



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Sustainable use of phosphorus

Capturing the philosopher's stone

de Boer, M.A.

Publication date

2019

Document Version

Other version

License

Other

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

de Boer, M. A. (2019). *Sustainable use of phosphorus: Capturing the philosopher's stone*.

General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

Summary

Phosphorus (P) is essential for all forms of life. It cannot be substituted and it is indestructible as it is a chemical element. Each year, 263 million tons of phosphate rock is mined, but only a fraction makes it back into the soil. Crops are consumed and end up in the sewage system as waste. Even though phosphorus is a scarce element, most phosphorus is lost in water bodies after consumption, leading to extreme algae growth and water pollution. Humanity could only produce half of the food that it does today when phosphorus-containing fertilizers could not be added to the soil. Therefore, phosphates should be recovered and recycled to close the cycle.

In this PhD thesis entitled “Sustainable use of phosphorus: capturing the philosopher’s stone” several essential aspects for converting our current linear P economy to a circular P economy have been discussed. Growing cities entail challenges, but opportunities too. Nowadays, waste is controlled at centralized wastewater treatment plants (WWTPs), which enables urban mining. A particular solution is the recovery of P at these urban mines as struvite or sewage sludge ash, which is progressively more implemented.

In **Chapter 1**, the current status quo of the phosphorus market has been described. Phosphate reserves are not equally spread around the world, with three-quarters located in Morocco and The Western Sahara. Moreover, studies regarding the estimated time until depletion of phosphate rock deviate significantly with respect

to each other. The main intermediary compounds for phosphorus products are phosphoric acid, mainly used for fertilizers, and white phosphorus, which is the key building block for the chemical P industry. About 95% of phosphoric acid is made via the wet-process by acidulation of phosphate rock to create wet phosphoric acid as well as phosphogypsum and hydrogen fluoride. An important aspect for the processing of phosphate rock is the quality of the rock, which is dependent on the ore type (sedimentary or igneous), level of radioactivity and hazardous metal contents. Wet phosphoric acid can be further purified via extraction and precipitation processes to obtain phosphoric acid comparable to that produced by the thermal process.

Currently, phosphate rock is used as the starting material, but with the focus on a circular P economy it is interesting to investigate secondary phosphates harvested from urban mines, such as struvite, too (**Chapter 2**). Recent work, published by Chen et al., has been considered by the European Commission for guidance concerning the revised fertilizer regulation. Chen et al. states that application of struvite alters the antibiotic resistome in soil. They did, however, not describe their struvite recovery method and found that various antibiotics were detected in struvite, while other studies have shown that organic contaminants are typically not present in struvite after precipitation. To date, most struvite is recovered from municipal sources with significantly lower levels of antibiotics than what is found in the piggery wastewater that the authors investigated. Therefore, the use of the research of Chen et al. to guide policy for recovered phosphate products is inappropriate.

To analyse the health risks of the use of struvite, we have studied the uptake of pharmaceuticals into the crops fertilized with contaminated struvite in combination with the NH_4^+ adsorbent materials biochar and zeolite, described in **chapter 3**. Five fertilizers were prepared by nutrient recovery from urine spiked with six pharmaceuticals using: struvite crystallisation (1), struvite crystallisation combined with N adsorption on zeolite (2) or biochar (3), N adsorption on zeolite (4) or biochar (5) without struvite crystallisation. The fertilizer with the highest purity product and the lowest uptake of pharmaceuticals was struvite combined with zeolite (2).

The bioaccumulation of pharmaceuticals in tomato fruit biomass from each of the contaminated fertilizers in the crop trial was found to be lower than 0.0003% in all cases, which is far below the acceptable daily intake (ADI) levels (750 kg of dry tomatoes should be consumed per day to reach the ADI limit). Consequently, the subsequent risk to human health from tomato fruit grown using urine derived struvite-sorbent fertilizers is found to be insignificant.

In order to reach a circular phosphorus economy, it is essential to define the specific flows and recovery potential of the greatest P losses in the cycle. We have developed for the first time such a complete, quantitative overview, which highlights the potential of urban mines for P recovery in the Netherlands (**chapter 4**). Appropriate P recovery technologies are already available to prevent phosphorus losses at wastewater treatment plants or via sewage sludge ash treatment, yet these are not widespread implemented. Furthermore, we formulated several P recovery scenarios to illustrate the recovery potential for The Netherlands and its relation to the current national phosphorus demand.

Our results show that The Netherlands can be self-sufficient for its own fertilizer production, if P from the prospective urban mines is recovered and recycled efficiently. 100% of the Dutch sewage sludge is already mono-incinerated into sewage sludge ash. In weight, the P in the Dutch sewage sludge ashes can cover up to 275% of the Dutch fertilizer demand, from which 121% is the high quality Bio-P ashes.

We have also calculated the recovery potential by implementing struvite precipitators at the larger WWTPs (>50.000 population equivalent), of which thus far about two-third have implemented Bio-P removal. If all WWTPs that currently use Bio-P removal will implement the most effective struvite precipitator, 79.7% of the P of our fertilizer demand can be covered. 539–3.187 ton of P/yr can be recovered in the form of struvite, which corresponds to 4.401–26.027 ton of struvite/yr. If all WWTP will use Bio-P removal and implement a struvite precipitator, this will afford 1.144–4.579 ton of P/yr, which corresponds to 114.5% of the Dutch fertilizer demand. The next step after recovery is recycling. Therefore, it is vital for the creation of a circular phosphorus economy that the end-products have a market demand and can be applied as high-grade fertilizer.

We have addressed the current status quo of phosphate production, the quality of the recovered products and the potential to cover the national demand; other essential aspects for a P recovery transition are the drivers and barriers of the actual implementation of the technologies (**chapter 5**). Several key stakeholders involved in this transition in The Netherlands were interviewed, which enabled us to address the current barriers and drivers of phosphate recovery transition from

urban mines from a political, economic, social, technical, legal and environmental viewpoint. The main barriers found for fertilizer companies were the different and unclear characteristics of struvite compared to common fertilizers and the end-of-waste status of struvite that hinders free market trade. Many water boards indicate that the main barrier is the high investment cost with an uncertain return on investment for on-site struvite recovery processes. The main driver for struvite is the reduction of maintenance costs of the wastewater treatment plants and for phosphorus recovery from sewage sludge ash the low organic pollutants in the P recovery product.

The Netherlands is a front-runner on phosphate recovery and therefore an interesting case for understanding sustainable transitions, which is analysed in **chapter 6**. Several frameworks exist to understand socio-technical transitions. In this study, a framework will be discussed which combines the multi-level perspective, explaining the pressures from the niche and landscape level, with institutional entrepreneurship to clarify the entrepreneurial activities within the regime based on happenings and entrepreneurial activities explored within the Dutch phosphate transition.

Samenvatting

Fosfor (P) is essentieel voor alle vormen van leven. Het is onvervangbaar en daarnaast onverwoestbaar aangezien het een scheikundig 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 geogste gewassen worden geconsumeerd en de fosfaten die zich daarin bevinden komen na consumptie in het riool terecht als afval. Ondanks dat fosfor een schaars element is, eindigen de meeste fosfaten uiteindelijk in oppervlaktewater, wat leidt tot extreme algengroei en watervervuiling. We zouden vandaag de dag slechts de helft van ons huidige voedsel kunnen produceren indien er geen fosfaathoudende (kunst)mest wordt toegevoegd aan de landbouwgronden. Dit zijn de hoofdredenen waarom fosfaten zouden moeten worden teruggewonnen en gerecycled om de fosfaatcyclus te sluiten.

In dit proefschrift 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 rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) wat het mogelijk maakt om deze RWZI's te gebruiken als zogenaamde stadsmijnen. Een mogelijke oplossing is het herwinnen van P uit deze stadsmijnen in de vorm van struviet of slibas, iets dat steeds vaker wordt toegepast.

In **hoofdstuk 1** wordt de huidige stand van zaken van de fosfaatmarkt belicht. Fosfaatbronnen zijn niet gelijk 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 door het ontsluiten van fosfaaterts met een sterk zuur wat resulteert in 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 hoeveelheid radioactieve straling en het metaalgehalte. Het verkregen fosforzuur kan verder worden gezuiverd via extractie- en precipitatiestappen om zo zuiver fosforzuur te verkrijgen dat vergelijkbaar is met fosforzuur geproduceerd via het thermische proces.

Op dit moment wordt fosfaaterts gebruikt als grondstof, doch met de focus op een 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 precipitatie niet meer aanwezig zijn in struviet. Op dit

moment worden de meeste stuvieten 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 verstandig om het onderzoek van Chen et al. als richtlijn te gebruiken voor het beleid omtrent 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 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 en 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, wat significant lager is dan de aanvaardbare dagelijkse inname (ADI). 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 zeer beperkt 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 het eerst 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. Deze technieken zijn alleen nog niet wijdverspreid geïmplementeerd. In dit hoofdstuk hebben we meerdere scenario's geformuleerd om de potentie van de verschillende herwinningsmethoden voor Nederland te illustreren in vergelijking met de huidige nationale P behoefte.

Onze resultaten laten zien dat Nederland zelfvoorzienend kan zijn in 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, indien de slibassen kwantitatief omgezet kunnen worden in kunstmest. Daarbij betreft 44% van de slibassen de hoogwaardige Bio-P slibassen.

Daarnaast hebben we ook het herwinningspotentieel berekend indien verschillende struviet-precipitators worden geïmplementeerd in grotere RWZI's (>50.000 inwonerequivalenten), waarvan op dit moment meer dan tweederde biologische fosfatering gebruikt. 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 overeenkomt met 4.401–26.027 ton struviet/jr. Als alle grote RWZI's (>50.000 inwonerequivalenten) biologische fosfatering implementeren alsmede een struviet-

precipitator dan zal dit resulteren in 1.144–4.579 ton P/jr, wat gelijk is aan 114.5% van de Nederlandse vraag naar kunstmest. De cruciale 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 om rekening mee te houden in de P herwinningstransitie zijn de stimuli en barrières van de implementatie van de herwinningstechnieken (**hoofdstuk 5**). We hebben verscheidene belangrijke stakeholders 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 barrières voor de kunstmestindustrie waren de onduidelijke eigenschappen van struviet vergeleken met de huidige kunstmest, en daarnaast de einde-afvalstatus van struviet die vrije markthandel hindert. Verschillende waterschappen hebben aangegeven dat de belangrijkste barrières voor hen de hoge investeringskosten zijn in combinatie met een onzeker rendement op de investering voor de installatie van struviet-herwinningstechnieken. De stimulus voor struvietwinning is de reductie van de onderhoudskosten van de RWZI's, en voor de P herwinning uit slibas de lage concentratie organische contaminanten in het herwonnen product.

Nederland is een koploper op het gebied van fosfaatterugwinning en biedt 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 invloeden van niche en landschapsniveau besproken worden, alsmede het institutionele ondernemerschap om de ondernemersactiviteiten binnen een regime te verhelderen via het bestuderen van gebeurtenissen binnen de Nederlandse fosfaattransitie. De opgedane kennis vanuit dit proefschrift kan handvatten en inzichten bieden met betrekking tot het ontwikkelen van een duurzaamheidsstrategie voor het stimuleren en versnellen van het recycleren van fosfaat alsmede andere transitie om een circulaire economie te verwezelijken.

Acknowledgements

Allereerst wil ik mijn promotor bedanken, Chris Slootweg. Ik waardeer het ontzettend dat je mij zoveel vrijheid gegeven hebt om mezelf te ontwikkelen op verschillende fronten, eerst als studente en vervolgens, toen de mogelijkheid zich voordeed, in project management. Hierdoor ben ik de persoon geworden die ik nu ben. Jij bent altijd open minded en dit heeft dan ook geleid tot publicaties in totaal andere vakbladen dan je eerder gewend was. SusPhos, eerst een onderzoeksproject, en nu een bedrijf i.o.. Het was en is nog steeds een erg leerzame rit. Ik ben benieuwd hoe het ons zal vergaan!

Ook wil ik Professor Jan van Maarseveen bedanken voor het warme welkom op de UvA. Jouw onuitputtelijk enthousiasme werkt aanstekelijk! Ik wens jou en daarnaast de groep het allerbeste toe. Professor Koop Lammertsma, jij introduceerde bij mij het topic materiaalschaarste, waar ik nu jaren verder nog steeds aan werk. Dank hiervoor, en tevens voor de leerzame periode aan de VU.

Daarnaast wil ik graag via deze weg mijn promotiecommissie bedanken. Professor John Grin, samen hebben wij ons vastgebeten in de sociale aspecten rondom de fosfaattransitie. Ik vond onze samen- en wisselwerking erg prettig, en ik heb ontzettend veel geleerd! Ik kijk erg uit naar onze publicatie. Ook wil ik John Parsons bedanken voor de zeer waardevolle feedback. Daarnaast wil ik Professor Jan Willem Erisman, Professor Oene Oenema, Dr. Robin Pistorius en Professor Bob

van der Zwaan bedanken voor hun deelname aan de leescommissie en de moeite die zij hebben genomen om het proefschrift kritisch te lezen.

Moreover, I would like to thank Christian Kabbe for his valuable comments and input during the years. It was a pleasure to work with you! Fabian Kraus for his valuable suggestions and Oliver Gantner for the interesting talks and valuable input. Kimo van Dijk voor de leuke momenten en de waardevolle gesprekken tijdens conferenties en daarbuiten.

I would like to thank all the (former) SOC group members for the lovely time in the group. Andreas, voor zowel luchtige als serieuze gesprekken maak je altijd even tijd. Ed, we moeten nog een keertje gaan squashen, ook al weet ik dat je mij dik gaat inmaken! Martin, de plantjesman. Ik houd mij aan mijn woord, dus be prepared... Roel, mijn allerbeste achterbuurman. Yolanda, thank you for the nice times, especially in the gym at the zumba and pilates lessons. Hans, bel gerust eens aan als je in de buurt bent. Wen, you are just amazing. I wish you all the best! Jan, I will definitely miss the great and fun times we have and had at the UvA, but I hope that we will still meet after, especially for some salsa with Wesley! Luuk voor alle gezellige lunch breaks. Diewertje, hopelijk snel samen naar een museum. Henk, dank dat ik in jouw kantoor mocht schrijven. Tati, Steen, Francesco, Nick, Kananat, Vasilis, Simone, Piotr, Maria and Arnout, it was a great pleasure to work with all of you and I wish you all the best!

Evi, de gezellige warme chocomel breaks, borrels, lunches en het roeien. Dank en veel succes met alles na je PhD. Laurian, the wine tastings were really nice, and even though I am not a fan of metal, I will never forget the parties at the Cave.

Tania, it was a pleasure meeting you and I wish you all the best in France. Bas, ik ben zo benieuwd waar we heen gaan met SusPhos! Devin, ik wens je het beste in de volgende stap van je carrière. Ferial, good luck in London! Andy, I'm super happy that you joined the group and I wish you all the best for your career. Leon, snel een R&B dansje doen of een vakantie? And the other former VU colleagues Jaap, Jeroen, Yann, Max, Tom and Jos. En Aike, voor de gezellige tijd in Tarragona en op de VU. Moreover, I would like to thank the former master students Tomas, Michelle, Lisa, Lisanne, Lukas, Anjelika and Steven for their hard work and contribution to this research. En de masterstudente Hannah, jouw mooie SusPhos cake was geweldig!

Mijn werkfamilie en paranimfen, Flip en Mark. Flip, wat ben je toch een lieverd. Tijdens de verhuizing was er één harde eis, namelijk dat we weer naast elkaar zouden zitten. Jij staat en stond altijd voor mij klaar, ik hoefde maar te appen of bellen. Helaas zitten we nu niet meer naast elkaar, maar we zullen elkaar zeker weer opzoeken. Mark, ik was de vervelende studente die 'jouw computer' inpikte en het kantoor van metalhol naar parfumruikend kantoor met een veel te blije en vrolijke studente transformeerde; tweezijdige haat was er. Dit veranderde snel in een vriendschap en nu durf ik toch echt wel te zeggen dat jij mijn BFF geworden bent.

Tot slot wil ik ook nog mensen uit mijn privé-omgeving bedanken. Allereerst mijn vrienden, alle dansjes, tripjes, vakanties, festivals en etentjes waren perfecte afleiding. In het speciaal, mijn partner in crime, Anouk. Willemien, Edwin, Senada en Yuris, jullie interesse in duurzaamheid en fosfaat en ook de gezellige familieweekendjes, daar ben ik jullie ontzettend dankbaar voor. Daarnaast wil ik

mijn gehele familie bedanken voor het altijd daar zijn als ik hulp nodig had. Gaston, zo lief en zorgzaam als jij, is niemand. En daarnaast ook nog ongekend ambitieus. Ik waardeer je enorm voor wie je bent en ik ben ontzettend blij dat we naar de UvA verhuisd zijn, vooral omdat ik jou daar heb leren kennen. Mijn liefste zusjes, Elise en Hannah (Lisie en Ansiebil), wat ben ik trots op jullie en ik houd ontzettend veel van jullie. En dank Lisie voor het samenwerken aan de cover. Mijn ouders, ik kan jullie niet voldoende bedanken. Jullie onuitputtelijke support en daarnaast jullie onvoorwaardelijke liefde zijn ontzettend speciaal en ik prijs mij iedere dag rijk met ouders zoals jullie.

List of Publications

- (1) de Boer, M. A.;^{1,3,6} Wolzak, L.;³ Slootweg, J. C.^{1,7,8} Phosphorus: Reserves, Production, and Applications. In *Phosphorus Recovery and Recycling*; Springer Singapore: Singapore, **2018**, 75–100.
- (2) de Boer, M. A.;^{1,3,5} Kabbe, C.;⁵ Slootweg, J. C.^{1,7,9} Struvite: towards a Circular Phosphorus Economy. *Environ. Sci. Technol.* DOI:10.1021/acs.est.8b03524.
- (3) de Boer, M. A.;^{1,2,3,6} Hammerton, M.;^{1,2,3,6} Slootweg, J. C.^{7,8} Uptake of Pharmaceuticals by Sorbent-Amended Struvite Fertilisers Recovered from Human Urine and Their Bioaccumulation in Tomato Fruit. *Water Res.* **2018**, *133*, 19–26.
- (4) de Boer, M. A.;¹⁻⁶ Romeo-Hall, A. G.;²⁻⁵ Parsons, J. R.;^{7,8} Slootweg, J. C.^{7,8} Phosphorus Recovery Potential from Wastewater: Creating a Viable Pathway for Realizing a Circular Phosphorus Economy. *To be submitted*.
- (5) de Boer, M. A.;¹⁻⁶ Romeo-Hall, A. G.;²⁻⁵ Rooimans, T. M.;⁴ Slootweg, J. C.^{7,8} An Assessment of the Drivers and Barriers for the Deployment of Urban Phosphorus Recovery Technologies: A Case Study of the Netherlands. *Sustain.* **2018**, *10* (6), 1790.
- (6) de Boer, M. A.;¹⁻⁶ Slootweg, J. C.;^{7,8} Grin, J.^{1,7,8} The Confluence of the Multi-Level Perspective and the Institutional Entrepreneurship Theory: A Case Study of the Phosphorus Transition. *To be submitted*.
- (7) de Boer, M. A.;^{3,4} Lammertsma, K.^{7,8} Scarcity of Rare Earth Elements. *ChemSusChem* **2013**, *6* (11), 2045–2055.

- 1 Conceptual ideas
- 2 Experimental work
- 3 Literature study
- 4 Interviews & coding
- 5 Data collection
- 6 Preparation of the manuscript
- 7 Feedback on the manuscript
- 8 Project supervision