



*Sustainable Use of Phosphorus: Capturing the Philosopher's Stone*  
M.A. de Boer

# Samenvatting

Fosfor (P) is essentieel voor alle vormen van leven. Het is onvervangbaar en daarnaast onverwoestbaar aangezien het een chemisch element is. Ieder jaar wordt 263 miljoen ton fosfaaterts gedelfd, maar alleen een fractie van dit gemijnde fosfaat vindt zijn weg terug in de aarde. De geoogste gewassen worden geconsumeerd en de fosfaten die zich daarin bevinden komen na consumptie in ons riool terecht als afval. Ondanks dat fosfor een schaars element is, eindigen de meeste fosfaten uiteindelijk in waterlichamen, wat leidt tot extreme algengroei en watervervuiling. De mens zou vandaag de dag slechts de helft van de huidige voedselproductie kunnen produceren indien er geen fosfaathoudende kunstmest wordt toegevoegd aan de landbouwgronden. Dit zijn de hoofdredenen waarom fosfaten zouden moeten worden herwonnen en gerecycled om de fosfaatcyclus te sluiten.

In deze PhD thesis getiteld *“Duurzaam gebruik van fosfor: de steen der wijzen gevangen”* worden verschillende essentiële aspecten besproken voor het omzetten van ons huidig lineair gebruik van fosfor naar een circulair proces. Groeiende steden brengen uitdagingen met zich mee, maar ook kansen. Tegenwoordig wordt afvalwater gecontroleerd verzameld in onze rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's). Dit maakt het mogelijk om deze RWZI's te gebruiken als zogenaamde stadsmijnen. Een oplossing is het herwinnen van P uit deze stadsmijnen als struviet of slibas, wat steeds vaker wordt toegepast.

In **hoofdstuk 1** wordt de huidige stand van zaken van de fosfaatmarkt belicht. Fosfaatbronnen zijn niet gelijkelijk verspreid over de wereld; grofweg driekwart

bevindt zich in Marokko en de westelijke Sahara. Bovendien loopt de schatting van de tijd tot de uitputting van deze bronnen wezenlijk uiteen in de verschillende studies. De belangrijkste tussenproducten voor fosforproducten zijn fosforzuur, voornamelijk gebruikt voor de kunstmestindustrie, en witte fosfor, dat gebruikt wordt als bouwsteen in de chemische industrie. Ongeveer 95% van het fosforzuur wordt geproduceerd via het nat proces: door het ontsluiten van fosfaaterts, dat resulteert in “natte” fosforzuur met als bijproducten fosfogips en waterstoffluoride. Een belangrijk aspect voor het verwerken van fosfaaterts is de kwaliteit van het erts, dat afhankelijk is van het type gesteente (sedimentair- of stollingsgesteente), het niveau van radioactiviteit en het metaalgehalte. Nat fosforzuur kan verder worden gezuiverd via extractie- en precipitatiestappen om zo fosforzuur te verkrijgen dat vergelijkbaar is met fosforzuur geproduceerd via het thermische proces.

Op dit moment wordt fosfaaterts gebruikt als startmateriaal. Maar met de focus op circulaire P economie is het interessant om secundair fosfaat gewonnen uit de stadsmijnen, zoals struviet, ook te onderzoeken (**hoofdstuk 2**). Recent werk, gepubliceerd door Chen et al. , is meegenomen door de Europese commissie als richtlijn voor de herziening van de Europese meststoffenwet. Chen et al. beweren dat het gebruik van struviet als kunstmest de antibiotische resistoom in de grond verandert. De auteurs hebben echter niet beschreven welke struviet herwinningsmethode zij hebben gebruikt. Zij detecteerden verschillende antibiotica in struviet, terwijl andere studies laten zien dat organische verontreinigingen na de precipitatie niet aanwezig zijn in struviet. Op dit moment worden de meeste struvieten herwonnen uit stedelijk afvalwater met significant lagere hoeveelheden antibiotica dan in varkensmest - de bron die de auteurs

hebben gebruikt voor hun onderzoek. Hierdoor is het niet mogelijk om het onderzoek van Chen et al. als richtlijn te gebruiken voor het beleid van alle soorten herwonnen struviet.

Om het mogelijke gezondheidsrisico bij het gebruik van struviet te analyseren, hebben wij de opname van medicijnen in gewassen die bemest zijn met verontreinigd struviet in combinatie met de  $\text{NH}_4^+$  adsorberende materialen biochar en zeoliet bestudeerd. Dit staat beschreven in **hoofdstuk 3**. Vijf verschillende soorten kunstmest waren geprepareerd door terugwinning van nutriënten vanuit urine dat verrijkt was met zes verschillende soorten medicijnen met behulp van: struviet kristallisatie, struviet kristallisatie gecombineerd met N adsorptie via zeoliet of biochar, N adsorptie via zeoliet of biochar zonder struviet kristallisatie. De kunstmest met de hoogste zuiverheid en de laagste opname van medicijnen was struviet gecombineerd met zeoliet.

De bioaccumulatie van medicijnen in tomatenvruchtvlees van de geprepareerde kunstmest is onderzocht door middel van een oogstproef. Hieruit bleek dat in alle gevallen de hoeveelheid medicijnen onder 0.0003% lag, significant lager dan de aanvaardbare dagelijkse inname (ADI) niveau. Om het ADI-niveau te bereiken moet men 750 kg droge tomaten consumeren per dag. Concluderend kan men stellen dat het risico van de consumptie van tomaten bemest met struviet in combinatie met zeoliet of biochar voor de menselijke gezondheid insignificant is.

Om een circulaire P economie te verwezenlijken is het essentieel om de specifieke fosfaatstromen in kaart te brengen samen met het herwinningspotentieel van de grootste P verliezen in de cyclus. We hebben voor de eerste keer een dergelijk compleet kwantitatief overzicht ontwikkeld dat de potentie van stadsmijnen voor

P herwinning in Nederland belicht (**hoofdstuk 4**). P herwinningstechnieken bestaan reeds, en deze kunnen al in de RWZI's of bij de monoverbrander worden geïmplementeerd. Alleen zijn deze technieken nog niet wijdverspreid geïmplementeerd. Bovendien hebben we meerdere scenario's geformuleerd om de verschillende herwinningspotentie mogelijkheden voor Nederland te illustreren in vergelijking met de huidige nationale P behoefte.

Onze resultaten laten zien dat Nederland zelfvoorzienend kan zijn wat betreft haar kunstmestgebruik, indien P vanuit de beoogde stadsmijnen wordt herwonnen en efficiënt gerecycled. 100% van het Nederlandse slib wordt al monoverbrand als slibas. Deze slibassen kunnen 275% van de Nederlandse vraag voor kunstmest dekken. Daarbij betreft 44% van de slibassen de hoogwaardige Bio-P slibassen.

Daarnaast hebben we ook het herwinningspotentieel berekend indien verschillende types struviet precipitators worden geïmplementeerd in grotere RWZI's (>50.000 inwonerequivalenten), waarvan op dit moment meer dan tweederde biologische fosfatering heeft geïmplementeerd. Als alle RWZI's die op dit moment gebruik maken van biologische fosfatering, de meest effectieve struviet precipitator implementeren kan 79.7% van onze vraag naar P als kunstmest worden afgedekt. 539–3.187 ton P/jr kan worden herwonnen in de vorm van struviet, wat correspondeert met 4.401–26.027 ton struviet/jr. Als alle RWZI's (>50.000 inwonerequivalenten) biologische fosfatering implementeren en een struviet precipitator, zal dit resulteren in 1.144–4.579 ton P/jr, wat gelijk is aan 114.5% van de Nederlandse vraag naar kunstmest. De stap na herwinning is recycling. Daarom is het essentieel voor de realisatie van een circulaire economie

dat de herwonnen eindproducten de behoefte van de markt vervullen en kunnen worden toegepast als hoogwaardige kunstmest.

Andere essentiële aspecten voor een P herwinnings transitie zijn de stimuli en barrières bij de implementatie van deze herwinningstechnieken (**hoofdstuk 5**). We hebben verscheidene sleutelstakeholders geïnterviewd die betrokken zijn bij deze transitie in Nederland, wat ons de mogelijkheid gaf om de huidige barrières en stimuli voor de fosfaattransitie te adresseren vanuit een politiek, economisch, sociaal, technisch, wettelijk en milieutechnisch perspectief. De geïdentificeerde hoofdbarrières voor de kunstmestindustrie waren de onduidelijke karakteristieken van struviet vergeleken met de huidige kunstmest, en daarnaast de eindeafvalstatus van struviet die vrije markthandel hindert. Verschillende waterschappen hebben aangegeven dat de hoofdbarrières voor hen de hoge investeringskosten zijn in combinatie met een onzeker rendement op investering voor struviet herwinningstechnieken. De hoofdstimulus voor struvietwinning is de reductie van de onderhoudskosten van de RWZI's, en voor de P herwinning uit slibas de lage concentratie organische vervuiling in het herwonnen product.

Nederland is een koploper op het gebied van fosfaatterugwinning en daarom een interessante casus om duurzame, socio-technische transitieën beter te begrijpen. In **hoofdstuk 6**, tevens het laatste hoofdstuk, wordt een model besproken waarbij twee socio-technische theorieën gecombineerd worden, namelijk het multi-level perspectief, waarin de krachten van niche en landschap niveau besproken worden, en het institutionele ondernemerschap om de ondernemersactiviteiten binnen het regime te verhelderen via het bestuderen van gebeurtenissen binnen de Nederlandse fosfaattransitie. De opgedane kennis vanuit deze thesis kan

handvatten en inzichten bieden met betrekking tot het ontwikkelen van een duurzaamheidsstrategie voor het stimuleren en versnellen van fosfaat en andere duurzame transitities.