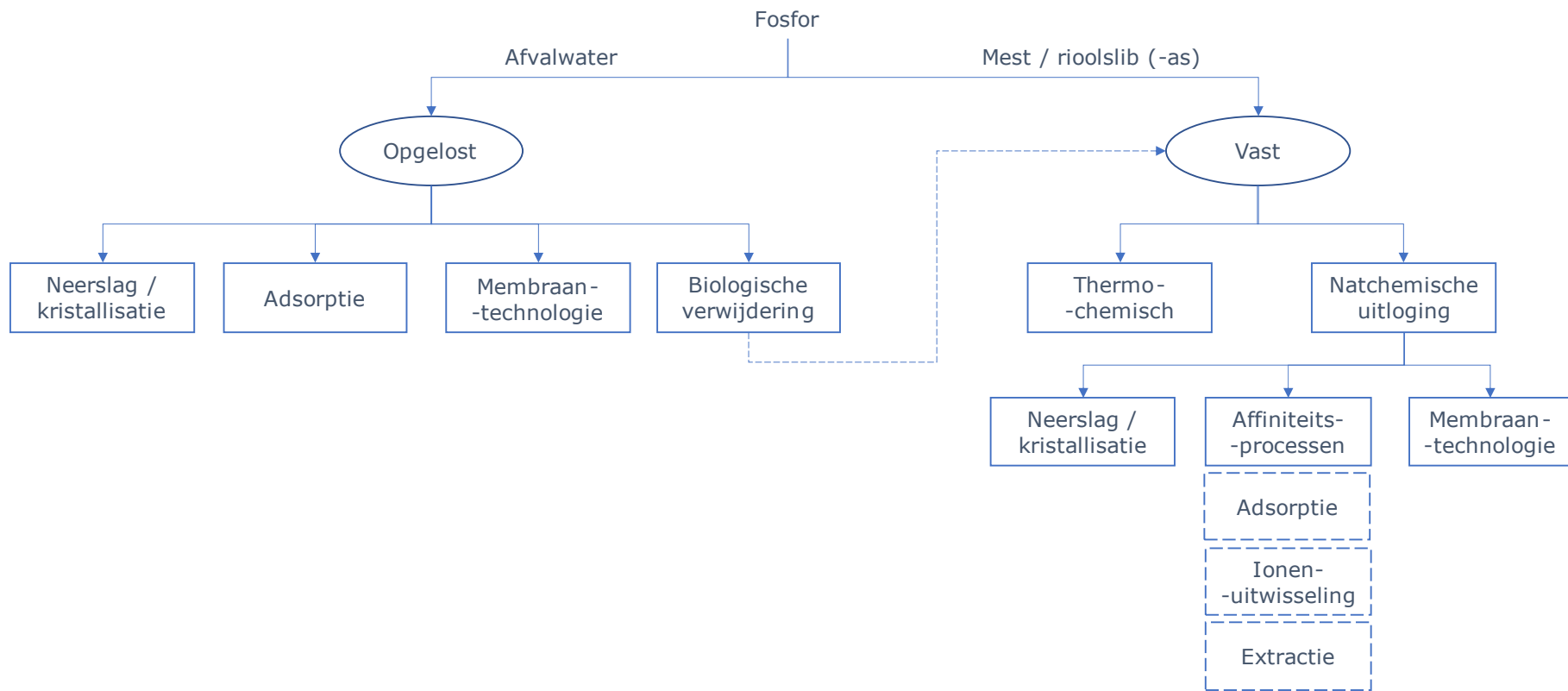
Wanneer P aanwezig is in de vaste fase, worden thermochemische processen of nat-chemische processen gebruikt (Figuur 4). Een voorbeeld van een nat-chemisch proces is het gebruik van een zuur om P uit zuiveringslib of SSA te halen. Na de extractie van P uit vaste stoffen kan opnieuw (een combinatie van) drie methoden worden gebruikt om P verder te zuiveren: precipitatie/kristallisatie, affiniteitsprocessen (adsorptie, ionenuitwisseling) en membraanscheiding. Hier bespreken we kort de methoden die worden gebruikt om P terug te winnen uit mest, slib en zuiveringslibas:

Mest. Een voorbeeld van een P-terugwinningsproces uit mest is het RePeat-proces [10] (Tafel 2). Voor de terugwinning van P uit mest worden de volgende stappen toegepast: anaerobe vergisting van mest, scheiding van het digestaat in vaste en natte fracties, hygiëniseren van de dikke fractie om microben te doden, verzuring van de vaste fractie om P vrij te maken en tenslotte terugwinning van een Ca-P of Mg-P neerslag door toevoeging van calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) of magnesiumhydroxide ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). De efficiëntie van P-terugwinning is over het algemeen hoog.

Zuiveringslib. Terugwinning van P uit slib is een uitdaging vanwege de lage terugwinnings efficiëntie (35-70%); hoge kosten; en de aanwezigheid van een overvloed aan microverontreinigende stoffen, waaronder medicijnen, wasmiddelen, per- en polyfluoralkylstoffen (PFAS) en zware metalen. P-terugwinning uit zuiveringslib gebeurt al in de rioolwaterzuivering van Amsterdam-West. Zuiveringslib wordt eerst anaeroob verteerd, gevolgd het toevoegen van $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Vervolgens wordt het slib belucht om de Mg-P-kristallisatie op gang te brengen. De resulterende struvietkristallen worden gewassen om verontreinigingen te verwijderen. Een commerciële speler op het gebied van struvietproductie is Veolia, dat zijn eigen Struvia-proces™ heeft geïmplementeerd [11] in diverse RWZI's in Europa en Noord-Amerika. Een vergelijkbaar proces moet in 2025 operationeel zijn bij de RWZI Nieuwveer van Waterschap Brabantse Delta, waarbij P wordt neergeslagen als vivianiet met behulp van ijzer en het gepatenteerde ViviMag®-proces [12]. Om de onoplosbare P opgesloten in struviet of vivianiet beschikbaar te maken, kan de P opnieuw worden geëxtraheerd met behulp van een zuur en vervolgens verder worden gezuiverd tot fosforzuur (H_3PO_4).

As. As ontstaat bij het verbranden van organisch afval, zoals kadavers van dieren, mest of zuiveringslib. De resulterende as is vrij van microben, organisch materiaal en van de meeste organische microverontreinigingen, maar is rijk aan (zware) metalen [13]. Het P-gehalte van as kan oplopen tot 15% en P kan worden teruggewonnen uit as met een efficiëntie van meer dan 90%. Een ander voordeel van as is de mogelijkheid om P-zuur te produceren, dat direct kan worden gebruikt in grondloze systemen. P-zuur wordt geproduceerd uit as met behulp van chemische uitloging, meestal met een zuur als uitloogmiddel. Een voordeel van het gebruik van zwavelzuur of oxaalzuur als uitloogmiddel is de gelijktijdige vorming van onoplosbaar gips of calciumoxalaat om de vorming van calciumfosfaat te voorkomen [14]. Andere mogelijke P-producten uit as zijn ammonium- en calciumfosfaten.

Tafel 2 geeft een overzicht van de processen die worden gebruikt om P terug te winnen uit mest, slib en as en de daaruit voortvloeiende P-producten.



Figuur 4: Een overzicht van mogelijke processen om fosfor terug te winnen uit verschillende bronnen, gecategoriseerd als vloeibaar (waarbij P is opgelost) of vast op basis van Witek-Krowiak, Gorazda [1].

Tafel 2. Overzicht van P-terugwinningsprocessen van bedrijven om P te winnen uit mest, slib en as.

Grondstoffen	Proces	Hoofd P-product	Grondstoffen	Bijproducten
Mest	RePeat	Struviet (of Ca-P)	(Zwavel)zuur, magnesiumhydroxide (of calciumhydroxide)	Bodemverbeteraar
Zuiveringsslib	Struvia	Struviet	Magnesiumchloride, co-substraat (koolstofbron) voor bio-verzuring	Biogas, organische meststof
	POLSSLAG	Ca-P (of Mg-P)	(Zout)zuur, metaalextractieoplosmiddel, alkalische oplossing (regeneratie-extractieoplosmiddel), kalk, calciumhydroxide	Slibresten, metaaloplossing, afvalwater
	EuPhoRe	Gedemineraliseerde as	Magnesiumchloride	Rookgas
Zuiveringsslibas	TetraPhos	P-zuur	(P-zuur), zwavelzuur, zoutzuur	Asresten, gips, metaaloplossing
	RubiPhos	P-zuur, Ca-P of struviet	Zwavelzuur	Asresten, metaaloplossing
	PARFORCE	P-zuur	zoutzuur, regeneratiemiddelen (1e ionenwisselaar: zoutzuur of HCl of natriumthiosulfaat; 2e ionenwisselaar: zoutzuur of zwavelzuur)	Asresten, metaaloplossingen, strooizout
	Phos4Life	P-zuur	Zwavelzuur, extractieoplosmiddel, regeneratiechemicaliën	Asresten, metaaloplossing, (ijzerchloride)
	SusPhos	P-zuur	Zwavelzuur, oplosmiddel, ammoniak	Zand, metalen, gips
	Ash2Phos	Ca-P	Zoutzuur, kalk	Asresten, metaaloplossing, zouten, ijzerchloride, natriumaluminaat

Gebruik van herwonnen P uit reststromen in een fertigatiesysteem

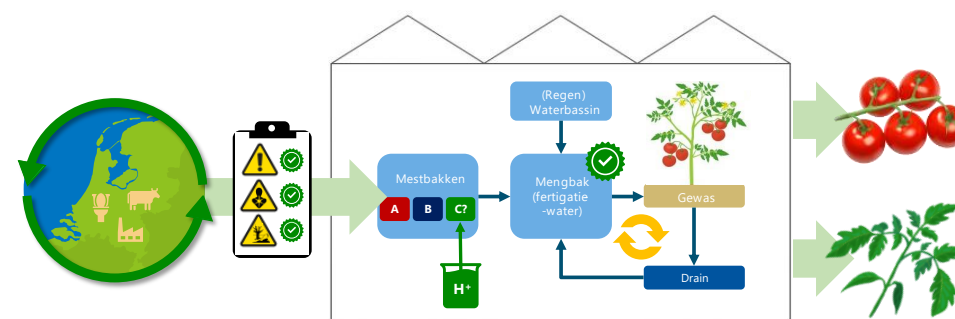
Verschillende P-terugwinningsprocessen produceren fosforzuur. De teruggewonnen P kan vervolgens worden gemengd in de B-bak van huidige fertigatiesystemen. Andere P-terugwinningsprocessen produceren struviet, calciumfosfaten of vivianiet, die onder normale omstandigheden niet volledig oplosbaar zijn in water.

Als P-terugwinningsprocessen die fosforzuur produceren niet kosteneffectief zijn of geen P-zuur met de vereiste zuiverheid kunnen produceren, kan een andere optie zijn om in plaats daarvan struviet of Ca-P toe te passen in aangepaste fertigatiesystemen. Hiervoor moet een derde 'C'-bak worden geïnstalleerd waarin deze producten worden opgelost in een zure oplossing, en moet de fertigatiestrategie daarop worden aangepast. In hoeverre dit mogelijk is, is geanalyseerd met de OLI Studio Stream Analyzer software [15]. Uit onze analyse blijkt dat op basis van pH en salpeterzuurconcentratie alle vier de verbindingen volledig kunnen worden opgelost in een C-bak bij een pH van ongeveer 3 (Tabel 3), wat resulteert in technologische mogelijkheden om deze Ca-P of struviet als P-meststof te gebruiken in een aangepast fertigatiesysteem. Uitgaande van salpeterzuur geeft dit een aanzienlijk verschil in verhouding nitraat (NO_3^-) tot fosfor in de C-tank tussen die vier producten, tussen de 0,1 en 2,1 afhankelijk van het product.

De effecten van de C-tank op het recept, rekening houdend met andere voedingsstoffen, worden als volgt kort beschreven. Monocalciumfosfaat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) kan in huidige fertigatiesystemen worden gebruikt zonder enige verandering in het voedingsrecept. Voor di/tri Ca-P zal de teler moeten kiezen tussen te veel calcium of te weinig nitraat voor het gewas, zij het met een verschil van ongeveer 1 mmol l^{-1} . Als alternatief kan zwavelzuur aan de C-bak worden toegevoegd, om de benodigde hoeveelheid salpeterzuur te verlagen en de $\text{NO}_3^-:\text{P}$ verhouding te verlagen. Het gebruik van struviet zorgt ervoor dat er iets meer magnesium en ammonium naar het gewas gaat in vergelijking met de huidige voedingsrecepten, hoewel dit verschil relatief klein is met $0,1$ à $0,2 \text{ mmol l}^{-1}$.

Tabel 3. De resultaten van de OLI-simulatie voor een hypothetische 'C-bak' waarbij P-producten ter plaatse in zuur worden opgelost, met de concentratie van het product, de maximale pH die nodig is om het volledig op te lossen en de overeenkomstige minimumconcentraties anionen uit het gebruikte zuur. Producten worden gegeven in afnemende volgorde van N:P-verhouding.

Product	C-tank concentratie (mmol l^{-1})	Maximale pH (neerslagpunt)	HNO_3^- concentratie (mmol l^{-1})	$\text{NO}_3^-:\text{P}$ verhouding (-)
Tri Ca-P ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)	75	2.8	310	2.1
Struviet ($\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$)	150	3.3	300	2.0
Di Ca-P($\text{Ca}(\text{HPO}_4)$)	150	3.0	160	1.1
Mono Ca-P ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)	75	3.2	10	0.1



Figuur 5: P-toepassing in een circulair fertigatiesysteem, met C-bak en contaminant-eisen (volgend hoofdstuk).

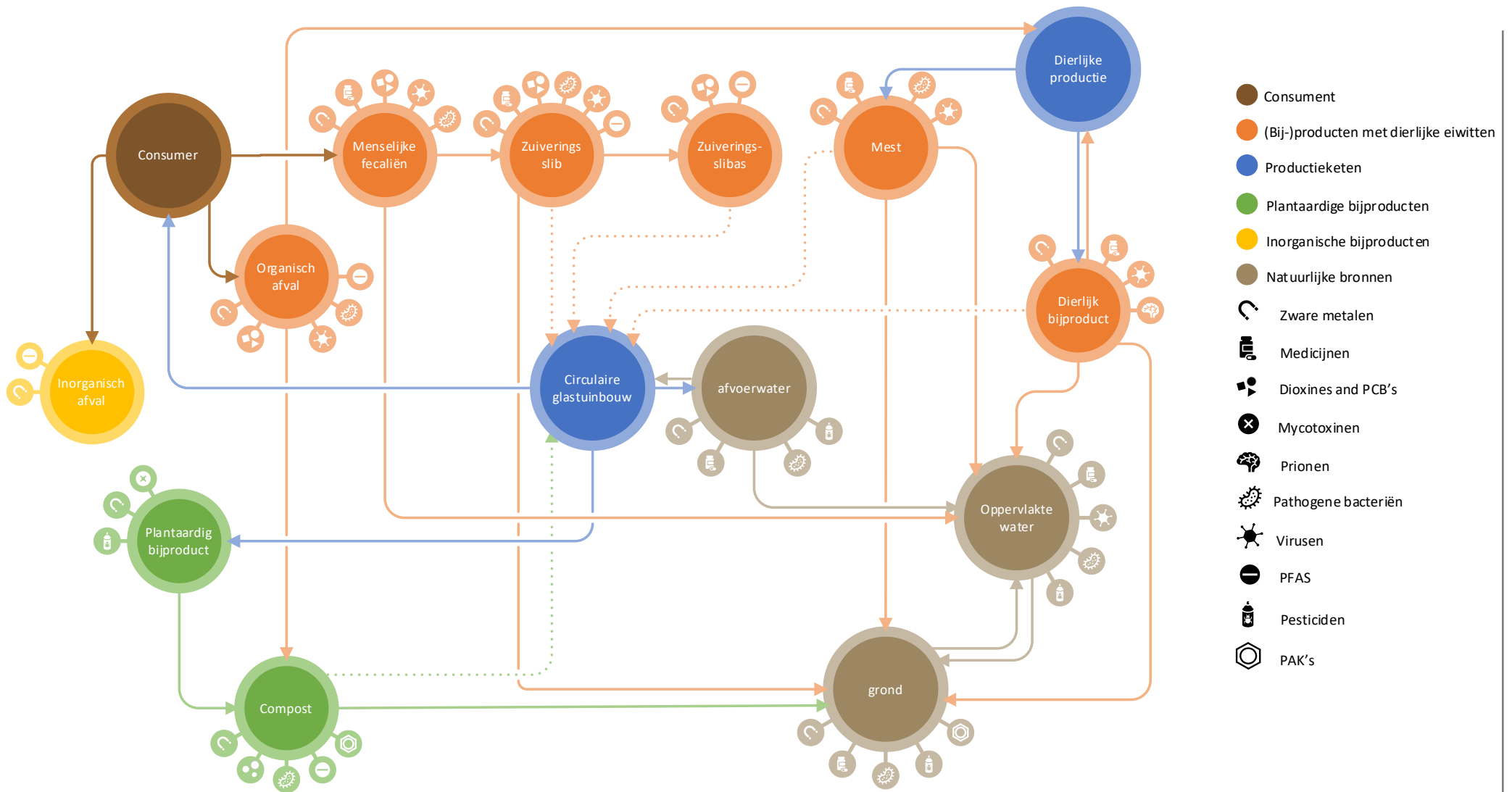
Contaminanten

Ondanks het belang van circulaire voedselsystemen, kunnen zulke systemen voedselveiligheidsrisico's met zich meebrengen. Veel chemicaliën die worden gebruikt bij de bescherming van gewassen en vee (zoals pesticiden, koper, zink en diergeneesmiddelen) of bij de voedselproductie, afvalverwerking of terugwinning van voedingsstoffen, kunnen als verontreinigingen in de teruggewonnen producten zoals P-meststoffen terechtkomen. Deze contaminanten kunnen vervolgens in het agrarisch voedselsysteem terechtkomen en mogelijk de plantengroei beïnvloeden of een risico zijn voor de voedselveiligheid. De potentiële voedselveiligheidsrisico's van een circulair agrarisch voedselsysteem is samengevat in Figuur 6.

Gerecyclede meststoffen geproduceerd uit reststromen kunnen verschillende verontreinigingen bevatten, waardoor het noodzakelijk is om in de ontwerpfase van circulaire voedselproductiesystemen rekening te houden met voedselveiligheid zodat mogelijke verontreinigingen in gerecyclede meststoffen kunnen worden voorkomen. Dit is van belang om de veiligheid van meststoffen voor consumenten, gewassen en het milieu te waarborgen. De Europese Verordening Bemestingsproducten ('Fertilising Products Regulation' in het Engels, of FPR) reguleert de handel en het transport van bemestingsproducten binnen de EU, met als doel kringlooplandbouw te bevorderen en tegelijkertijd de veiligheid voor het milieu en de gezondheid te waarborgen. Lidstaten moeten hun nationale meststoffenregelgeving – voor Nederland de Bemestingswet – afstemmen op de nieuwe FPR. De FPR en Nederlandse Bemestingswet stellen limieten vast voor organische verontreinigingen, ziekteverwekkers, zware metalen en andere anorganische verontreinigingen om ophoping in de bodem, of recycling via gewassen die de voedselveiligheid in gevaar kunnen brengen, te voorkomen.

De wetgeving heeft betrekking op organische verontreinigingen zoals zware metalen, polycyclische aromatische koolwaterstoffen, menselijke pathogenen en minerale oliën. De FPR bevat momenteel echter geen limieten voor farmaceutische verontreinigingen en persistente organische verontreinigende stoffen zoals PFAS en dioxines in meststoffen, hoewel toekomstige regelgeving deze kan opnemen vanwege milieuoverwegingen.

Naast wetgeving hebben recirculerende systemen unieke uitdagingen in vergelijking met akkerbouwbedrijven, omdat verontreinigingen die in een recirculerend systeem worden geïntroduceerd binnen het systeem blijven. Aangezien meststoffen in het systeem gerecicleerd worden, kunnen verontreinigingen zich in het systeem ophopen, wat risico's met zich meebrengt. Hoewel zware metalen, zoals cadmium en arseen, binnen de wettelijke limieten kunnen vallen, kunnen ze in dergelijke gevallen in de glastuinbouw nog steeds risico's vormen voor gewassen en de menselijke gezondheid. Daarom is zorgvuldige monitoring noodzakelijk bij het creëren van een productieconcept dat gebaseerd is op gerecyclede meststoffen. Bovendien moet het natriumgehalte van meststoffen in grondloze systemen zo laag mogelijk zijn om de fertigatiewaterkwaliteit gedurende de hele gewascyclus te garanderen, idealiter meer dan 20 keer lager dan de huidige limiet in de EU-FPR. Door een hoge waterkwaliteit te behouden, hoeven telers niet te lozen en worden emissies van fosfaat en stikstof vermeden.



Figuur 6: Potentiële (voedsel)veiligheidsrisico's in een circulaire kas als gevolg van het recyclen van reststromen, het tonen van de mogelijke bronnen en transmissieroutes naar de kas van mogelijke microbiële- en chemische contaminanten en emissies naar het milieu (oppervlaktewater, bodem). Aangepast van Focker, van Asselt [4].

Conclusie & toekomstperspectieven

P is essentieel voor plantengroei en voedselproductie, maar minerale P-bronnen zijn beperkt beschikbaar. Het recyclen van P in het agrarisch voedselsysteem is daarom essentieel om de voedselzekerheid voor toekomstige generaties te waarborgen. De glastuinbouw is uitzonderlijk efficiënt met haar P, waardoor er vrijwel geen P-verlies is naar het milieu. Hoewel zulke efficiëntie zowel mogelijk als noodzakelijk is, betekent het wel dat meststoffen aan specifieke eisen moeten voldoen, zoals oplosbaarheid en puurheid.

Verschillende bronnen zijn veelbelovend voor P-teruggewinning, met name zuiveringsslib(as) of kippenmest(as). P kan worden teruggewonnen uit deze bronnen als fosforzuur, wat direct toegepast kan worden. Ook het teruggewinnen van P in de vorm van Ca-P of struviet (Mg-P) is mogelijk. Deze twee producten zijn weliswaar niet direct oplosbaar, maar kunnen wel in zuur worden opgelost en via een derde 'C'-bak in het fertigatiewater worden gemengd. P teruggewonnen uit zuiveringsslibas kan worden teruggewonnen als P-zuur of ammonium-P, dat direct als minerale meststof kan worden toegepast in het gangbare fertigatiesysteem dat bestaat uit een A- en B-tank. De huidige technieken voor het teruggewinnen van P uitgaande van mest of slib produceren momenteel alleen struviet of Ca-P, waardoor een C-bak nodig is.

Beide P-terugwinroutes zijn technisch goed ontwikkeld en bevinden zich in het stadium van industriële opschaling. Partijen die actief zijn in P-extractie uit reststromen zijn op dit moment bezig met het ontwikkelen van afzetmogelijkheden voor het teruggewonnen P. Wij bevelen de glastuinbouwsector aan om de transitie naar het gebruik van circulaire P in gang te zetten en in gesprek te gaan met leveranciers van herwonnen P om de aanvoer van circulair P voor de toekomst te garanderen. De overgang naar een circulair P-gebruik in de tuinbouw moet worden ondersteund door onderzoek naar de vraag óf en hoe de nieuwe P-meststoffen het beste en op een veilige manier voor plant en consument kunnen worden geïntegreerd in fertigatiesystemen, vooral omdat fertigatiesystemen die in kassen worden gebruikt, potentieel ordes van grootte gevoeliger zijn dan de huidige wetgeving doet vermoeden.



Referenties

1. Witek-Krowiak, A., et al., *Fosforterugwinning uit afvalwater en biobased afval: een overzicht*. Bio-ingenieur, 2022. **13**(5): blz. 13474-13506.
2. Brownlie, W.J., et al., *Fosforprijs piekt: een wake-up call voor fosforbestendigheid*. Grenzen in duurzame voedselsystemen, 2023. **7**.
3. Cordell, D., J.-O. Drangert, en S. White, *Het verhaal van fosfor: wereldwijde voedselzekerheid en stof tot nadenken*. Wereldwijde milieuverandering, 2009. **19**(2): blz. 292-305.
4. Focker, M., et al., *Overzicht van voedselveiligheidsrisico's in circulaire voedselsystemen in Europa*. Voedingsonderzoek internationaal, 2022. **158**: p. 111505.
5. van der Salm, C., et al., *Minimaliseren van emissies naar waterlichamen van NW-Europese kassen; met focus op de Nederlandse groenteteelt*. Agrarisch waterbeheer, 2020. **242**: p. 106398.
6. Boezeman, D., J. Liefferink en M. Wiering, *Nieuwe richtingen voor de implementatie van de Kaderrichtlijn Water. Regionale governance verschillen en sturingsvarianten voor de toekomst*. 2019.
7. van Tuyll, A., et al., *Duurzame fosfor voor grondloze glastuinbouw: een verkenning van mogelijke routes*. 2024, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business Unit Glastuinbouw; Nee. WPR-1301). Wageningen Plant Research.
8. Sonneveld, C., et al., *Plantenvoeding in de toekomstige glastuinbouw*. 2009: Aanzetsteen.
9. Van der Lugt, G., *Nutriënten verdeling gewassen*. 2022, Stichting Innovatie Glastuinbouw Nederland,.
10. Regelink, I., et al., *Fosforrecuperatie uit medeverteerde varkensdrijfmest: ontwikkeling van het ReVeen-proces*. 2019, Wageningen Environmental Research.
11. Technologieën, V.W. *Struvia: Duurzame recyclage van fosfor uit afvalwater*[Brochure]. Beschikbaar vanaf: www.anz.veoliawatertechnologies.com/sites/g/files/dvc3496/files/document/2019/02/3351%2C150354_Mkt_Mun_Brochure_STRUVIA_EN_.pdf.
12. Wetsul.nl, *Vivimag* [Internet]. 2020.
13. Werle, S. en M. Dudziak, *Analyse van organische en anorganische contaminanten in gedroogd zuiverings-slib en bijproducten van gedroogde zuiverings-slibvergassing*. Energieën, 2014. **7**(1): blz. 462-476.
14. Liu, H., et al., *Fosforterugwinning uit as en hydrochar uit gemeentelijk slib door middel van natchemische technologie: een herziening van duurzaam afvalbeheer*. Tijdschrift voor chemische technologie, 2021. **417**: Blz. 129300.
15. Oli Studio proces versie 11.5.1.7. 2023; Beschikbaar vanaf: <https://www.olisystems.com/>.

Beeldmateriaal

"Plants in the greenhouse full of light" door Y production/Shutterstock.com

"Top view of group of primary circular sedimentation tanks for sewage cleaning" door Kekyalayaynen/Shutterstock.com

"Ripe tomatoes in the Greenhouse" door Leonidovich/Shutterstock.com