Phosphor-Mining im Kanton Zürich:

Mit dem Phos4life-Verfahren können die Zielvorgaben des Regierungsrates vollständig erfüllt werden.

Zwischeninformation zu Handen der Baudirektion des Kantons Zürich

Businessplan 1.0

Phos4life

Impressum

Auftraggeber

Baudirektion des Kantons Zürich
Vertreten durch das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

Auftragnehmer

Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR)
Wildbachstrasse 2
8340 Hinwil

Verfasser:

Dr. Stefan Schlumberger, ZAR

15. Februar 2017

Inhalt

1 Management Summary 4
2 Ausgangslage: Klärschlammentsorgung und Phosphor 6
3 Auftrag 7
4 Entwicklungsstand Phos4life 8
5 Produkte 9
6 Ökologie 10
7 Markt 12
7.1 Zielgruppe für den Lösungsansatz 12
7.2 Klärschlammasche 12
7.3 Technische Phosphorsäure 13
7.4 Eisenchloridlösung 14
7.5 Mineralischer Rückstand 15
8 Entwicklungspartner 15
9 Geschäftsidee 16
9.1 Kundennutzen 16
9.2 Mögliche Umsetzung der Geschäftsidee 16
10 Standortanforderungen zur Umsetzung 16
11 Finanzen 17
11.1 Investitionen 17
11.2 Betriebsaufwand 17
11.3 Erträge 18
11.4 Preisgestaltung für die Annahme von Klärschlammasche (KSA) 18
12 Alternative Verfahren zum Phosphorrecycling 19
13 Entwicklung in der Gesetzgebung 20
14 Risikoanalyse 21
15 Empfehlung zum weiteren Vorgehen 22

1 Management Summary

Der vorliegende Businessplan 1.0 ist ein Zwischenbericht zu Handen des Auftraggebers. Er fasst die bisherigen Ergebnisse der Arbeiten zusammen und kann an Betreiber von Abwasserreinigungsanlagen (ARA) und Vertreter potentieller Trägerschaften weitergegeben werden. Der Inhalt basiert auf den bis Ende 2016 erlangten Erkenntnissen. Vertiefte Informationen sind in einem morphologischen Kasten zusammengestellt.

Phosphor (P) ist wie Wasser und Luft eine zentrale Ressource. Ohne Phosphor können Menschen, Tiere und Pflanzen nicht leben, und in der Landwirtschaft ist er ein unersetzlicher Rohstoff. Phosphor lässt sich durch kein anderes chemisches Element ersetzen.

Im Klärschlamm aus Schweizer Abwasserreinigungsanlagen findet sich ein grosses Potenzial für die Phosphorrückgewinnung. Klärschlamm wurde früher von der Landwirtschaft als Nährstoffquelle direkt auf die Böden ausgebracht. Aufgrund der zunehmenden Schadstofffracht im Klärschlamm ist das seit 2006 verboten. Aus einer wertvollen Ressource ist ein teuer zu entsorgender Abfall geworden. Diesen gilt es wieder als Ressource mittels Phosphor-Mining zu nutzen.

Die Phosphor-Mining-Strategie des Kantons Zürich zielt auf eine nachhaltige, ökologisch vorteilhafte Phosphorrückgewinnung. Werden in der Schweiz passende, effektive Verfahren angewendet, entspricht die rückgewinnbare Menge etwa der jährlich importierten Phosphormenge in Mineraldüngern. Sie ermöglichen saubere und ökologisch nachhaltig produzierte Produkte. Die Phosphor-Rückgewinnung bringt damit einen bedeutenden ökologischen Mehrwert gegenüber den importierten Mineraldüngern.

Bis heute werden die importierten Mineraldünger aus Erzen (Rohphosphaten) hergestellt. Die weltweiten Vorkommen an qualitativ hochwertigen Erzen sind endlich. Da die Schweiz wie fast ganz Westeuropa über keine eigenen Rohphosphatvorkommen verfügt, ist sie von Importen abhängig. Die Rohphosphat-Gewinnung ist weltweit auf vergleichsweise wenige, zum Teil politisch instabile Länder begrenzt. Die Umweltbelastung der Rohstoffgewinnung und Verarbeitung ist dabei sehr hoch.

Alarmierend ist auch die zunehmende Uran- und Kadmiumbelastung in einheimischen Böden und des Trinkwassers. Sie ist die Folge der immer stärker mit Uran und Kadmium belasteten Rohphosphate, aus denen die importierten Düngemittel produziert werden. Leider wird es bis heute toleriert, dass Mineraldünger eingesetzt werden, die geltende Grenzwerte massiv überschreiten.

Der Regierungsrat des Kantons Zürich beauftragte die Baudirektion, zusammen mit den Betroffenen, ein Klärschlamm-Entsorgungskonzept zu erarbeiten. Ziel war neben der thermischen Verwertung auch die Nutzung der Ressource Phosphor. Die Realisierung einer zentralen Klärschlammverwertungsanlage am Standort Werdhölzli in Zürich und der Entscheid zur Nutzung der Klärschlammasche als Phosphorquelle schafften wichtige Voraussetzungen.

In einem ersten Schritt wurde die Herstellung eines sekundären Düngerrohstoffes aus der Klärschlammasche geprüft und nach intensiver Evaluation als zu wenig zielführend eingestuft (nicht vorhandener Markt in der Schweiz, riskanter Absatzmarkt mit ausländischen Abnehmern, hoher administrativer Aufwand). Das führte 2013 zu einer Weiterentwicklung des Lösungsansatzes. Gefragt war ein höherwertiges, handelsübliches Produkt mit besseren Absatzchancen und geringeren Risiken. Phosphorsäure als Produkt aus Klärschlammasche erfüllte alle Ansprüche.

Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich suchte die Stiftung ZAR nach einem geeigneten Technologiepartner, mit dem die Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche möglich war. Die Evaluation brachte den spanischen Generalunternehmer und Entwickler Tecnicas Réunidas SA (Madrid) als geeigneten Partner, der sich zudem bereit erklärt hat, 40% der Entwicklungskosten zu übernehmen.

Aus der Zusammenarbeit von ZAR und Tecnicas Réunidas resultierte das Phos4life-Verfahren. Mit ihm lassen sich die Zielvorgaben vollständig erfüllen. Im Zentrum steht die Rückgewinnung von Phosphor (Wirkungsgrad 96%) in Form von hochreiner Phosphorsäure. Gleichzeitig kann auch das Eisen, das über den Fällmitteleinsatz bei der Abwasserreinigung in die Klärschlammasche gelangt, als handelsübliches Produkt zurückgewonnen werden (Wirkungsgrad 93%). Der mineralische Anteil der Klärschlammasche wird zudem soweit von den enthaltenen Schwermetallen befreit, dass die stoffliche Verwertung im Zementwerk problemlos möglich ist. Die abgetrennten Schwermetalle werden einer Metallrückgewinnung zugeführt. Fazit: der ursprüngliche «Abfall Klärschlammasche» lässt sich zu nahezu 100% stofflich verwerten und in qualitativ hochwertige Produkte umwandeln.

Der vorgeschlagene Weg des Phosphor-Minings mit dem Phos4life-Verfahren entspricht dem Schweizer Abfallleitbild von 1986 und erfüllt die Vorgaben des regierungsrätlichen Auftrags vollständig. Er ist ein eindrückliches Beispiel für einen effizienten Stoffkreislauf, der den Anforderungen einer modernen und nachhaltigen Kreislaufwirtschaft gerecht wird.

Die kostendeckende Finanzierung durch den Erlös aus den Produkterträgen ist auf Anhieb nicht möglich. Für die Umsetzung sind zusätzliche Kosten von 70 bis 90 CHF pro Tonne entwässertem Klärschlamm (EKS, 30% TS-Gehalt) zu übernehmen. Die Gesamtkostenbetrachtung der Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung läge aber mit 170-190 CHF/t EKS immer noch tiefer als die Ausgangslage der Klärschlammentsorgungskosten des Kantons Zürich im Jahre 2007. Die zurzeit bestehenden Unsicherheiten (Kostenbandbreite) lassen sich bis zum Abschluss der Pilotierungsarbeiten Ende 2017 reduzieren.

Der Baudirektion wird empfohlen, nach Abschluss der Pilotierung und dem Vorliegen des Abschlussberichtes (Businessplans 2.0) die Herstellung der Phosphorsäure aus Klärschlammasche mit anderen verfügbaren Verfahren zur Phosphorrückgewinnung zu vergleichen und einer umfassenden Bewertung bei gleicher Systemgrenze zu unterziehen.

Der vorliegende Businessplan 1.0 dokumentiert für ARA-Betreiber einen Weg, wie der aus dem Abwasser stammende Phosphor als gefragte Ressource in Form von hochwertiger Phosphorsäure in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden kann. Er macht aber auch deutlich, dass die Besteller dieses Geschäftsmodells heute für deren «Kosten» aufkommen müssten und der wirkliche «Nutzen» wohl erst Generationen später zum Tragen kommt. Möglicherweise ist dies ein Beispiel um dem Begriff der Nachhaltigkeit im Sinne der Kreislaufwirtschaft einen konkreten Inhalt zu geben.

2 Ausgangslage: Klärschlammentsorgung und Phosphor

Seit dem Aufbau der modernen Abwasserreinigung wurden in der Schweiz Nährstoffe wie beispielswiese Phosphor und Stickstoff als Ressourcen aus dem Klärschlamm (KS) durch dessen direkte Verwertung in der Landwirtschaft als Dünger genutzt. Doch während der letzten 40 Jahre traten in Zusammenhang mit dieser Verwertung immer wieder Probleme durch die darin enthaltenen Schadstoffe auf. Die immer stärkere Belastung des Klärschlamms mit Schwermetallen konnte zwar im Laufe der Jahre reduziert werden, weil aber Schwermetalle sich auch langfristig nicht abbauen, bestand auch bei den tieferen Werten noch ein Problem der Boden- und Grundwasserbelastung.

Diese Entwicklungen führten zu einer zunehmenden Bedeutung der thermischen Behandlung des Klärschlamms, um die organischen Schadstoffe zu zerstören bzw. die anorganischen anzureichern und sicher abzulagern. Zusätzlich zeigte ein Bauernstreik als Reaktion auf einen Subventionsstopp für die Zuckerproduktion in den 90er Jahren die Verletzlichkeit der Entsorgungssicherheit für Klärschlamm auf. Parallel dazu sank die Akzeptanz gegenüber der direkten Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft, getrieben durch steigende Qualitätsansprüche seitens der Konsumenten und Grossverteiler an die landwirtschaftlichen Produkte (z.B. Biolandbau, Strategie „kein Risiko“) laufend. Die Angst vor der Verbreitung des Rinderwahnsinns (bovine spongiforme Encephalopathie, BSE) zusammen mit der laufend ansteigenden Belastung des Klärschlamms durch persistente organische (POP) Verbindungen führte 2003 schliesslich in der Schweiz zum Verbot der direkten landwirtschaftlichen Nutzung des Klärschlamms ab 2006. Mit diesem Trend war leider auch die Tatsache verknüpft, dass Nährstoffe im Klärschlamm nicht mehr genutzt werden konnten. Sie werden in der thermischen Behandlung – Mitverbrennung in Kehrichtverwertungsanlagen, Monoverbrennungsanlagen für Klärschlamm und energetische Verwertung im Zementwerk – mineralisiert bzw. in nicht mehr nutzbarer Form in Verbrennungsrückständen (Verbrennungsschlacke, -asche) ausgetragen oder dissipativ in Baumaterialien (Zement) eingebunden. Somit ist eine spätere Nutzung des Phosphors aus mit anderen Abfällen vermischten Rückständen nicht mehr möglich. Klärschlamm wurde vom Ressourcenträger zum Abfall, der entsorgt werden musste. Die somit in der Landwirtschaft fehlende Phosphorquelle wurde durch den gestiegenen Einsatz von Mineraldüngern kompensiert, die wiederum hohe Schadstofffrachten (Uran und Kadmium) in die Böden bzw. ins Grundwasser eingetragen haben. Die fehlende Ressource musste somit zugekauft und deren thermische Entsorgung darüber hinaus finanziert werden. Beides resultierte in einem Kostenanstieg, der die Kontamination mit den eingetragenen Schadstoffen noch nicht berücksichtigt.

Bereits im April 2007 hat der Regierungsrat des Kantons Zürich mit seinem Beschluss Nr. 572 einerseits die weitsichtige Notwendigkeit zur Rückgewinnung des Phosphors und anderseits die gute energetische Nutzung als Rahmenbedingungen für die künftige Klärschlammentsorgung festgelegt. Dabei gab er vor, dass im Sinne einer nachhaltigen Ressourcenwirtschaft die Planung des zukünftigen Entsorgungswegs so auszurichten ist, dass eine zukünftige Rückgewinnung des Wertstoffes Phosphor möglich ist. Folgende Beweggründe waren für die Vorgabe massgebend:

- Phosphor ist für Mensch und Tier lebenswichtig und nicht ersetzbar.
- Phosphor wird immer knapper und die Schweiz ist in grossem Umfang von der Einfuhr aus – vor allem geopolitisch – unsicheren Ländern abhängig. Die Einfuhr ist zudem mit grossen Umweltbelastungen bei Abbau und Herstellung verbunden.
- Phosphor aus Klärschlamm stellt ein grosses Potenzial dar. Mit ihm könnte fast der gesamte via Mineraldünger importierte Phosphorbedarf der Schweiz gedeckt werden.

Zur besten Umsetzung der Vorgabe hat der Regierungsrat nach einer vierjährigen Evaluations- und Planungsphase am 31. August 2011 auf Mitte 2015 einen neuen kantonalen Klärschlamm-Entsorgungsplan festgesetzt (RRB Nr. 1035). Im gewählten technischen Konzept wird der Klärschlamm dezentral auf den Abwasserreinigungsanlagen entwässert und dann in einer zentralen Klärschlammverwertungsanlage thermisch behandelt. Phosphor aus dem Klärschlamm steht dann aufkonzentriert in der Klärschlammasche zur Nutzung bereit. Die neue Klärschlammverwertungsanlage wurde Mitte 2015 auf dem Areal der Kläranlage Werdhölzli in Zürich von der Stadt Zürich (ERZ Entsorgung und Recycling) planmässig in Betrieb genommen.

Um unnötige Kosten für eine Zwischenlagerung der nun anfallenden phosphorhaltigen Klärschlammasche zu vermeiden, wurde die Entwicklung einer Phosphor-Mining-Strategie zur Ressourcennutzung vorangetrieben. Vorerst lag der Fokus auf der Herstellung eines Düngerrohstoffes, der im Ausland zu einem handelsüblichen, marktfähigen Dünger konfektioniert wird. Die dafür notwendige REACH-Zulassung des neuen Produktes verursacht erhebliche Kosten, die in keinem Verhältnis zu dessen geringem Wert steht. Eine Schweizer Lösung ist aufgrund nicht vorhandener Düngerproduktionskapazitäten und Anlagen nicht gegeben. Durch die unsichere Marktsituation, da europaweit nur ein einziger Produzent als Abnehmer in Frage kommt, ist der Absatz des Phosphorproduktes einerseits riskant und anderseits mit einer geringen Wertschöpfung verbunden. Zur Reduktion dieser Risiken ist die Herstellung eines marktüblichen, höherwertigen Produktes eine vielversprechende Alternative. Das Produkt Phosphorsäure ist einfacher und zu besseren Konditionen zu vermarkten. Die Absatzmärkte im In- und Ausland sind ebenfalls grösser, und Abhängigkeiten von einzelnen Akteuren sind hier deutlich weniger gegeben.

Neben der Verwertung des in der Klärschlammasche vorhandenen Phosphors soll auch die Verwertbarkeit anderer potenzieller Wertstoffe untersucht werden. Neben dem in grossen Mengen vorhandenen Element Eisen, das über die Fällmittelzugabe bei der Abwasserreinigungsanlage (ARA) in Form von Eisensalzen eingetragen wird, ist auch der mineralische Rückstand nach entsprechender Schwermetallabtrennung für eine stoffliche Verwertung z.B. in der Zementindustrie geeignet. Die isolierten Metalle sollen ihrerseits wieder einer Rückgewinnung zugeführt werden.

3 Auftrag

Der Regierungsrat des Kantons Zürich hat 2007 mit seinem Beschluss Nr. 572 die Baudirektion zur Erarbeitung eines Klärschlamm-Enstorgungskonzeptes beauftragt. Als Rahmenbedingungen für die Planung der zukünftigen Entsorgung wurden die Phosphor-Rückgewinnung und eine optimierte Energienutzung vorgegeben. Das Stimmvolk der Stadt Zürich legitimierte in der Volksabstimmung von 2013 den Bau einer zentralen Klärschlammverwertungsanlage auf dem Areal der ARA Werdhölzli mit 94% Ja-Stimmen in dem Wissen, dass der Kanton ein machbares Phosphor-Mining-Konzept umsetzen wird.

Basierend auf einem ersten Subventionsgesuch der Stiftung ZAR erteilte die Baudirektion des Kantons Zürich im Januar 2015 den Auftrag, die Machbarkeit der Phosphorsäureherstellung aus Klärschlammasche nachzuweisen. Nach einer Evaluation der möglichen Technologiepartner fiel die Wahl auf den spanischen Generalunternehmer Tecnicas Réunidas SA (Madrid). Gemeinsam konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Gewinnung von Phosphorsäure (technische Qualität) aus Klärschlammasche technisch möglich ist. Aufgrund der positiven Zwischenergebnisse wurde die Weiterführung der Arbeiten im Sinne eines zweiten Subventionsgesuches beantragt und im Regierungsratsbeschluss 58/2016 bewilligt. Die verfahrenstechnischen Details des Prozesses sollten

ausgearbeitet und die Leistungsfähigkeit des Verfahrens im Rahmen einer Pilotierung erwiesen werden. Anhand der dann vorliegenden Erkenntnisse können belastbarere Aussagen zur Ökonomie und Ökologie des Verfahrens getroffen werden.

Mit dem hier vorliegenden Businessplan 1.0 werden die Zwischenergebnisse des Auftrags zusammengefasst. Der Terminplan und das weitere Vorgehen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Derzeit laufen die Vorbereitungsarbeiten zur grosstechnischen, kontinuierlichen Pilotierung, die bis Jahresende 2017 abgeschlossen wird.

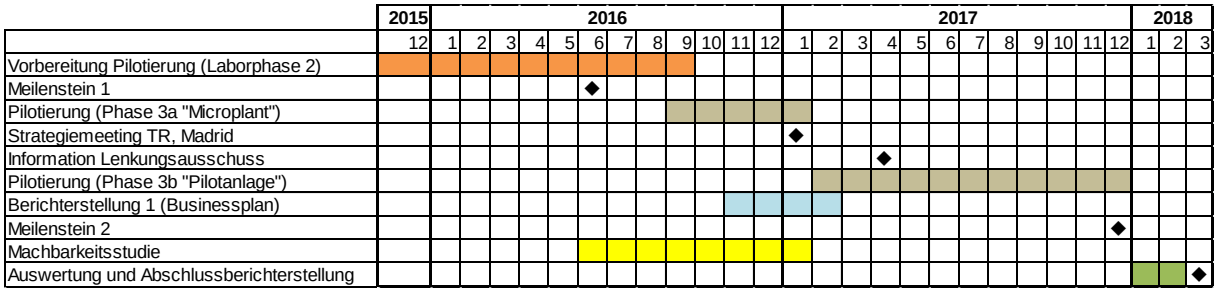

Abbildung 1: Terminplan Phos4life-Projekt

Nach Abschluss der Pilotierung (Phase 3b) ist die verfahrenstechnische Machbarkeit gesichert. Genauere Angaben zu den benötigten Betriebsmittelverbräuchen und den erzeugbaren Produktqualitäten der Produkte liegen dann vor. Mit diesen Erkenntnissen wird bis im März 2018 ein Abschlussbericht in Form des aktualisierten morphologischen Kastens und einem Businessplan 2.0 verfasst.

4 Entwicklungsstand Phos4life

Mit dem neu entwickelten Phos4life-Verfahren konnten die Zielvorgaben zur Phosphor- und Fällmittelrückgewinnung sowie der stofflichen Verwertung des mineralischen Rückstandes vollumfänglich erreicht werden. Phosphor kann mit 96% Ausbeute und Eisen mit 93% Ausbeute als technisch reines, handelsübliches Produkt zurück gewonnen und vermarktet werden. Der mineralische, schwermetallentfrachtete Anteil der Klärschlammasche kann einer stofflichen Verwertung im Zementwerk zugeführt werden. Die abgetrennten Schwermetalle können entweder mit einer Verwertung in bestehenden Verfahren (z.B. Metallrückgewinnung aus KVA-Filteraschen) zurück gewonnen oder in stabilisierter Form einer Deponierung zugeführt werden. Diese nahezu 100%ige stoffliche Verwertung der Klärschlammasche ermöglicht neben der Einsparung eines grossen Deponievolumens weitere ökologische Vorteile (siehe Kap.6).

Das Verfahren wurde im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich durch die Stiftung ZAR und dem international tätigen Grossanlagenbauer Tecnicas Réunidas SA (TR, Madrid, Spanien) innerhalb der letzten zwei Jahre entwickelt. TR ist Weltmarktführer für Zink-produktionsanlagen basierend auf der Solventextraktionstechnologie, die hier analog für die Phosphorrückgewinnung angewendet wird. Eine Patentierung ist gemäss Abklärungen von TR nicht möglich. Die Anwendung des Verfahrens in der Schweiz ist von der Erhebung etwaiger Lizenz- oder Know-How-Gebühren ausgenommen. Das ermittelte Wissen steht einer zukünftigen Schweizer Trägerschaft unentgeltlich zur Verfügung.

Zum Jahresende 2016 konnte die Laborphase erfolgreich abgeschlossen werden. Die durchgeführte quasi-kontinuierliche Microplant-Pilotierung zeigte die Funktionalität des Verfahrens und erlaubte eine weitergehende Optimierung des Prozesses für die nachfolgende kontinuierliche Pilotierung, die bis Ende 2017 abgeschlossen wird. Der heutige

Wissensstand ist vereinfacht in Form einer Massenbilanz in Abbildung 2 für eine Anlage mit einer jährlichen Kapazität von 15‘000 t Klärschlammasche dargestellt.

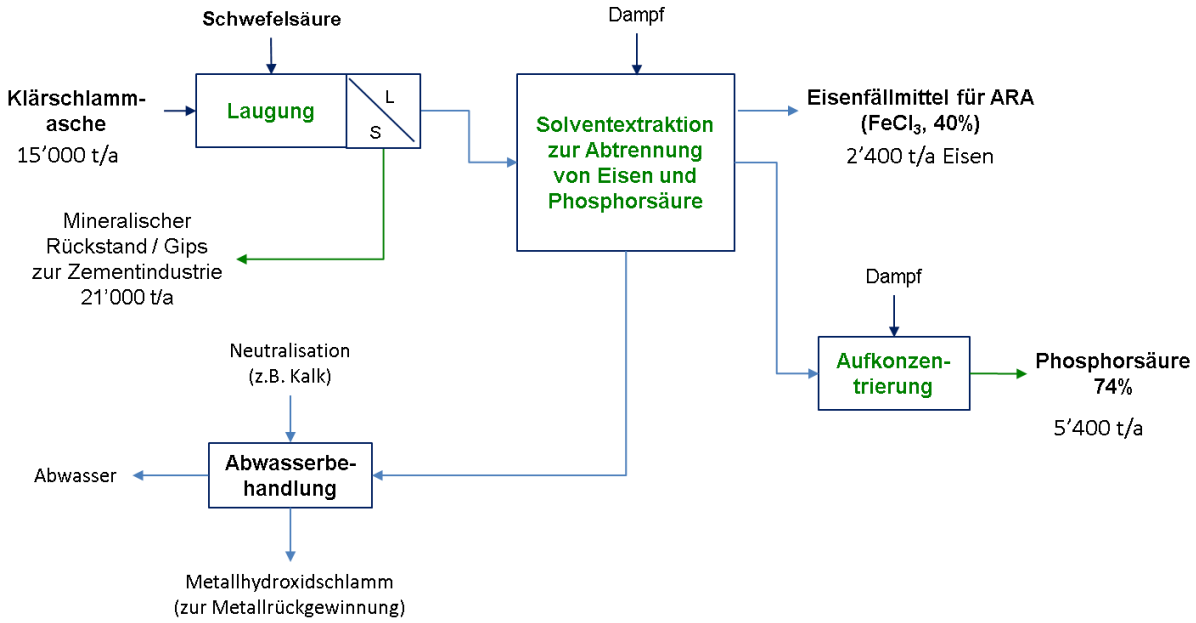

Abbildung 2: Verfahrensübersicht und Massenbilanz der wichtigsten Stoffströme

5 Produkte

Mit dem Phos4life-Verfahren werden aus der für den Kanton Zürich angenommenen Menge von etwa 15‘000 t/a Klärschlammasche zwei handelsübliche Produkte hergestellt:

- Technisch reine Phosphorsäure (TGA), 74% H_3PO_4, ca. 5‘400 t/a, 96% Wirkungsgrad Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche
- Eisen(III)chloridlösung, 40Gew.-% $FeCl_3$, ca. 17‘000 t/a (≈2‘400 t/a Fe), 93% Wirkungsgrad der Fällmittelsalzrückgewinnung.

Beide können im CH- oder EU-Markt abgesetzt werden. Abnehmer sind grosse, weltweit tätige Chemikalienhändler wie die Firma Brenntag, europäische Düngemittelproduzenten wie Israel Chemicals LTD (ICL) oder im Falle der Eisenchloridlösung auch Kläranlagen als Endkunden. Die jeweils erzielbaren Erlöse für den Produkteverkauf liegen im Bereich von 600-700 CHF/t Phosphorsäure bzw. 550-700 CHF/t Eisen.

Der mineralische Rückstand der Klärschlammasche kann durch die prozessinterne Schwermetallabtrennung einer stofflichen Verwertung im Zementwerk zugeführt werden. Weiterführende Angaben zu den Produkten bzw. den möglichen Absatzmärkten sind in Kapitel 7 gegeben.

Schwermetalle, die aus der ursprünglichen Klärschlammasche abgetrennt worden sind, können je nach Konzentration und Fracht einer separaten Metallrückgewinnung zugeführt werden. Diese können am Ende des Prozesses als Metallhydroxidschlamm abgetrennt und einer stofflichen Verwertung zugeführt werden (z.B. SwissZinc-Projekt). Genauere Aussagen über die Menge des jeweiligen rückgewinnbaren Metalls können erst nach Abschluss der Pilotierungsarbeiten angegeben werden, da erst in diesem Prozessstadium alle Kreisläufe geschlossen bilanziert werden können.

6 Ökologie

Weltweit wird Phosphorsäure überwiegend aus Rohphosphaten (Erzen) durch die Behandlung mit Schwefelsäure hergestellt. Diese Rohphosphorsäure wird vorwiegend in der Düngemittelherstellung eingesetzt. Ein Teil davon wird zu höheren Qualitäten aufbereitet (technische Qualität TGA, Lebensmittelqualität FGA etc.), indem Schadstoffe wie Schwermetalle, Fluor und Organika abgetrennt werden. Technologisch wird heute dazu vorwiegend die Solventextraktion, als lösungsmittelbasiertes Flüssig-Flüssig-Trennverfahren, zur Aufbereitung eingesetzt.

Da die qualitativ wenig belasteten Rohphosphatquellen zur Neige gehen, steigt die ökologische Belastung der Düngemittel- und der primären Phosphorsäureproduktion stetig. Demgegenüber weist der Phos4life-Prozess und die daraus produzierte Phosphorsäure eine signifikant geringere ökologische Belastung auf. Wichtige Ressourcen können somit effizient geschont und durch ökologisch unbedenklichere – im Vergleich zu den primären Produkten vor allem kadmium- und uranärmere Rezyklate ersetzt werden. Durch die zusätzliche Eisenfällmittelproduktion und die Verwertung des im Rückstand vorhandenen Gipses im Zementwerk resultiert aus diesen weiteren Umweltvorteilen eine deutlich geringere Umweltbelastung gegenüber der heutigen Praxis zur Deponierung der Klärschlammasche. Wenn sich im Anschluss an die Pilotierung die Verwertung der abgetrennten Schwermetalle in einem Metallrecyclingprozess als praxistauglich erweist, so ermöglicht dies weitere ökologische Vorteile. Eine nahezu 100%ige stoffliche Verwertung des ursprünglichen Abfalls Klärschlammasche ist somit möglich. Der vorgestellte Weg stellt ein Beispiel für einen effizienten Stoffkreislauf dar, der die Anforderungen einer modernen und nachhaltigen Kreislaufwirtschaft erfüllt und damit auch konform mit dem Schweizer Abfallleitbild von 1986 ist.

Der volkswirtschaftliche Nutzen ökologischer Massnahmen kann mit dem am UMTEC in Rapperswil entwickelten sogenannten spezifischen Ökonutzenindikator (SEBI) bewertet werden. Dabei werden neu vorgeschlagene Umweltmassnahmen mit bereits implementierten Massnahmen verglichen und im Hinblick auf deren wirtschaftliche/ökologische Effizienz beurteilt. Die Ökologie wird anhand der Methode der ökologischen Knappheit mittels Umweltbelastungspunkten bewertet. Der Umweltnutzen wird gegenüber einem Referenzszenario durch eingesparte Umweltbelastungspunkte (eUBP) quantifiziert. Zur Berechnung des SEBI wird der zusätzliche Umweltnutzen (eUBP) durch die zusätzlichen Kosten der Massnahme dividiert. Resultiert ein hoher SEBI (eUBP/CHF), so charakterisiert dies eine sehr ökoeffiziente Massnahme (z.B. Recyclingsystem), die einen grossen Umweltnutzen pro investiertem Franken generiert. In der nachfolgenden Abbildung werden die SEBI-Faktoren verschiedener Massnahmen mit dem Phos4life-Verfahren zur Phosphorrückgewinnung verglichen. Daraus ist ersichtlich, dass diese Massnahme effizient ist und einen grossen Umweltvorteil pro investiertem Franken generiert.

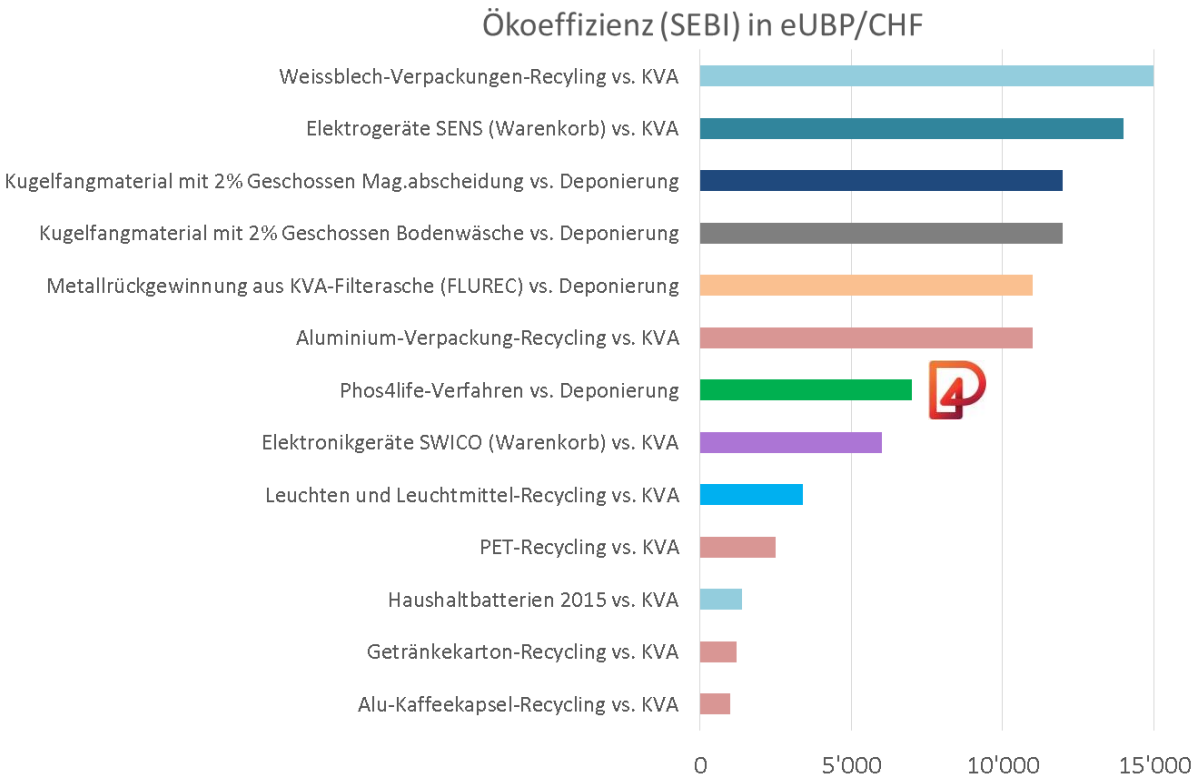

Abbildung 3: Vergleich der Ökoeffizienz des Phosphorrecyclings via Phos4life-Verfahren mit anderen Massnahmen in der Abfallwirtschaft

Die ökologische Belastung der primären Phosphorindustrie kommt einerseits am Abbaustandort und anderseits am Einsatzort der Produkte (u.a. Düngemittel) zum Tragen. Pro Tonne Phosphorsäure, die nasschemisch aus primären Rohphosphaten hergestellt wird, fällt ca. 5 Tonnen radioaktiver, schwermetallhaltiger Phosphorgips an. Weltweit wurden 2010 ca. 180 Mio. Tonnen Rohphosphat abgebaut und dabei ca. 500 Mio. Tonnen Phosphorgips produziert. Dieser wird entweder am Ort der Phosphorsäureherstellung auf oberflächlichen Halden abgelagert (z.B. Israel, Florida, China) oder in anderen Fällen direkt ins angrenzende Meer eingeleitet (z.B. Marokko). Da aus dem Rohphosphat Schadstoffe auch in die nachfolgenden Produkte wie Düngemittel und Phosphorsäure eingetragen werden, gefährdet dies die Einsatzgebiete dieser Produkte. So stellen die Schwermetalle Kadmium und Uran beispielsweise eine akute Gefährdung der Nahrungsmittelkette, des Bodens und des Grundwassers dar, da sie zunehmend in höherer Konzentration in Düngemitteln enthalten sind. In einer Kontrolle der Düngemittelhersteller wurde 2011/12 eine Grenzwertüberschreitung für Kadmium bei 10 von 19 kontrollierten Firmen festgestellt. Die Dünger erfüllten die in der Schweiz gültigen Grenzwerte somit nicht. Ein Zusammenhang der Uran- und Kadmiumbelastung der Böden durch den Eintrag über Mineraldünger ist nachgewiesen (SCAHT-Bericht, bzw. BLW). Diese ökologische Mehrbelastung mit Schadstoffen ist sehr kritisch zu sehen und deren Ausweitung sollte durch die Einhaltung der gültigen Gesetze reduziert werden. In diesem Kontext bieten nachhaltige und ökologisch effiziente Verfahren wie das Phos4life-Verfahren eine gute Möglichkeit, den Einsatz der primären, schadstoffhaltigen Rohphosphate durch ein gezieltes Recycling zu minimieren.

7 Markt

7.1 Zielgruppe für den Lösungsansatz

Der Businessplan 1.0 richtet sich in erster Linie an die Baudirektion als Auftraggeberin und zeigt auf, dass mit dem Phosphor-Mining aus Klärschlammasche ein Weg existiert, die vom Regierungsrat vorgegebene Stossrichtung auch in die Praxis umzusetzen. Weitere Adressaten sind vor allem die Betreiber von Kläranlagen, deren Pflicht die Rückgewinnung der Ressource Phosphor bis 2025 ist. Sie werden in der nächsten Zeit gefordert sein, sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen und einen geeigneten Weg zur Umsetzung der neuen Abfallverordnung (VVEA) einzuschlagen. Die dafür notwendige thermische Verwertung des Klärschlamms in Form einer Monoverbrennungsanlage ist Grundvoraussetzung für diese Phosphorsäurestrategie. Das Ausgangsmaterial für den Rückgewinnungsprozess ist Klärschlammasche, deren Aufkommen in der Schweiz nachfolgend geografisch zugeordnet wird.

7.2 Klärschlammasche

In der Schweiz fallen bei der Monoverbrennung von Klärschlämmen derzeit ca. 50‘000 t/a trockene Klärschlammasche an, wenn der Wassergehalt der feucht ausgetragenen Aschen mit 10-20% angenommen wird (Abbildung 4). Im Kanton Zürich liegt die im Jahr 2016 produzierte Klärschlammasche-Menge bei 11‘500 t/a.

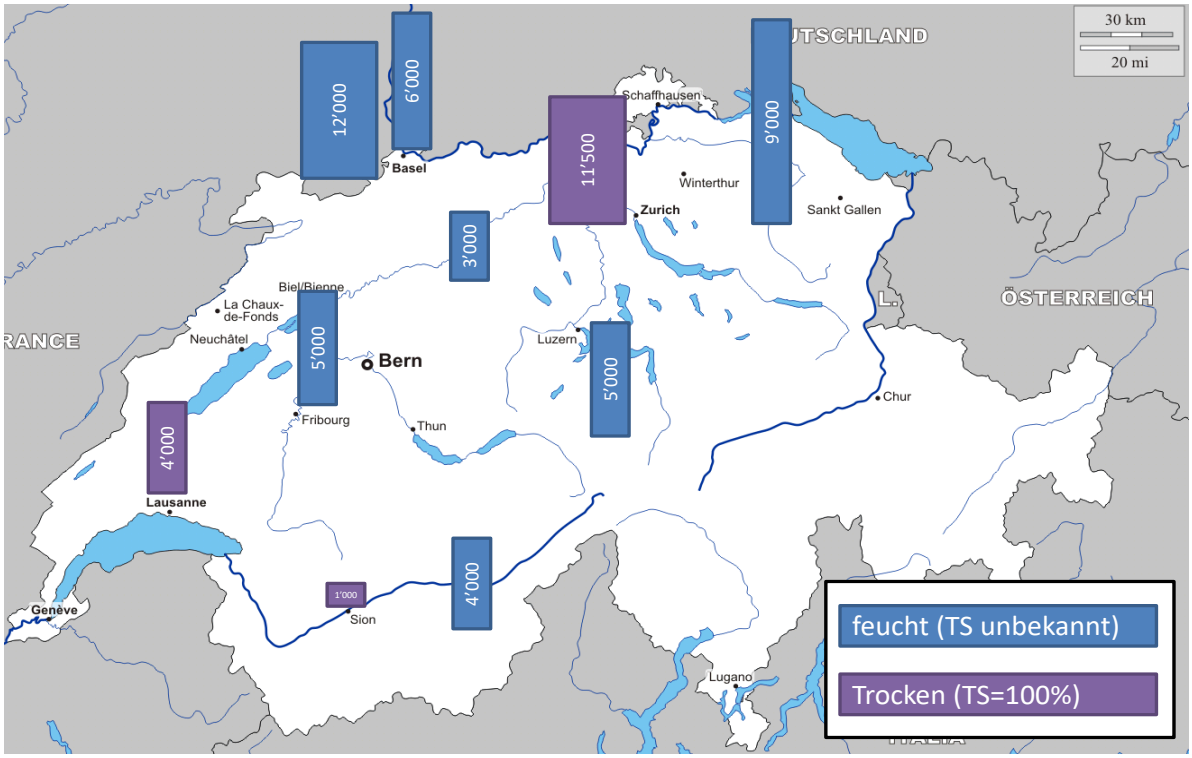

Abbildung 4: Geografischer Anfall der Schweizer Klärschlammaschen.

Eine Integration von Klärschlammaschen aus dem nahen Ausland ist prinzipiell möglich. Da die Phosphorrückgewinnung in der Schweiz anderen Gesetzen als im europäischen Vergleich unterstellt ist, sind die spezifischen Behandlungskosten pro Tonne Klärschlammasche in der Schweiz allerdings teurer. Daher ist die Akquisition von ausländischer Klärschlammasche eher unwahrscheinlich.

7.3 Technische Phosphorsäure

Phosphorsäure wird bisher ausschliesslich aus Rohphosphaten hergestellt. In der Regel erfolgt die Produktion in der Nähe der Erzvorkommen im Ausland. Aus einer rohen Phosphorsäure werden dort durch nachfolgende Reinigungsstufen qualitativ hochwertigere Produkte, z.B. technische Qualität (TGA) oder Lebensmittelqualität (FGA). Im europäischen Markt existiert praktisch kaum ein qualitativer Unterschied zwischen technischer und Lebensmittelqualität, da die Produktionsprozesse identisch sind. Lediglich die Auditierungs- und Zertifizierungsprozesse unterscheiden sich, da bei der Lebensmittelqualität eine deutlich höhere Dokumentationspflicht gefordert wird. Für TGA sind die stärksten Segmente des Absatzmarktes Galvanik- und Oberflächenveredlung, techn. Synthesen, Papierherstellung, Maschinenindustrie, Abwasserbehandlungsanlagen, Metallverarbeitung etc. Phosphorsäuren, die in die Düngemittelherstellung gehen, weisen heutzutage eine geringe Qualität auf. Der Marktpreis dieser merchant grade Säuren (MGA) liegt im Bereich von 300-320 CHF/t 80%ige Phosphorsäure.

Hauptkonkurrenten in Europa sind Prayon mit Produktionsanlagen in Belgien und Marokko, Budenheim mit einer Produktionsanlage in Marokko (Lager in Budenheim, Deutschland), Fosfa (Breclav, Tschechische Republik), ICL (Israel) und diverse chinesische Produzenten. Das Marktvolumen für Technische Qualität und Lebensmittelqualität liegt in Europa bei ca. 400‘000 t/a. In die Schweiz werden jährlich ca. 3‘000 Tonnen Phosphorsäure importiert. Betrachtet man den Kanton Zürich isoliert, so können aus der Klärschlammasche (11‘500 t/a) ca. 4‘000 t/a Phosphorsäure produziert werden die somit bereits über dem inländischen Marktvolumen liegen. Für den Absatz der Phosphorsäure ist man somit auf die Zusammenarbeit mit ausländischen Vertriebsnetzen bzw. Abnehmern angewiesen. Mit der Firma Brenntag, als einem der weltweit grössten Chemikalienhändler, konnte ein zuverlässiger Partner zum Absatz der Phosphorsäure gewonnen werden (vgl. Kap. 8). Das Risiko, dass das Produkt nicht abgesetzt werden kann ist unter Einhaltung der Qualitätsvorgaben marginal. Der Verkaufserlös pro Tonne technischer Phosphorsäure liegt im Bereich von 600-700 CHF/t und ist somit in etwa doppelt so hoch wie die für Düngemittelzwecke verwendete rohe Phosphorsäure. Ein Mehrwert durch eine „grüne“ ökologisch nachhaltige Säure aus dem Phosphorrecycling bei gleicher Qualität ist gemäss Brenntag denkbar, im gegenwärtigen Zeitpunkt aber nicht quantifizierbar.

Die Absatzchancen der Phosphorsäure im Bereich der Düngemittelherstellung sind aufgrund der günstiger verfügbaren, aber schadstoffreicheren primären Produkte nur mit einem Preisabschlag möglich. Dies wird sich erst durch eine konsequente Anwendung und Umsetzung national gültiger Gesetzte verbessern lassen, indem sich der ökologische Vorteil der Schadstoffarmut auch im Mehrwert in der Düngemittelindustrie durchsetzt.

Solange es in Schweiz geduldet wird, dass die eingesetzten Mineraldünger beispielsweise die Schwermetallgrenzwerte für Kadmium überschreiten, wird auch keine Notwendigkeit für eine qualitativ hochwertigere Phosphorsäure für Düngemittelzwecke bestehen.

Die Nachfrage nach ökologisch nachhaltig und schwermetallfrei produzierten Phosphorsäuren sowie die Akzeptanz der damit verbundenen höheren Produktionskosten sind bis heute noch nicht gegeben. Die konsequente Umsetzung des Vorsorgeprinzips gebietet einen sorgsameren Umgang mit schadstoffbelasteten Mineraldüngern. Sofern der ökologische Wert der produzierten Phosphorsäure einmal anerkannt wird, wird dies zu einer Preissteigerung derselben führen und auch die Nachfrage steigern.

Allgemein ist die Preisentwicklung der Phosphorsäure neben spekulativen Effekten, wie sie 2008 zum Tragen gekommen sind (Abbildung 5), unter anderem vom Getreidepreis und diversen Grosskunden (Coca-Cola, Wasserwerke London, Indien (Flüssigdünger) etc.)

abhängig. Hinzu kommt die Energiekostenentwicklung sowie politische Stabilität im Nahen Osten und Nordafrika als Hauptproduzenten der Phosphorsäure. Da Phosphorsäure nicht an Börsen gehandelt wird, kann der Preis pro Tonne Rohphosphat als Ausgangsmaterial bzw. der Preis pro Tonne Düngeräquivalent (als Tripelsuperphosphat TSP, dem Produkt aus Rohphosphat und Phosphorsäure) als Indikator zur Preisentwicklung in der Vergangenheit herangezogen werden. Von 2010 bis heute ist der Preis trotz Schwankungen währungskorrigiert in CHF in etwa gleich geblieben.

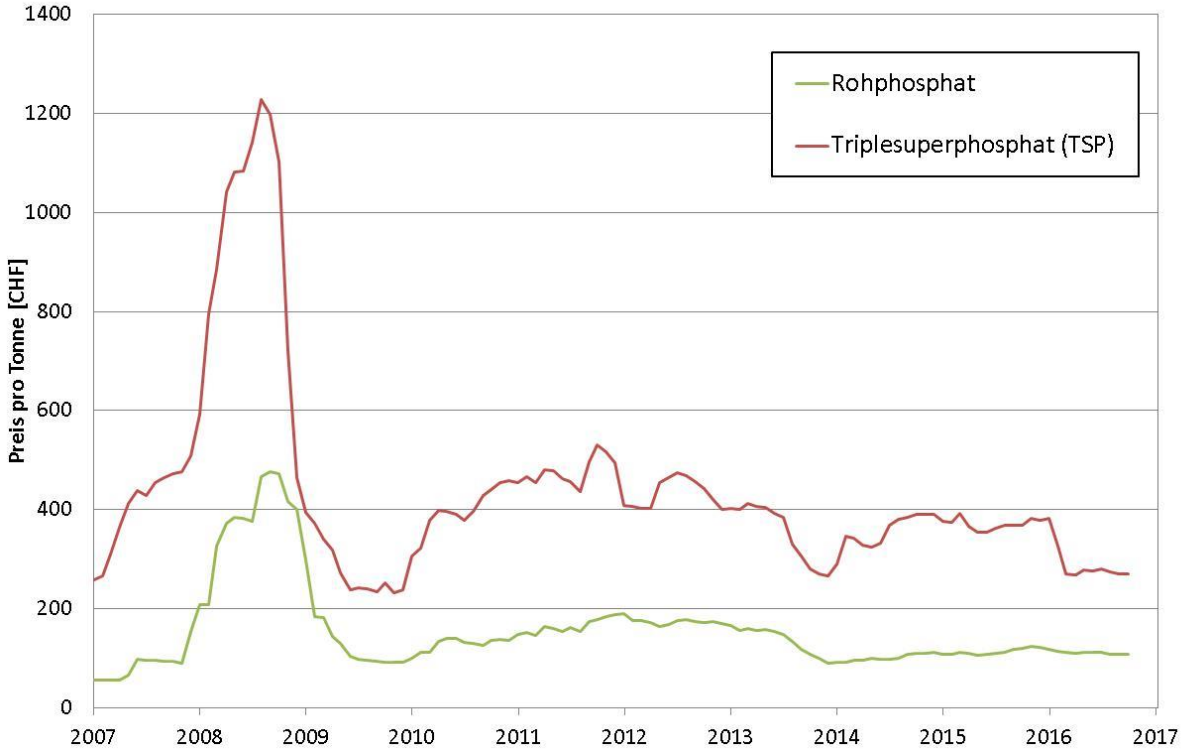

Abbildung 5: Preisentwicklung des Rohphosphates und des Düngers TSP als Indikator für die Entwicklung der Phosphorsäurekosten

Zusammenfassend gilt somit für den Produktabsatz der Phosphorsäure, dass unter Einhaltung der qualitativen Ansprüche eine Applikation in industriellen Prozessen möglich ist. Der Einsatz in der Düngemittelindustrie ist aufgrund der fehlenden ökonomischen Gewichtung der reduzierten Schadstofffracht heute nur mit deutlichen Preisabschlägen möglich. Es wird aber davon ausgegangen, dass sich dieser Effekt sowohl national als auch international durch die vorangetriebenen Arbeiten zur Phosphorrückgewinnung zukünftig verbessern wird und, insbesondere in der Schweiz, durch die Einhaltung bestehender Gesetze auch zeitnah vorangetrieben wird. In Zukunft kann der ökologische Mehrwert auch zu einem höheren Ertrag führen, bzw. die Gesetzgebung diesen Effekt nachhaltig beeinflussen.

7.4 Eisenchloridlösung

Eisen(III)chloridlösung wird für verschiedene industrielle und kommunale Abwasserreinigungsaufgaben und zur Druck- und Leiterplattenherstellung (ätzen) eingesetzt. Hergestellt werden diese Lösungen entweder aus primären Eisenerzen oder aus eisenhaltigen Abfällen unter Chlorgas- oder Salzsäureeinwirkung. In der Schweiz produziert lediglich noch die Firma Aregger Chemie selbst. Alle anderen grossen Lieferanten wie Brenntag, Feralco und Tessenderlo beziehen die Eisensalze aus ausländischen Quellen.

Ein Absatz der aus Klärschlammasche produzierten 75‘000 t/a Eisen(III)chloridlösung innerhalb der Schweiz ist möglich. Die aus der Zürcher Klärschlammaschefracht produzierte Menge entspricht in etwa 30% der schweizweit verwendeten Eisenchloride. Neben dem Schweizer Markt kann das Eisen(III)chlorid auch über bestehende Handelsnetzwerke und Distributoren abgegeben werden. Neben der Aregger Chemie hat auch Brenntag ein grosses Interesse an der Vermarktung dieses Produktes. Die Absatzwege des Produktes innerhalb Europas sind damit vorhanden.

7.5 Mineralischer Rückstand

Der schwermetallentfrachtete mineralische Rückstand der Klärschlammasche kann einer stofflichen Verwertung im Zementwerk zugeführt werden. Die relevanten Grenzwerte können basierend auf den vorliegenden Ergebnissen mit dem Phos4life-Verfahren sichergestellt werden. Eine detaillierte Prüfung und Charakterisierung dieses Materials erfolgt anhand der während der Pilotierung produzierten, repräsentativen Materialmuster. Mit dem Schweizer Zementwerk Juracement konnte ein Abnehmer des Materials gefunden werden (vgl. Kap. 8). Weitere Absatzmöglichkeiten zu anderen Zementwerken sind prinzipiell auch möglich.

8 Entwicklungspartner

Das ambitiöse Projekt kann nur mit Einbeziehung massgebender Marktakteure erfolgreich umgesetzt werden. Dies beinhaltet unter anderem die erfolgreiche technische Entwicklung und Abwicklung sowie die Marktbearbeitung auf der Produkteseite zur Sicherung des bestmöglichen Absatzweges.

Auf technischer Ebene wird das Projekt von ZAR und dem spanischen Generalunternehmer Tecnicas Réunidas (TR) entwickelt. Die Kosten für diese Entwicklungsarbeit werden zu 40% von TR und zu 60% von ZAR bzw. dem Kanton Zürich übernommen. Durch die im Jahre 2015 unterzeichnete Kooperationsvereinbarung werden die aus dem Projekt erarbeiteten Resultate einer zukünftigen Schweizer Trägerschaft zur Umsetzung unentgeltlich zur Verfügung stehen. Darüber hinaus werden seitens TR keine Lizenz- oder Know-How-Gebühren für eine oder mehrere Schweizer Anwendungen des Verfahrens fällig. Submissionsrechtlich kann durch die bereits erfolgte Publikation der Kooperation mit TR auch für eine etwaige, spätere auszuführende Auftragsabwicklung eine freihändige Vergabe erfolgen.

Auf der Produkteseite sind hier die beiden Firmen Juracement und Brenntag Schweizerhall AG als Abnehmer des mineralischen Rückstandes bzw. der Phosphorsäure und der Eisen(III)chloridlösung zu nennen. Beide Firmen haben in einer schriftlichen Stellungnahme die konstruktive Mitwirkung am Projekt zugesichert und die Verwertung bzw. Vermarktung der unter Kap.5 dargelegten Produkte unter Einhaltung der geltenden Qualitätsvorgaben zugesichert.

Somit konnten für das gesamte Verfahren verlässliche und kompetente Partner zur erfolgreichen Umsetzung gefunden werden.

9 Geschäftsidee

9.1 Kundennutzen

Der vorliegende Businessplan zeigt für die Betreiber einer ARA- bzw. Klärschlammmonoverbrennungsanlage einen Weg auf, wie der aus dem Abwasser stammende Phosphor – der nicht mehr mit dem Klärschlamm der Landwirtschaft zugeführt werden kann – als Ressource erhalten und in Form von hochwertiger Phosphorsäure wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Den Betreibern der Anlagen, deren Pflicht die Phosphorrückgewinnung gemäss dem Stand der Technik bis zum Jahre 2025 ist (siehe Kap.13), wird damit ein gangbarer Weg vorgestellt, die Aufgaben im Phosphorrecycling im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufschliessung zu implementieren.

9.2 Mögliche Umsetzung der Geschäftsidee

Zur Umsetzung des Projektes benötigt es eine Trägerschaft, die sich vorteilhaft aus mehreren grossen Klärschlamm bzw. Klärschlammasche-Lieferanten zusammensetzt. Diese gründen in einem ersten Schritt eine neue AG – z.B. die Phos4Life-Swiss AG (Arbeitstitel) – deren Aufgabe die Übernahme der Klärschlammasche und deren Behandlung ist. Diese AG vertreibt die aus der Klärschlammasche hergestellten Produkte zu marktüblichen Preisen und sorgt bei der Verwertung der mineralischen Rückstände für deren kostengünstige und sichere Verwertung. Der übrige anfallende Betriebsaufwand wird in Form einer transparenten und offenen Abrechnung gegenüber den Klärschlammasche-Lieferanten dargelegt und dementsprechend verrechnet. Ziel der AG ist eine nicht gewinnorientierte, gesetzeskonforme und effiziente Verwertung der Klärschlammasche. Da die heutige Marktsituation die alleinige Finanzierung durch die erzielbaren Produkterträge nicht decken wird, muss dies durch die Abwasserbehandlungskosten von der Allgemeinheit mit getragen werden (siehe Kap. 11).

10 Standortanforderungen zur Umsetzung

Klärschlammasche ist in geschlossenen Silofahrzeugen transportierbar und die Rückgewinnung von Phosphor daraus nicht an den Standort einer Monoverbrennungsanlage gebunden. Eine gute Verkehrsanbindung durch Schiene und Strasse sind für einen potenziellen Standort wichtig. Da der Phos4life-Prozess zur Herstellung der Eisen(III)-chloridlösung und der Phosphorsäure Energie bzw. Dampf benötigt, ist dies ein entscheidender Faktor für die Minimierung der Betriebsmittelkosten. Kann an einem zukünftigen Standort Dampf und Energie nachhaltig und langfristig konkurrenzfähig zur Verfügung gestellt werden, bietet dies klare Vorteile. Primär geeignet ist demnach ein Standort bei einer grossen Kehrichtverwertungsanlage (KVA) oder einem grösseren Industriekomplex mit günstiger, konstanter Energiequelle und genügend grossem Vorfluter zur Einleitung des gereinigten Abwassers und zu allfälligen Kühlzwecken.

Ein möglicher regionaler Standort, an dem neben der im Kanton Zürich anfallenden Klärschlammasche auch diejenige anderer Kantone verarbeitet werden kann, ist bei der KVA Zuchwil (KEBAG). Neben den notwendigen Platzreserven sind dort auch die infrastrukturellen Bedingungen ideal. Da am Standort der KEBAG ebenfalls die schweizweite Rückgewinnungsanlage für Metalle aus KVA-Hydroxidschlämmen (SwissZinc) projektiert wird, bieten sich auch hier grosse Prozesssynergien, da die Prozessführung des SwissZinc- und Phos4life-Verfahrens grundlegende Ähnlichkeiten aufweist. Synergien im Bereich

Personal, Prozessüberwachung, Qualitätskontrolle, Logistik und Chemikalienbewirtschaftung sind nur ein paar Beispiele, die dort vorteilhaft genutzt werden könnten. Da am Standort bereits seit 2013 Erfahrungen im grosstechnischen Betrieb einer Solventextraktionsanlage bestehen, ist bereits ein Personalstamm mit entsprechendem, schweizweit exklusivem Know-how verfügbar.

11 Finanzen

Nachfolgend werden die wichtigsten, derzeit vorliegenden ökonomischen Kennzahlen des Phos4life-Verfahrens erläutert und in den Kontext einer Kostenbetrachtung pro Tonne verwerteter Klärschlammasche gebracht. Die nachfolgend dargestellten Zahlen basieren auf dem derzeitigen Entwicklungsstand des Projektes. Zum Abschluss der Pilotierungsarbeiten werden Ende 2017 exaktere Daten vorliegen.

11.1 Investitionen

Eine genauere Ermittlung der Investitionskosten kann erst nach der erfolgreich durchgeführten Pilotierung erfolgen. Zur Abschätzung der Investitionskosten wurden Kapitalkosten in der Höhe von 350 CHF pro Tonne Klärschlammasche angenommen. Dabei wurden zur Abschreibung des Gebäudes 33 Jahre, der Verfahrenstechnik 20 Jahre und der Elektro- und Leittechnik 10 Jahre angenommen. Generell könnten zur Finanzierung eines solchen Leuchtturmprojektes Finanzmittel aus einem Nachhaltigkeitsfond beantragt werden. Zudem wäre eine Subventionierung der Investitionskosten durch Bund oder die Kantone möglich.

Durch Nutzung des Scale-Up-Effektes kann bei steigendem Klärschlammascheinput die Auswirkung der Investitionskosten auf die Gesamtkosten der Klärschlammascheverwertung gesenkt werden. Dies wird in Kap. 11.4 für zwei Durchsatzszenarien von 15‘000 bzw. 30‘000 t/a vorgestellt. In der Praxis zeigt sich des Weiteren oft, dass analoge Wertstoffrückgewinnungsprozesse und dabei insbesondere deren Kostenstruktur, vom Betriebsaufwand dominiert werden, der nachfolgend detaillierter vorgestellt wird.

11.2 Betriebsaufwand

Der erforderliche Betriebsaufwand (Tabelle 2) zur Behandlung der Klärschlammasche und Produktion der Phosphorsäure, Eisenchloridlösung etc. beläuft sich gemäss bisheriger Kenntnis auf 736 CHF pro Tonne Klärschlammasche. Als sensitivster Kostenfaktor ist dabei die benötigte Dampfmenge hervorzuheben, der bei der Standortauswahl grosse Beachtung eingeräumt werden muss (siehe Kap.10). Die derzeit angewendeten Dampfkosten von 20 CHF/t sind stark mit der Standortwahl „KVA“ verbunden, aufgrund derer aber auch ein langfristig konstanter Preis mit geringer Unsicherheit angenommen werden kann.

Tabelle 1: Betriebsaufwand pro Tonne Klärschlammasche (KSA) in CHF

Betriebsmittelkosten (OPEX)	[CHF/t KSA]
Reagenzien und Hilfsmittel	201
Dampf	197
Verwertung Rückstände	75
Strom	28
Personalkosten	100
Unterhaltskosten	48
Versicherungen	24
Reserve/Unsicherheit	63
Summe OPEX	**736**

11.3 Erträge

In Tabelle 2 sind die Erträge aus der Annahme der Klärschlammasche und der daraus hergestellten Produkte aufgeführt. Die mittleren Phosphor- bzw. Eisengehalte der Klärschlammasche, die der Berechnung zugrunde liegen, sind 9% Phosphor bzw. 17% Eisen. Die eingesetzten Preise für den Verkaufserlös sind Gegenstand laufender Abklärungen und werden sich erst nach abgeschlossener Pilotierung mit dem Vorliegen repräsentativer Probenmuster genauer verifizieren lassen.

Tabelle 2: Erträge aus Annahme der Klärschlammasche (KSA) und Produkteverkauf pro t KSA in CHF

Produkteverkauf	[CHF/t KSA]
Gutschrift Wegfall KSA-Deponierung	80
Phosphorsäure, 74%	254
Eisen(III)chloridlösung, 40%	96
Summe der Erträge	**430**

11.4 Preisgestaltung für die Annahme von Klärschlammasche (KSA)

Die Preisgestaltung zur Finanzierung der Phosphorrückgewinnung bedingt durch die nicht kostendeckenden Verkaufserlöse eine zusätzliche Finanzierung für die Behandlung der KSA. Da unter den in Kap.11.1 bereits genannten Gründen eine Investitionskostenschätzung basierend auf der heutigen Datenlage sehr ungenau ist, wird an dieser Stelle zur Preisgestaltung ein Kapitalaufwand von ca. 350 CHF pro Tonne KSA angenommen. Dabei wurden zur Abschreibung des Gebäudes 33 Jahre, der Verfahrenstechnik 20 Jahre und der Elektro- und Leittechnik 10 Jahre angenommen. Zum kostendeckenden Betrieb fehlen Erträge von ca. 640 CHF pro Tonne KSA, die durch die Annahme der KSA bzw. des Klärschlamms finanziert werden müssen (Abbildung 6). Bei einem höheren KSA-Durchsatz von 30‘000 t/a – dies entspricht in etwa dem doppelten KSA-Anfall des Kantons Zürich – ergibt sich durch die Nutzung des Economy-of-Scale-Effektes ein Kostendefizit von ca. 515 CHF pro Tonne KSA.

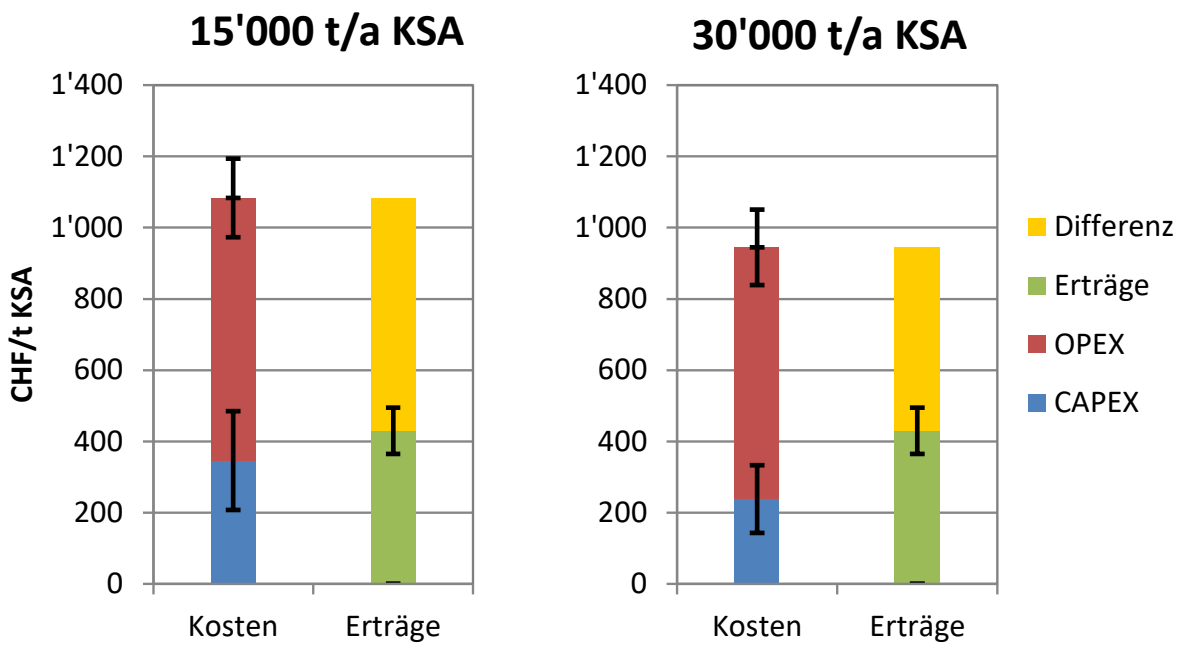

Abbildung 6: Gegenüberstellung der verfahrensbedingten Kosten und erzielbaren Erträge für zwei Durchsatzvarianten mit 15‘000 bzw. 30‘000 t/a KSA. Die erforderlichen Mehrkosten sind als fehlender Ertrag (gelb) dargestellt.

Diese fehlenden Erträge von 640 CHF (bei 15‘000 t/a KSA) bzw. 517 CHF (bei 30‘000 t/a KSA) pro Tonne KSA entsprechen Mehrkosten von etwa 87 bzw. 70 CHF pro Tonne entwässertem Klärschlamm (EKS, 30% TS-Gehalt). Dieser Mehraufwand generiert den Nutzen der umweltfreundlichen Phosphorrückgewinnung. Die Gesamtkosten für die thermische Verwertung der KSA und dem hier vorgestellten Phosphor-Mining sind im Kanton Zürich auf die Tonne EKS bezogen tiefer als der gewichtete Mittelwert aller KS-Entsorgungswege (ca. 200 CHF/t EKS) vor dem Bau der Monoverbrennungsanlage.

12 Alternative Verfahren zum Phosphorrecycling

Die Entwicklung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. der daraus resultierenden Klärschlammasche erlebte in den letzten 10 Jahren einen grossen Aufwärtstrend. Immer neue Verfahren werden mit unterschiedlichsten Zielsetzungen entwickelt und auf dem Markt positioniert. Ein objektiver Vergleich der Verfahren ist derzeit nicht möglich, da sie sich sowohl hinsichtlich der Systemgrenzen als auch der Zielsetzungen deutlich unterscheiden und die Entwicklungszustände darüber hinaus sehr unterschiedlich sind. Eine projektbegleitende Umfeldbeobachtung – vorwiegend auf technischen Aspekten beruhend – wurde laufend zur Standortbestimmung durchgeführt. Da bis heute kein aschebasiertes Verfahren grosstechnisch zur Verfügung steht, müssen die entwickelten und kurz vor der Industriereife stehenden Verfahren einer einheitlichen Bewertung unterzogen und daraus später der beste Weg zur Umsetzung der Phosphor-Mining Strategie ausgewählt werden (siehe Kap.15).

13 Entwicklung in der Gesetzgebung

Mit der Totalrevision der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA) im Jahre 2015 trat im Januar 2016 die neue Verordnung zur Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) in Kraft. Diese beinhaltet für phosphorreiche Abfälle wie Klärschlamm oder die daraus resultierende Klärschlammasche eine Pflicht zur Phosphorrückgewinnung gemäss dem Stand der Technik. Nachdem weltweit noch kein einziges grosstechnisches Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus KSA umgesetzt werden konnte, ist der heutige Stand der Technik noch nicht existent. Da die VVEA keine Rahmenbedingungen oder Zielvorgaben zum angestrebten Wirkungsgrad macht, ist diesbezüglich keine Fokussierung auf bestimmte Technologien und insbesondere deren Phosphorrückgewinnungsgrad möglich. Der Stand der Technik beinhaltet neben der technischen Machbarkeit auch die ökonomische Tragbarkeit des potentiellen Verfahrens, so dass über diesen Weg eine zu hohe ökonomische Belastung vermieden werden soll. Bei dieser Überlegung muss aber insbesondere bei einem objektiv durchzuführenden Verfahrensvergleich die Systemgrenze zwingend identisch sein, da sonst keine Bewertung möglich ist. Wendet man den Stand im Kanton Zürich vor der zentralen Klärschlammverbrennungsanlage an, so waren die Kosten im gewichteten Mittel pro Tonne EKS von 2007-2011 bei 205 CHF/t EKS. Wird diese Situation zur Bewertung der ökonomischen Tragbarkeit herangezogen, ist das Phosphor-Mining bereits heute tragbar (vgl. Kap. 12).

Auch in anderen Ländern wird die Phosphorrückgewinnung bald Einzug in die Gesetzgebung finden. So hat Deutschland 2017 die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung für Kläranlagen mit einer Ausbaugrösse > 50‘000 Einwohnerwerten (EW) in die Gesetzgebung mit aufgenommen. Anders als in der VVEA werden im Referentenentwurf aber Zielvorgaben für die Phosphorrückgewinnung genannt. Für Klärschlammasche gilt eine Rückgewinnungspflicht von min. 80% des in der Klärschlammasche enthaltenen Phosphors. Das Gesetz tritt nach Inkrafttreten mit einer Übergangsfrist von 12 Jahren für ARAs mit einer Ausbaugrösse von 100‘000 und 15 Jahren ab 50‘000 EW in Kraft.

Weitere europäische Länder wie Österreich, Dänemark, Schweden etc. arbeiten derzeit an der Integration einer Phosphorrückgewinnungspflicht aus Klärschlamm bzw. Klärschlammaschen, die in den nächsten Jahren umgesetzt werden könnte.

14 Risikoanalyse

Die in der nachfolgenden Abbildung dargestellte SWOT-Analyse basiert auf einer ausführlichen Risikoanalyse und deren Massnahmen, deren Inhalte im morphologischen Kasten einzusehen sind.

Stärken	Schwächen
• Flexibler, leistungsstarker Prozess • Nahezu 100%ige Schliessung des Phosphor-Stoffkreislaufes über die Abwasserentsorgung möglich • Reduzierte Umweltbelastung durch Substitution von Phosphor aus der Primärerzgewinnung bzw. im Vergleich der heutigen Klärschlammverwertung mit Deponierung der Asche. • Phosphorsäure mit hoher Produktqualität reduziert Abhängigkeit (a) von Phosphorimporten aus wenigen instabilen Ländern mit steigenden, unsicheren und stark schwankenden Rohstoffpreisen und (b) von marktbe-herrschenden Düngerherstellern. • Verwertung des Eisenchlorids als Fällmittelersatz (ARA) • Hohe Produktqualität der Phosphorsäure und des Eisenchlorids • Grosser Absatzmarkt für Produkte in CH/EU • Fast 100%ige Verwertung der Klärschlammasche und Einsparung von Deponievolumen • Sehr gute Verkehrsanbindung des Standortes • Synergien mit FLUREC bzw. SwissZinc-Projekt • Technische Kompetenz am Standort KEBAG/FLUREC/ZAR • International renommierter Anlagenbauer mit sehr guten Referenzen als Partner (TR)	• Umweltvorteile sind z.T. von der Verwertung des mineralischen Rückstandes im Zementwerk abhängig
Chancen	**Gefahren**
• Regionale und nationale Ausweitung möglich, zentrales Anlagenkonzept • Möglicher kombinierter Standort im Inland oder benachbarten Ausland mit deutlich grösserem Klärschlamm-Durchsatz zur Nutzung des Economy-of-Scale-Prinzips	• Keine Akzeptanz für Mehrkosten der Abwasserreinigung zur Ressourcenschonung • Time to market

Abbildung 7: SWOT-Analyse

15 Empfehlung zum weiteren Vorgehen

Der Phos4life-Prozess zeigt den Weg zur weitestgehenden stofflichen Verwertung der Klärschlammasche auf. Hochwertige Produkte können zu marktüblichen Preisen verkauft und dem Stoffkreislauf wieder zugeführt werden. Die derzeit laufende Pilotierung ist ein wichtiger Baustein, um zu deren Ende verlässlichere Daten zur Bewertung und Dokumentation des Prozesses zu haben. Ebenso wichtig ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass realistische Produkterlöse erst anhand repräsentativer Proben und Mengen erhalten werden können. Damit diese Mengen erzeugt und durch zertifizierte, ausgewählte Fachlaboratorien analysiert werden können, ist die abschliessende Pilotierung erforderlich.

Die laufende Zeit der Pilotierungsarbeiten sollte dazu genutzt werden, die Erkenntnisse aus dem Projekt bekannt zu machen und die Akteure des Phosphorrecyclings zu informieren. Zudem sollen Stakeholder wie ARAs, Politik und Bevölkerung etc. auf die Akzeptanz der höheren Kosten für eine geringere Umweltbelastung der Klärschlammverwertung mittels des Phos4life-Prozesses sensibilisiert werden.

Im Anschluss an die Pilotierung wird eine fundierte Bewertung der praxisrelevanten Phosphorrückgewinnungsverfahren durch ein qualifiziertes und unabhängiges Team empfohlen. Dabei ist eine ausgewogene, gewichtete Bewertung anhand ökonomischer und ökologischer Parameter erforderlich. Für einen objektiven Vergleich ist dabei vor allem wichtig, dass alle Prozesse innerhalb der gleichen Systemgrenze betrachtet werden. Somit erhalten Kläranlagen und weitere involvierte Fachpersonen eine Entscheidungsgrundlage zur Auswahl eines geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahrens.

Wenn der Entscheid fällt, dass der Weg des Phos4life-Verfahrens mit den bisherigen oder auch mit weiteren Partnern weiter verfolgt werden soll, wird einer zukünftigen Trägerschaft empfohlen – in Kenntnis des konkreten Standortes –, die spezifischen Projektkosten im Rahmen eines Vorprojektes zu ermitteln.