



# Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

## Schlussbericht

**Autor:** Dr. Leo Morf  
Kanton Zürich, Baudirektion  
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

**Titel:** Schlussbericht «Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad»

**Autor:** Dr. Leo Morf, Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)

Mit Unterstützung durch:

Franz Adam, Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)

Thomas Zumbühl, HOLINGER AG, Luzern

Jürg Meyer, HOLINGER AG, Luzern

**Bezugsquellen:** Download ab Homepage:

Baudirektion des Kantons Zürich, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft,	<a href="http://www.klaerschlamm.zh.ch">www.klaerschlamm.zh.ch</a>
Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen	<a href="http://www.vbsa.ch">www.vbsa.ch</a>
Verband Schweizer Abwasser- und Ge- wässerschutzfachleute	<a href="http://www.vsa.ch">www.vsa.ch</a>
Organisation Kommunale Infrastruktur	<a href="http://www.kommunale-infrastruktur.ch">www.kommunale-infrastruktur.ch</a>
Phosphornetzwerk Schweiz	<a href="http://www.pxch.ch">www.pxch.ch</a>

### **Impressum:**

Auftraggeber und Prozessteilnehmende:

Mitglieder der Projektgruppe Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad (VTMA)

Prozessbegleitung (Moderation und Koordination)

Jürg Meyer und Thomas Zumbühl, HOLINGER AG, Luzern

© Mai 2018/ 5.Juli 2018 Revision V1 (mit Änderungen S. 3/9, S.26 (Tabelle 2); S. 35, S. 43, S. 54 und S. 68/69)

# INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG/ RÉSUMÉ	1
2	AUSGANGSLAGE	13
3	VERFAHRENSTECHNISCHE MARKTANALYSE (VTMA)	16
3.1	Zielsetzung	16
3.2	Vorgehen	17
3.3	Projektorganisation	18
3.4	Projektübersicht mit Meilensteinen	19
3.5	Rahmenbedingungen und Kriterien für die VTMA	19
3.5.1	Rechtliche Einordnung und Abgrenzung	20
3.5.2	Einladungskriterien	20
3.5.3	Bewertungskriterien	21
3.6	Informationsbeschaffung und Hearings	21
4	AUSWAHL DER TECHNOLOGIEANBIETER	23
5	BEWERTUNG DER VERFAHREN	25
5.1	Aktueller Wissensstand	25
5.2	Überprüfung der Einladungskriterien	26
5.3	Stoffliche Verwertung (für P und Mineralik)	27
5.4	Produktqualitäten und Absatzmärkte für Phosphor und Nebenprodukte	28
5.5	Technische Verfügbarkeit / Betrieb / Unterhalt	31
5.6	Integrierbarkeit in bestehende Infrastruktur	32
5.7	Kompatibilität mit der übergeordneten Strategie des Bundes	33
5.8	Kosten als Element der Klärschlammentsorgung	34
6	UMWELT / ÖKOLOGIE	35
7	ANMERKUNGEN ZUR FINANZIERUNG	37
8	EMPFEHLUNGEN DER EXPERTEN	39
8.1	Kurze Beurteilung der einzelnen Verfahren	39

8.2	Allgemeine Beurteilung und Empfehlungen der Experten	40
9	WORKSHOP WORLD-CAFÉ	42
10	FAZIT UND WEITERES VORGEHEN	42
10.1	Empfehlungen der Experten	44
10.2	Fazit und Empfehlungen der VTMA-Projektgruppe	45
11	ABKLÜRZUNGSVERZEICHNIS	47
12	LITERATUR	48
ANHANG 1:	PROJEKTPARTNER	49
ANHANG 2:	EXPERTEN UND GÄSTE	50
ANHANG 3:	ANBIETER UND VERFAHREN	51
ANHANG 4:	STELLUNGNAHMEN DER EXPERTEN	53
ANHANG 5:	ECOPHOS MIT SCHWEIZER RAHMENBEDINGUNGEN	63
ANHANG 6:	NORMIERTE KOSTENBETRACHTUNG DER VERFAHREN	66
	Behandlungskosten für klärschlammaschebasierte Verfahren (SVA)	66
	Behandlungskosten für klärschlamm-basierte Verfahren (KS)	68
	Kosten im Vergleich zu den totalen Abwasserbehandlungskosten in der Schweiz	69
	Kostenvergleich der Verfahren bzgl. der Produktion eines kg Phosphors	69
ANHANG 7:	ZUSAMMENFASSUNG ZUM WORLD-CAFÉ	70
ANHANG 8:	FAKTENBLÄTTER DER ANBIETER-/VERFAHREN	71

# 1 ZUSAMMENFASSUNG/ RÉSUMÉ

## Zusammenfassung

Der Ansatz des **Urban Mining** hat in den letzten Jahren deutlich gemacht, dass in vielem was wir gemeinhin als Abfälle bezeichnen, Ressourcen und Werte verborgen sind. So ist auch das Bewusstsein gewachsen, dass die Schweiz dank dem jahrzehntelang wachsenden Konsum von rohstoffreichen Gütern und dem Aufbau von Infrastruktur heute ein ressourcenreiches Land ist.

Unter anderem schlummert in der Schweiz im Abwasserpfad oder in tierischen Abfällen ein grosses ungenutztes Potenzial an **Phosphor** – eine für den Menschen essenzielle und unersetzliche Ressource. Aus dem Abwasserpfad der Schweiz fallen im Klärschlamm (KS) jährlich rund 6'000 t Phosphor (P) an. Dies ist die Hälfte der total importierten P-Menge (Mineraldünger, Nahrungsmittel und Futtermittel) oder heute schon mehr, als jedes Jahr in Form von Mineraldünger (4200 t/a) eingeführt wird. Weil die Entsorgungspfade nicht richtig zu Ende gedacht sind, geht Phosphor bei der Entsorgung heute ein für alle Mal verloren: die kostbare Ressource wird über den Zement in Bauwerke eingebunden oder als Rückstand aus der thermischen Verwertung deponiert.

Weil Klärschlamm umwelt- und gesundheitsgefährdende Schadstoffe enthält, hat der Bund die direkte **Klärschlammverwertung** als Dünger in der Landwirtschaft im Jahre 2006 untersagt. Um die Entsorgungssicherheit zu gewährleisten, mussten deshalb in verschiedenen Regionen entsprechende Investitionen getätigt werden. Seit dem 1.1.2016 ist nun die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) in Kraft. Diese schreibt die Rückgewinnung von Phosphor aus kommunalem Abwasser, aus Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen, aus der Asche aus der thermischen Behandlung von solchem Klärschlamm sowie aus Tier- und Knochenmehl vor, sofern diese Abfallstoffe nicht anderweitig verwertet werden. In der Schweiz wurde zur Thematik im Vergleich z.B. zu Deutschland bisher wenig Forschungsarbeit geleistet. Wenn in der kurzen Übergangsfrist bis ins Jahr 2026 Phosphor zu relevanten Anteilen aus dem Abwasser zurückgewonnen und einer stofflichen Nutzung zugeführt werden soll, müssen sich Kläranlagen, die den Schlamm gemeinsam entsorgen, bei einem Verfahrensentscheid an der bestehenden Infrastruktur orientieren. Als **Infrastrukturpfade** kommen Schlammverbrennungsanlagen (SVA) sowie die thermische Trocknung und Verwertung in Zementwerk (TuZ) in Frage. Eine Mitverbrennung in KVA ist dann nicht mehr möglich und wurde nicht weiterverfolgt, weil damit die Verwertung der mineralischen Fraktion nicht mehr gewährleistet werden könnte.

Im Herbst 2017 wurde mit der **Verfahrenstechnischen Marktanalyse (VTMA)** eine Plattform für den Dialog interessierter Kreise (KS-Inhaber und Verbände) geschaffen. Die VTMA hat zum Ziel, dass alle Beteiligten zu zusätzlichen Erkenntnissen für ihre Entscheidungsfindung kommen und dass sie die Entscheidungsträger ihrer Organisation entsprechend beraten können. Ein weiterer zentraler Aspekt der VTMA war die Bildung einer Plattform für den Austausch zwischen den Anlagebetreibern und die Vernetzung zu weiteren Akteuren. Die VTMA soll jene Verfahren aufzeigen, die sich unter den schweizerischen Rahmenbedingungen für die effiziente Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad eignen. Während der VTMA hatten die Beteiligten die Möglichkeit, sich im Rahmen eines Hearings mit den einzelnen Lösungsansätzen und Anbietern auseinander zu setzen. Die VTMA und der damit verbundene Partizipationsprozess wurden durch HOLINGER AG koordiniert. Am Hearing teilgenommen haben auch Vertreter des BAFU und BLW.

Vielversprechende **Technologieanbieter** wurden von den Mitgliedern der Steuergruppe nach definierten Einladungskriterien vorgeschlagen und an das Hearing eingeladen. An der VTMA nahmen folgende sieben Anbieter teil: Budenheim (ExtraPhos), CIMO (Sepholix), ECOPHOS, EuPhoRe, Técnicas Reunidas (Phos4Life), ZAB (ZAB-Verfahren) und CTU (Pyrophos). Sie alle lieferten Antworten zu

einem Fragenbogen, präsentierten am Hearing ihr Verfahren und beantworteten Fragen. Experten beurteilten darauf die Informationen. Mangels Interesse hatten ICL Fertilizer (Recophos- und Tenova-Bateman-Verfahren) sowie Remondis (Tetraphos®) abgesagt.

In einem World-Café diskutierten die Projektgruppenmitglieder diverse Aspekte der Verfahren sowie das weitere Vorgehen. Die Erkenntnisse wurden im vorliegenden Schlussbericht zusammengefasst. Die Bewertung erfolgte anhand von Bewertungskriterien, welche die Teilnehmenden der VTMA gemeinsam definiert haben.

#### **Wichtige Resultate der VTMA:**

Für jeden Infrastrukturfad sind Verfahren in Entwicklung, deren jeweiliger Entwicklungsstand sich sehr stark unterscheidet. Für einen abschliessenden Vergleich ist die Datenlage noch ungenügend.

**Für Verfahren**, die auf **Klärschlammasche (KSA)** basieren, stehen mit Phos4Life und ECOPHOS zwei vielversprechende Verfahren zur Verfügung, welche Phosphorsäure als wichtigen Baustein der Düngemittelproduktion produzieren. Ecophos baut bis 2019 eine KSA-basierte Produktionslinie in seine Grossanlage zur Tierfutterproduktion in Dünkirchen (F) bei Calais ein. Mittels Ionentauscher (IT) soll dort Phosphorsäure gereinigt werden. Eine Pilotierung mit Schweizer KSA wurde noch nicht durchgeführt. Bei Phos4Life steht die Pilotierung mit etablierter Nass-Chemie und Solvent-Extraktion kurz vor dem Abschluss. Das Sepholix-Verfahren ist noch nicht pilotiert und hat nur lokale Bedeutung. Das ZAB-Verfahren mit einer Produktion von Tripelsuperphosphat (TSP) aus Aschen von tierischen Abfällen sowie Klärschlamm beschränkt sich auf den Standort Bazenheid und die dortigen besonderen Verhältnisse bezüglich Input von phosphorreichen Abfällen in die Monoverbrennung. Zu erwähnen ist, dass Remondis, die nicht an der VTMA teilnahmen, die grosstechnische Umsetzung des Tetraphos®-Verfahrens mit Phosphorrückgewinnung mittels IT auf der Grosskläranlage von Hamburg bis in zwei Jahren vorsieht.

Für **klärschlambasierte Verfahren** zeigte sich, dass das ExtraPhos-Verfahren mit chemischer CO<sub>2</sub>-Extraktion zur Produktion eines Calciumtriphosphats noch nicht fertig entwickelt ist. Das EuPhoRe-Verfahren scheint von allen Verfahren am weitesten entwickelt, auch wenn noch nicht gesichert ist, dass es die für die Schweiz vorgesehenen Düngergrenzwerte einhält. Das Drehrohr-Verfahren käme aber realistisch betrachtet nur in Kombination mit einer KVA in Frage. Das Pyrophos-Verfahren von CTU ist im Labor-/Pilotmasstab ebenfalls weit entwickelt.

Als vielversprechende Option wurde eine **Kombination** der TSP-Produktion des ZAB-Verfahrens mit den Verfahren der Anbieter Técnicas Reunidas oder ECOPHOS erkannt. Schwermetallarme Phosphorsäure aus KSA könnte so im ZAB-Verfahren als ideale Synergie genutzt werden. So könnte die übergeordnete Strategie des Bundes zur Herstellung schwermetallarmer Dünger für unsere Böden gemäss Vorsorgeprinzip und Leitbild der Schweizer Abfallwirtschaft konsequent umgesetzt werden.

**P-Rückgewinnungsgrad:** Bedingt durch die jeweiligen Lösungsansätze weisen die vorgestellten Technologien unterschiedliche Rückgewinnungsgrade für den im Klärschlamm vorhandenen Phosphor aus. Bei den beiden Verfahren von Técnicas Reunidas und ECOPHOS, die auf der Rückgewinnung des Phosphors aus der Klärschlammasche basieren, liegt der Rückgewinnungsgrad bei > 90%. Das von CIMO vorgeschlagene Sepholix-Verfahren erreicht ca. 70%. Bei den vom ZAB, EuPhoRe und CTU vorgeschlagenen Verfahren könnte die ganze Phosphorfracht zurückgewonnen werden. Beim Extraphos-Verfahren von Budenheim wird der Phosphor aus dem Klärschlamm zurückgewonnen, bevor dieser getrocknet wird, und anschliessend als Energieträger im Zementwerk verwertet. Dieses Verfahren erzielt derzeit einen Rückgewinnungsgrad von lediglich 30%.

**Kosten:** Unterschiedlich detaillierte Angaben mit zum Teil variierenden Systemgrenzen ermöglichten keinen direkten Kostenvergleich der sieben Verfahren. Ein Experte wurde gebeten Kosten und Erlöse auf der Basis von Schweizer Rahmenbedingungen für Verfahren mit gleicher zugrundeliegender Infrastruktur zu ermitteln (normierte Kostenbetrachtung).

Von den klärschlammaschebasierten Verfahren wurden lediglich ECOPHOS und Phos4Life ausgewertet, da die anderen beiden Vertreter dieses Infrastrukturfades Sepholix (CIMO) und ZAB (Bazenhaid) nur von regionaler Bedeutung sind. Die Behandlungskosten der beiden ausgewerteten Verfahren liegen in der normierten Variante für ECOPHOS bei 290 CHF/t KSA und bei Phos4Life bei 370 CHF/t KSA. Ecophos rechnet mit Europäischen Rahmenbedingungen sogar mit Kosten von nahezu 0 CHF/t KSA. Berücksichtigt man, dass diese Daten erst noch durch die laufende (Phos4Life) bzw. ausstehende (ECOPHOS) Pilotierung bestätigt werden müssen und noch grössere Unsicherheiten im Hinblick auf das Verfahren, die Verwertbarkeit und den Absatz von Nebenprodukten sowie die damit verbundene Wirtschaftlichkeit bestehen, lässt sich noch nicht sagen, ob ein Kostenunterschied besteht und wie gross dieser ist.

Ein analoges Bild zeigt sich auch bei den drei klärschlammbehandelnden Verfahren EuPhoRe, Pyrophos und ExtraPhos. Es wird dabei von einem Kostenbereich zwischen 200 – 300 CHF pro Tonne trockenem Klärschlamm ausgegangen. Umgerechnet auf eine Tonne KSA werden die Kosten inkl. der thermischen Verwertung des Klärschlamm für diese Verfahren zwischen 400 und 600 CHF liegen (bei 50 % organischem Anteil im Klärschlamm). Sowohl bestehende technische Risiken als auch Absatzprobleme (Konformität mit mineralischem Recyclingdünger MinRec) der Phosphorprodukte erschweren derzeit eine genauere Angabe zu den Kosten.

Für die Umsetzung einer möglichst effektiven Phosphorrückgewinnungsstrategie in der Schweiz bedeutet dies, dass die Kostenbetrachtung allein keine Verfahrensentscheide ermöglicht.

Vergleicht man die Kosten der P-Rückgewinnung von max. rund 5 CHF pro Einwohner und Jahr mit den Gesamtkosten der kommunalen Abwasserentsorgung in der Schweiz, führt die P-Rückgewinnung zu zusätzlichen Kosten von 2-3%. Dies sind pro Kubikmeter Abwasser rund 5 Rappen. Pro Kilogramm Phosphor kostet die Rückgewinnung aus Klärschlammasche ca. 5 CHF. Dies ist im Vergleich zur längst etablierten P-Elimination auf den Schweizer Kläranlagen mit typischerweise 15 CHF pro kg P rund ein Drittel. Als weitere Vergleichsgrösse kann der Marktwert des primären Phosphorproduktes herangezogen werden. Dieser liegt für Phosphorsäure im Bereich von 2 – 3 CHF/kg P. Somit müssen pro kg Phosphor aus dem Abwasserpfad netto 2 – 3 CHF aufgewendet werden, damit die Produkte auf dem Markt abgesetzt werden können.

**Finanzierung:** Die Behandlung von Klärschlamm oder Klärschlammasche im Hinblick auf die Verwertung des darin enthaltenen Phosphors ist ein Teil der Klärschlamm Entsorgung. Da die Vorgabe zur stofflichen Verwertung des Phosphors auf dem Gewässerschutz- und dem Umweltschutzgesetz basiert, ergibt sich auch klar, dass die dadurch verursachten Kosten über die Abwasserrechnung und damit über Abwassergebühren zu finanzieren sind. Denn für die Kosten der Entsorgung haben grundsätzlich die Verursacher aufzukommen. Damit sind die vom Markt nicht gedeckten Kosten, die sich bei der Verwertung des zurückgewonnenen Phosphors ergeben, als Teil der Entsorgungskosten vom Verursacher zu tragen, sofern diese nicht von einer speziellen Finanzierungslösung übernommen werden.

**Phosphorprodukte:** Die Produktion von Phosphorsäure aus KSA mit dem Phos4Life oder Ecophos-Verfahren, die für die industrielle Verwendung in der Schweiz, den Export oder alternativ die Veredelung von Recyclingdünger genutzt wird, wird von der Projektgruppe und den Experten als zielführend und machbar eingeschätzt. Auch die Produktion von TSP mit dem ZAB-Verfahren für den Schweizer Markt oder über eine REACH-Registrierung für den Export (idealerweise mit sauberer Phosphorsäure aus KSA) wird ebenfalls als machbar eingestuft. Für andere Verfahren (EuPhoRe, Budenheim, CIMO und CTU) sind weitere Abklärungen notwendig, da der heutige Kenntnisstand keine zuverlässige Beurteilung der Produkte zulässt. Das Konzept MinRec, bei dem angestrebt wird, der schweizerischen Landwirtschaft schadstoffarme Dünger zur Verfügung zu stellen, kommt nur dann zum Tragen, wenn die qualitativen Anforderungen aus MinRec auch für primäre Dünger gelten und diese in der Praxis umgesetzt werden.

**Ökologische Bewertung:** Eine detaillierte Ökobilanz der ETH Zürich zeigt am Beispiel der effizienten P-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche mit dem Phos4Life-Verfahren, dass unter Schweizer Rahmenbedingungen das Recycling gegenüber der Primärproduktion von Phosphorsäure ökologisch deutlich vorteilhafter ist. Eine umfassende ökologische Bewertung aller beteiligten Verfahren war auf Grund der Datenlage nicht möglich. Auch wurde aus methodischen Gründen bewusst darauf verzichtet, düngerproduzierende Verfahren einer ökobilanziellen Betrachtung zu unterziehen.

**Fazit der VTMA-Projektgruppe:**

Für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad stehen vielversprechende Verfahren zur Verfügung. Das Recycling von Phosphor ist gegenüber dem Abbau ökologisch deutlich vorteilhafter, wie an einem Beispiel eindrücklich gezeigt wird. Die vorgestellten Lösungen weisen einen sehr unterschiedlichen Entwicklungsstand auf. Zusammen mit den in der Schweiz geltenden Rahmenbedingungen lässt dies im heutigen Zeitpunkt noch keinen Verfahrenentscheid zu. In dieser Situation einfach abzuwarten ist keine Lösung. Koordination ist notwendig, aber auch das reicht nicht. Die präsentierten technischen Lösungsansätze müssen von den Akteuren weiter konkretisiert werden. In Kenntnis eines besseren Wissensstandes können dann in rund zwei Jahren, unter Berücksichtigung der P-Vermarktungssituation, die richtigen Systementscheide getroffen werden.

**Aus Sicht der VTMA-Projektgruppe gibt es anhand der gewonnenen Erkenntnisse acht wesentliche Empfehlungen. Hinzu kommen vier Anträge an das BAFU.**

Hier die Empfehlungen:

- 1) Die in der VTMA präsentierten Lösungen sind weiter auszuarbeiten und in der Umsetzung voranzutreiben. Basierend auf den Rahmenbedingungen der schweizerischen Gesetzgebung und mit vergleichbaren Systemgrenzen sind fundierte Kostenkalkulationen vorzunehmen, Stoffflüsse zu definieren und Umweltauswirkungen zu ermitteln.
- 2) Diese Erkenntnisse sollen bis in zirka zwei Jahren vorliegen und in einer erneuten VTMA ausgewertet werden.
- 3) Den Kantonen wird empfohlen, mit den für die Abwasserreinigung und Klärschlamm Entsorgung verantwortlichen Akteuren zeitnah ihr Klärschlamm Entsorgungskonzept so anzupassen, dass damit die Entsorgungssicherheit für Klärschlamm unter den neuen Rahmenbedingungen der Phosphorrückgewinnung inklusive der Nutzung der Mineralik ab Anfang 2026 gewährleistet werden kann.
- 4) Den Akteuren, die auf den gleichen Infrastrukturfad zur Entsorgung des Klärschlammes setzen, wird eine enge Zusammenarbeit für die Phosphorrückgewinnung empfohlen. Dies bedeutet konkret in einem ersten Schritt, im Rahmen von Pilotversuchen oder Vorprojekten gemeinsam in die Weiterentwicklung der favorisierten Lösungsansätze zu investieren.
- 5) Zur Nutzung möglicher Synergien wird im Hinblick auf die Vermarktung der Produkte empfohlen, Zwischenprodukte bzw. Produkte der einzelnen Lösungsansätze zu kombinieren.
- 6) Die Inhaber kommunaler Abwasseranlagen werden eingeladen, im Sinne von Art. 60 a Ziffer 3 GschG die entsprechenden Kosten in der Finanzplanung der kommenden Jahre zu berücksichtigen, damit die Finanzierung der Phosphorrückgewinnung im Sinne der VVEA umgesetzt werden kann.

- 7) Von zentraler Bedeutung für die Weiterverfolgung von Lösungsansätzen zur Phosphorrückgewinnung ist die Frage, ob und inwiefern die Entsorgung des Klärschlammes aus öffentlichen Abwasseranlagen einschliesslich Rückgewinnung des Phosphors innerhalb der Schweiz zu erfolgen hat. Diese Frage soll einerseits im Hinblick auf die Entsorgungssicherheit im Sinne von Art. 30 Abs. 3 USG, andererseits im Hinblick auf die Versorgungssicherheit mit lebenswichtigen Gütern im Sinne von Art. 4 Abs. 2 LVG geklärt werden.  
Ebenfalls ist zu prüfen, unter welchen Bedingungen die Entsorgung des Klärschlammes inklusive P-Rückgewinnung aus industriellem Abwasser im Ausland erfolgen kann, da diese gemäss VeVA nicht unter den Art. 17 fallen.
- 8) Wenn es im Interesse des Gesetzgebers liegt, die Phosphorressourcen aus dem Klärschlamm zu nutzen, um der schweizerischen Landwirtschaft schadstoffarme Dünger zur Verfügung zu stellen (Bodenschutz und Versorgungssicherheit in der Schweiz), muss dafür gesorgt werden, dass die qualitativen Anforderungen aus MinRec auch für primäre Dünger gelten und diese in der Praxis umgesetzt werden.

Die Anträge an das Bundesamt für Umwelt (BAFU):

- I. Das BAFU wird eingeladen, in enger Absprache mit dem Bundesamt für wirtschaftliche Landesversorgung und dem Bundesamt für Landwirtschaft, sich zeitnah zur Frage zu äussern, ob und inwiefern die Entsorgung des Klärschlammes aus öffentlichen Abwasseranlagen einschliesslich Rückgewinnung des Phosphors innerhalb der Schweiz zu erfolgen hat. Ebenfalls ist zu prüfen, unter welchen Bedingungen die Entsorgung des Klärschlammes inklusive P-Rückgewinnung aus industriellem Abwasser im Ausland erfolgen kann.
- II. Das BAFU wird eingeladen, im Sinne der Bestimmungen der VVEA eine Aussage darüber zu machen, wann eine Behandlung und Verwertung des Phosphors aus dem Abwasserpfad dem Stand der Technik (insbesondere bezüglich P-Rückgewinnungsgrad) entspricht.
- III. Das BAFU wird eingeladen zu klären, unter welchen Bedingungen für die Errichtung von Anlagen zur Rückgewinnung des Phosphors aus dem Klärschlamm a) Risikogarantien im Sinne von Art. 64a GSchG gewährt und b) finanziell unterstützt werden könnten.
- IV. Falls es sich erweisen sollte, dass für eine bestehende Infrastruktur zur Klärschlamm Entsorgung keine geeigneten Verfahren zur P-Rückgewinnung zur Verfügung stehen und die Amortisation der getätigten Investitionen nachweislich über das Jahr 2025 hinausreicht, müsste in Erwägung gezogen werden, dass für diese Entsorgungseinheiten über das Datum vom 1.1.2026 hinaus eine Fristverlängerung festgelegt wird.

#### **Weiteres Vorgehen:**

Um die, mit dem Projekt VTMA entstandenen Kontakte weiter zu pflegen und in einem späteren Zeitpunkt erneut eine Verfahrenstechnische Marktanalyse (VTMA) durchführen zu können, haben die Projektpartner der VTMA, also die Klärschlammhalter und die relevanten Verbände, am 30. April 2018 beschlossen, die bestehende Organisation als «Plattform VTMA» weiter zu führen. Wenn im August 2018 der Vorgehensvorschlag für die weiteren Tätigkeiten vorliegt, können sich unter der Voraussetzung der finanziellen Beteiligung weitere Akteure (Klärschlammhalter) als Projektpartner der Trägerschaft anschliessen.



## Résumé

L'approche dite de l'**extraction urbaine** a démontré sans ambiguïté au cours des dernières années qu'une profusion de ressources de grande valeur se cache au cœur de ce que l'on nomme communément les «déchets». Il est apparu dès lors que la Suisse recèle de grandes quantités de ces ressources. Les raisons en sont d'une part l'augmentation ces dernières décennies de la consommation de biens riches en matières premières, et d'autre part la construction d'infrastructures de retraitement.

Ainsi sommeille notamment dans les eaux usées ou dans les déchets animaux de notre pays un fort potentiel en **phosphore** – ressource irremplaçable et essentielle à l'être humain – lequel demeure inexploité jusqu'à présent. Ce sont en effet 6000 tonnes de cet élément qui proviennent des eaux usées et qui finissent chaque année dans les boues d'épuration (BE). Cela représente la moitié de la quantité totale de phosphore importée (engrais minéraux, denrées alimentaires et aliments pour animaux), et déjà plus que ce qui est introduit annuellement sous forme d'engrais minéraux (4200 t/an). Parce que les voies d'élimination des déchets ne sont pas pensées correctement, le phosphore est aujourd'hui définitivement perdu: la précieuse ressource est incorporée au ciment dans la construction ou entreposée en décharge comme résidu de la valorisation thermique.

En raison des polluants nocifs pour l'environnement et la santé contenus dans les boues d'épuration, la Confédération a interdit dès 2006 la **valorisation** directe de celles-ci dans l'agriculture sous forme d'engrais. Suite à cette interdiction, il a fallu réaliser dans différentes régions des investissements appropriés pour garantir la sécurité d'élimination des déchets. En outre, l'ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED) est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2016. Celle-ci exige la récupération de phosphore à partir des eaux usées communales, des boues des stations centrales d'épuration et des cendres provenant du retraitement thermique de ces boues; elle exige également sa récupération à partir des farines animales et des poudres d'os, pour autant que ces déchets ne puissent être utilisés à d'autres fins. Mais en comparaison avec l'Allemagne, par exemple, peu de recherches ont été menées en Suisse au sujet de cette récupération. Si, pendant la courte période transitoire qui s'étend jusqu'en 2026, le phosphore doit être récupéré des eaux usées dans les proportions requises et réutilisé, les stations d'épuration qui éliminent conjointement les boues doivent donc s'orienter vers l'infrastructure existante lorsqu'elles choisissent le procédé à employer. Les **voies infrastructurelles**, que sont les usines d'incinération des boues d'épuration (IBS) ainsi que le séchage thermique et la valorisation en cimenteries font partie de cette analyse. Comme la co-incinération en UVTD ne sera plus possible, elle n'est pas explorée plus avant, d'autant plus que la valorisation de la fraction minérale ne pourra pas être assurée par ce biais.

Une plateforme se proposant de favoriser le dialogue dans les cercles concernés (propriétaires de BE et associations) a été créée à l'automne 2017 sur la base d'une **analyse de marché pour les techniques et procédés (AMTP)**. L'objectif de cette AMTP est de permettre à toutes les parties concernées d'acquérir des connaissances supplémentaires pour pouvoir conseiller en conséquence les décideurs de leurs organisations respectives. La création d'une plateforme destinée à favoriser l'échange entre les exploitants d'installations et à mettre en relation les acteurs du secteur est un des aspects clés de cette AMTP. Elle se propose en outre d'identifier les procédés de récupération du phosphore à partir des eaux usées qui sont efficaces et qui répondent aux conditions cadres prévalant en Suisse. Les participants ont pu se pencher sur les approches existantes et rencontrer les différents prestataires à l'occasion d'une réunion. L'AMTP et le processus de participation associé ont été coordonnés par HOLINGER SA. Des représentants de l'OFEV et de l'OFAG ont également participé à cette réunion.

Des **fournisseurs de technologies** prometteuses ont été suggérés par les membres du comité de pilotage en fonction de critères déterminés, puis invités à la réunion. Les sept prestataires suivants ont participé à l'AMTP: Budenheim (ExtraPhos), CIMO (Sepholix), Ecophos, EuPhoRe, Técnicas Reunidas (Phos4Life), ZAB (procédé ZAB) et CTU (Pyrophos). Au cours de la réunion, tous ont rempli un questionnaire, présenté leur procédé et répondu aux questions posées. Puis, des experts ont évalué

les informations ainsi recueillies. En raison d'un manque d'intérêt, ICL Fertilizer (procédés Recophos et Tenova-Bateman) ainsi que Remondis (Tetraphos®) avaient renoncé à participer.

Les membres du groupe de projet, rassemblés dans un World-Café, ont discuté certains aspects des différents procédés, et les étapes ultérieures. Les connaissances en résultant sont résumées dans ce rapport de clôture. L'évaluation a été menée sur la base de critères définis conjointement par les participants à l'AMTP.

### **Résultats importants de l'AMTP:**

Chaque voie infrastructurelle est concernée par le développement de procédés dont les avancées sont très variables. Les données sont encore insuffisantes pour établir une comparaison.

**Pour ce qui est des procédés** se basant sur **les cendres de boues d'épuration (CBE)**, Phos4Life et Ecophos représentent deux méthodes prometteuses pour produire de l'acide phosphorique, un composant important de la fabrication d'engrais. Ecophos terminera en 2019 la construction d'une ligne de production basée sur les CBE. Elle prendra place sur son site de fabrication d'alimentation animale à Dünkirchen (F), près de Calais. L'acide phosphorique doit y être purifié au moyen d'un échangeur d'ions. Aucun projet utilisant des CBE de provenance suisse n'a encore été réalisé. Quant au projet pilote de Phos4Life, qui utilise la chimie humide et l'extraction par solvant, il est en voie d'achèvement. Le procédé Sepholix ne fait pas encore l'objet d'un projet pilote et n'est d'une importance que très régionale. Le procédé ZAB et sa production de superphosphate triple (TSP) à partir de cendres de déchets animaux et de boues d'épuration se limite au site de Bazenheid et aux conditions particulières qui entourent l'apport de déchets riches en phosphore dans la monocombustion. Par ailleurs, il convient de noter que Remondis, qui n'a pas participé à l'AMTP, envisage de mettre en œuvre à grande échelle d'ici deux ans le procédé Tetraphos® dans une importante station d'épuration située à Hambourg. Ce procédé offre une récupération du phosphore par échangeur d'ions.

Pour les **procédés se basant sur les boues d'épuration**, il a été montré qu'ExtraPhos, qui utilise une extraction chimique de CO<sub>2</sub> pour la production de triphosphate de calcium, n'est pas encore complètement abouti. Le procédé EuPhoRe semble être le plus avancé de tous, bien qu'il ne réponde toujours pas aux valeurs limites prévues en Suisse pour les engrais. Quant au procédé du four rotatif, il ne doit être considéré qu'en combinaison avec une UIOM. À cet égard, le procédé Pyrophos de CTU est au stade de projet pilote / laboratoire, et son développement est également bien avancé.

Une option très prometteuse consiste en la **combinaison** du procédé ZAB de production de TSP avec celui des fournisseurs Técnicas Reunidas ou Ecophos. L'acide phosphorique pauvre en métaux lourds issu de CBE pourrait être ainsi utilisé comme une synergie idéale dans le procédé ZAB. Cela permettrait de mettre en œuvre avec cohérence la stratégie de la Confédération pour une fabrication d'engrais pauvres en métaux lourds pour nos sols, conformément au principe de précaution et aux directives de la gestion suisse des déchets.

**Taux de récupération du phosphore:** par leurs différentes approches, les technologies présentées montrent des taux distincts de récupération du phosphore présent dans les boues d'épuration. En ce qui concerne les procédés Técnicas Reunidas et Ecophos qui se basent sur la récupération du phosphore à partir des cendres de boues d'épuration, le taux de récupération est supérieur à 90%. Le procédé Sepholix, proposé par CIMO, atteint environ 70%. Les procédés proposés par ZAB, EuPhoRe et CTU permettent de récupérer la totalité de la charge en phosphore. Le procédé ExtraPhos de Bundenheim permet de récupérer le phosphore issu des boues d'épuration avant que celles-ci ne soient séchées puis utilisées finalement comme combustible dans des cimenteries. Ce procédé atteint actuellement un taux de récupération de seulement 30%.

**Coûts:** les données, différemment détaillées, ayant pour partie d'entre elles des limites de système variables, n'ont pas permis de comparaison directe des coûts entre les sept procédés. Il a été demandé à un expert de calculer les coûts et les recettes sur la base des conditions cadres prévalant en Suisse pour les procédés ayant la même infrastructure sous-jacente (analyse de coûts standardisée).

Parmi les procédés se basant sur les cendres de boues d'épuration, seuls ceux d'Ecophos et de Phos4Life ont été évalués, les deux autres représentants de cette voie infrastructurelle, Sepholix (CIMO) et ZAB (Bazenheid), n'ayant qu'une importance régionale. Les coûts de traitement des deux procédés qui ont fait l'objet d'une analyse standardisée se situent à 290 CHF/t de CBE pour Ecophos et à 370 CHF/t de CBE pour Phos4Life. Grâce aux conditions cadres européennes, Ecophos compte même sur des coûts quasiment nuls par tonne de CBE. Tenant compte du fait que ces données doivent encore être confirmées pour le projet en cours (Phos4Life) ou celui en phase pilote (Ecophos) et que planent encore de grandes incertitudes en ce qui concerne le procédé lui-même, le potentiel de valorisation, la vente de sous-produits ainsi que les aspects économiques associés, il n'est pas possible d'établir si leurs coûts respectifs diffèrent, ni à combien la différence se monte.

Une situation analogue caractérise les trois procédés de traitement des boues d'épuration EuPhoRe, Pyrophos et ExtraPhos. On suppose une fourchette de coûts comprise entre 200 et 300 CHF par tonne de boue d'épuration sèche. Converti pour une tonne de CBE, le coût de ces procédés (y compris l'utilisation thermique des boues d'épuration) se situera entre 400 et 600 CHF (avec une teneur en matières organiques de 50% dans les boues d'épuration). Les risques techniques existants et les problèmes liés à la vente des produits phosphorés (conformité avec les engrais minéraux recyclés Min-Rec) rendent également difficile une évaluation plus précise des coûts.

Cela signifie que l'analyse des coûts à elle seule ne permet de prendre aucune décision opérationnelle quant à la mise en œuvre en Suisse d'une stratégie de récupération du phosphore qui soit la plus efficace possible.

Si l'on compare le coût de récupération du phosphore d'environ 5 CHF max. par habitant et par an avec le coût total du traitement des eaux usées communales en Suisse, la récupération de phosphore entraîne 2 à 3% de frais supplémentaires. Cela représente environ 5 centimes par mètre cube d'eaux usées. La récupération de phosphore à partir de cendres de boues d'épuration coûte environ 5 CHF par kilo de phosphore. Le coût est divisé par trois en comparaison de l'élimination de phosphore établie de longue date dans les stations d'épuration suisses, laquelle se monte classiquement à 15 CHF par kilo de phosphore. La valeur marchande du produit phosphore primaire peut être utilisée en tant que valeur comparative supplémentaire. Pour l'acide phosphorique, elle est de l'ordre de 2 à 3 CHF/kg de phosphore. Par kilo de phosphore issu des eaux usées, c'est donc une somme nette de 2 à 3 CHF qui doit être engagée pour que le produit puisse être vendu sur le marché.

**Financement:** le traitement des boues d'épuration ou de leurs cendres, eu égard à la valorisation du phosphore qu'elles contiennent, fait partie de leur élimination. Étant donné que les prescriptions concernant la valorisation du phosphore se fondent sur la protection des eaux et de l'environnement, il va de soi que les coûts qu'elle engendre doivent être financés par les taxes sur les eaux usées. En effet, les coûts de l'élimination doivent être à la charge de ceux qui en sont la cause. Ainsi, les coûts qui ne sont pas couverts par le marché et qui proviennent du recyclage du phosphore incombent à celui qui les occasionne, à moins que ces coûts ne soient couverts par une solution de financement spécifique.

**Produits du phosphore:** la production d'acide phosphorique à partir de CBE par les procédés Phos4Life et Ecophos, lesquels sont utilisés en Suisse pour l'industrie, pour l'exportation ou alternativement pour le raffinage d'engrais de recyclage, est considérée par le groupe de projet et par les experts comme opportune et réalisable. En outre, la production de TSP par le procédé ZAB pour le marché suisse ou pour l'exportation par le biais d'un enregistrement REACH (idéalement avec de l'acide phosphorique purifié issu de CBE) est également considérée comme réalisable. Pour ce qui est des autres procédés (EuPhoRe, ExtraPhos, Sepholix et Pyrophos), des éclaircissements supplémentaires sont nécessaires. Le niveau de connaissances actuel ne permet pas d'évaluer ces produits avec fiabilité. Le concept MinRec, qui vise à fournir à l'agriculture suisse des engrais pauvres en polluants, ne pourra se réaliser que si les exigences qualitatives de MinRec s'appliquent également aux engrais primaires et qu'elles soient appliquées réellement.

**Évaluation écologique:** un bilan écologique détaillé réalisé par l'EPF de Zurich démontre, en se servant de l'exemple de la récupération de phosphore issu des cendres de boues d'épuration par le procédé Phos4Life, que sous les conditions cadres prévalant en Suisse, le recyclage est écologiquement bien plus avantageux que la production primaire d'acide phosphorique. Une évaluation écologique complète de tous les procédés considérés n'a pas été possible en raison de l'insuffisance des données disponibles. En outre, pour des raisons méthodologiques, les procédés de production d'engrais n'ont délibérément pas fait l'objet d'un bilan écologique.

### **Conclusion du groupe de projet de l'AMTP:**

De nombreux procédés prometteurs sont disponibles pour la récupération du phosphore à partir des eaux usées. Le recyclage du phosphore est écologiquement beaucoup plus avantageux par rapport à la dégradation, comme l'a démontré de façon saisissante l'exemple choisi. Quant aux solutions présentées, elles témoignent d'avancées très variables. En considérant les conditions cadres qui prévalent en Suisse, il n'est dès lors pas possible de prendre une décision opérationnelle à l'heure actuelle. Dans pareille situation, attendre n'est pas une solution. Par ailleurs, une coordination s'avère nécessaire, mais n'est pas suffisante. Les différents acteurs doivent concrétiser plus avant les approches et les solutions techniques présentées. Des connaissances plus approfondies et une prise en compte de l'environnement commercial du phosphore permettront d'opter pour une solution satisfaisante dans deux ans environ.

**Du point de vue du groupe de projet de l'AMTP, il est possible de formuler huit recommandations essentielles en se basant sur les résultats obtenus. Il en ressort également quatre requêtes adressées à l'OFEV.**

Voici les recommandations:

- 1) Le développement des solutions présentées dans l'AMTP doit être poursuivi et poussé vers une mise en œuvre. Sur la base des conditions cadres imposées par la législation suisse et avec des limites de système comparables, il s'agit de prévoir des calculs de coûts bien étayés, de définir les flux de matériaux et d'identifier les impacts environnementaux.
- 2) Ces connaissances seront acquises d'ici environ deux ans et feront l'objet d'une nouvelle AMTP.
- 3) Il est conseillé aux cantons d'adapter rapidement leur concept d'épuration des eaux et d'élimination des boues conjointement avec les partenaires compétents, de sorte que la sécurité de cette élimination soit garantie dès 2026 sous les nouvelles conditions qui encadreront la récupération du phosphore et l'utilisation des minéraux.
- 4) Nous recommandons aux acteurs qui s'appuient sur la même voie infrastructurelle pour l'élimination des boues d'épuration de coopérer étroitement en ce qui concerne la récupération du phosphore. Cela signifie dans un premier temps et plus concrètement de réaliser des investissements communs pour des essais pilotes vérifiant les approches privilégiées.
- 5) Afin d'exploiter de possibles synergies, il est recommandé, en ce qui concerne la commercialisation des produits, de combiner les éléments ou sous-éléments issus des différentes solutions.
- 6) Les propriétaires des stations d'épuration communales sont invités à tenir compte des coûts afférents à la récupération du phosphore lors de la planification financière des années à venir, au sens où l'entend l'art. 60a, al. 3 LEaux, afin que le financement de cette récupération puisse être mis en œuvre au sens de l'OLED.
- 7) Pour poursuivre la recherche de solutions permettant la récupération du phosphore, il est d'une importance capitale de déterminer si et dans quelle mesure l'élimination des boues d'épuration

issues des installations publiques et la récupération du phosphore afférente doivent avoir lieu sur le territoire national. Cette question doit être éclaircie d'une part du point de vue de la sûreté de l'élimination au sens de l'art. 30, al. 3 LPE, et, d'autre part, du point de vue de la sécurité d'approvisionnement en biens vitaux au sens de l'art. 4, al. 2 LAP.

Il convient également d'examiner les conditions sous lesquelles l'élimination des boues d'épuration et la récupération afférente de phosphore provenant d'eaux usées industrielles peuvent se dérouler à l'étranger, ces activités ne relevant pas de l'art. 17, selon OMoD.

- 8) S'il est dans l'intérêt du législateur d'utiliser les ressources en phosphore des boues d'épuration pour fournir à l'agriculture suisse des engrais à faible teneur en polluants (protection des sols et sécurité d'approvisionnement en Suisse), il faut s'assurer que les exigences qualitatives requises par MinRec s'appliquent également aux engrais primaires, et qu'elles soient mises en pratique.

Requêtes adressées à l'Office fédéral de l'environnement (OFEV):

- I. L'OFEV est invité, en étroite consultation avec l'Office fédéral pour l'approvisionnement économique du pays et l'Office fédéral de l'agriculture, à examiner rapidement si et dans quelle mesure l'élimination des boues d'épuration issues des installations publiques ainsi que la récupération du phosphore afférente doivent avoir lieu sur le territoire national. Il convient également d'examiner les conditions sous lesquelles l'élimination des boues d'épuration et la récupération de phosphore provenant d'eaux usées industrielles peuvent se dérouler à l'étranger.
- II. L'OFEV est invité à faire une déclaration, conformément aux dispositions de l'OLED, au moment où la technique du traitement et de la valorisation du phosphore issu des eaux usées aura atteint un développement suffisant (en particulier pour ce qui concerne le taux de récupération de phosphore).
- III. L'OFEV est invité à clarifier les conditions sous lesquelles a) des garanties contre les risques au sens de l'art. 64a LEaux et b) des soutiens financiers pourraient être accordés pour la construction d'installations destinées à la récupération du phosphore à partir de boues d'épuration.
- IV. S'il s'avère qu'il n'existe pas de procédé approprié de récupération du phosphore pour une infrastructure d'élimination des boues d'épuration existante et que l'amortissement des investissements réalisés s'étend manifestement au-delà de 2025, il convient d'envisager qu'un délai supplémentaire soit imparti à ces unités d'élimination au-delà du 1<sup>er</sup> janvier 2026.

#### **Étapes suivantes:**

Afin de maintenir les contacts nés de l'analyse de marché pour les techniques et procédés (AMTP) et d'être en mesure d'en réaliser une nouvelle à une date ultérieure, les partenaires du projet, propriétaires de boues d'épuration ou associations concernées, ont décidé le 30 avril 2018 de faire perdurer l'organisation existante sous le nom de «Plateforme AMTP». Si une extension de ses activités était proposée en août 2018, de nouveaux partenaires (propriétaires de boues d'épuration) pourraient se joindre au projet à la condition d'y participer financièrement.



## 2 AUSGANGSLAGE

Der Klärschlamm, der jährlich in der Schweiz anfällt, enthält ca. 6'000 t Phosphor (P). Dies ist die Hälfte der total importierten P-Menge (Mineraldünger, Nahrungsmittel und Futtermittel), oder heute schon mehr, als jedes Jahr in Form von Mineraldünger (4200 t/a) importiert wird. Dieser Wertstoff wurde über Jahre direkt in der Landwirtschaft verwertet. Aufgrund der im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe hat der Bund basierend auf einer Risikoabschätzung aus Vorsorgegründen ein Verbot für das Ausbringen von Klärschlamm in der Landwirtschaft ab 2006 erlassen. Zur Gewährleistung der Entsorgungssicherheit mussten dazu in verschiedenen Regionen entsprechende Investitionen getätigt werden, die teilweise bereits einmal erneuert worden sind. Die heutige Situation der Klärschlammentsorgung zeigt die folgende Grafik. Der Hauptteil der Klärschlammverwertung (64%) erfolgt somit in Schlammverbrennungsanlagen (SVA), aus denen anschliessend eine phosphorreiche Klärschlammasche resultiert. Mit 22% nimmt die thermische Trocknung mit anschliessender Mitverarbeitung im Zementwerk (TuZ) den zweitgrössten Anteil ein. Den kleinsten Teil mit 14% stellt die Mitverbrennung in Kehrrechtverwertungsanlagen (KVA) dar.

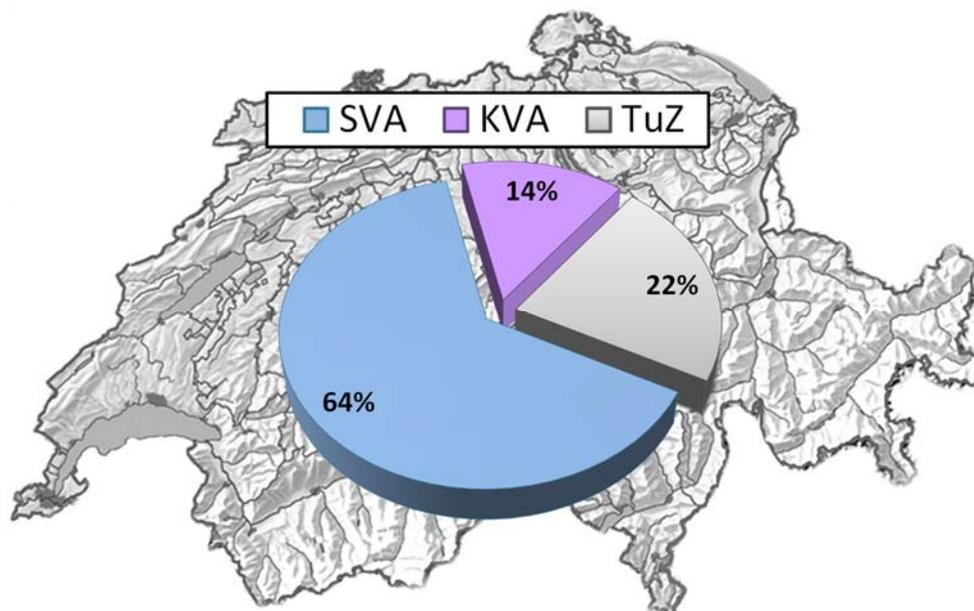
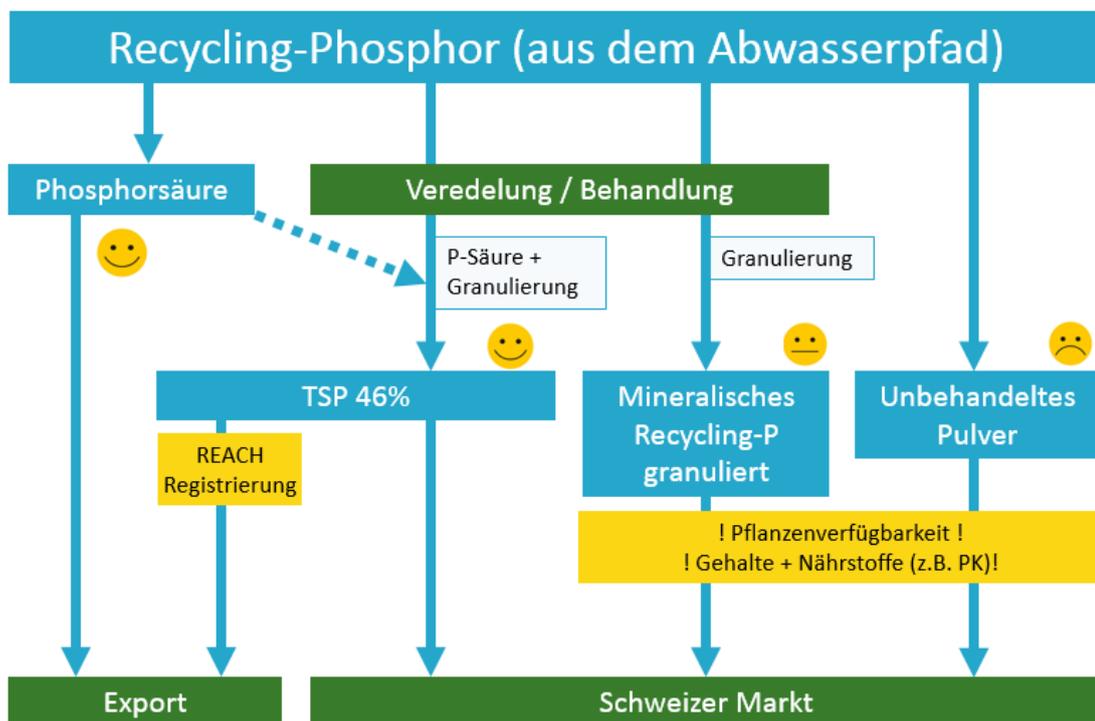


Abbildung 1: Klärschlammentsorgung in der Schweiz im Jahr 2016 (Datenquelle: BAFU 2017)

Mit dem Inkrafttreten der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) am 1.1.2016 wird die Phosphorrückgewinnung phosphorreicher Abfälle (u.a. Klärschlamm, Tier- und Knochenmehl) mit einer Übergangsfrist von 10 Jahren vorgeschrieben. Ab dann wird die Mitverbrennung des Klärschlammes in KVA nicht mehr möglich sein und alternative Verwertungswege via Monoverbrennung bzw. Klärschlammbehandlung mit anschliessender Phosphorrückgewinnung werden diese Klärschlammfracht aufnehmen müssen. Geht man von einer Gleichverteilung dieses Stoffstroms auf die beiden alternativen Wege aus, so wird die Monoverbrennung insgesamt einen Anteil von ca. 70% des schweizweiten Klärschlammvolumens aufnehmen und Phosphor in Form von Klärschlammasche zur Rückgewinnung bereitstellen. Ein noch höherer Anteil der SVA ist nicht unwahrscheinlich, wenn weitere zentrale Monoverbrennungsanlagen in der Schweiz gebaut werden. Damit die Zielsetzung des Bundes im Hinblick auf eine nachhaltige, schadstoffarme (insbesondere Kadmium und Uran) Düngerversorgung der Schweizer Landwirtschaft aus eigenen Ressourcen erreicht werden kann, muss die strategische Ausrichtung der Phosphorrückgewinnung diesen Umstand berücksichtigen und fördernde Massnahmen die existierenden Mengenverhältnisse der Schweizer Klärschlammverwertung berücksichtigen. In der Schweiz wurde zur Thematik im Vergleich z.B. zu Deutschland bisher wenig Forschungsarbeit bezüglich möglicher P-Rückgewinnungsverfahren geleistet.

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

Wenn in den wenigen verbleibenden Jahren der Übergangsfrist Phosphor zu relevanten Anteilen aus dem Abwasser zurückgewonnen und einer stofflichen Nutzung zugeführt werden soll, dann bleibt dafür einerseits nur die Wahl, dass die anzuwendenden Verfahren die zuvor erläuterte bestehende Infrastruktur zur Klärschlammbehandlung nutzen und die Phosphorprodukte andererseits marktconforme Produkte substituieren. Für das Phosphorrecycling bedeutet dies konkret, dass in der Schweiz hauptsächlich klärschlammmaschebehandelnde Verfahren (70% SVA) angewendet werden müssen. Die restlichen 30% des Klärschlammaufkommens werden mit Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm zu behandeln sein. Auf der Produktebene bedeutet dies, dass vorhandene Märkte durch eine 1:1 Substitution der etablierten Produkte genutzt werden müssen. Die Möglichkeiten der Produktintegration zeigt die nachfolgende Abbildung 2.



**Abbildung 2: Integrationsmöglichkeiten von sekundären Phosphorprodukten in bestehende Absatzwege (Quelle: fenaco/Landor 2017)**

Dabei wird aus Sicht der Schweizer Düngemittelindustrie klar, dass es zwei erfolgsversprechende Absatzwege für Phosphorprodukte gibt. Dies ist einerseits die Substitution von Phosphorsäure als zentralem Baustein der Düngemittelindustrie und andererseits Triplesuperphosphat (TSP) als Reaktionsprodukt der Phosphorsäure mit anderen phosphorhaltigen anorganischen Rohstoffen als Teil der Einzel- und Mehrkomponentendünger (NPK-Dünger). Da in der Schweiz keine Einzel- oder Mehrkomponentendünger mehr hergestellt werden, müssen diese Produkte, sofern kein direkter Absatz im Lande möglich ist, ins Ausland exportiert und dort weiterverarbeitet werden.

Allen anderen Produktformen wird ein geringerer, teils nur regional existenter Marktanteil zukommen. Die Neuschaffung eines Marktes, für heute nicht etablierte Produkte, wird als sehr unsicher und unwahrscheinlich angesehen. Für das geplante P-Recycling ist die Phosphorsäureproduktion aus Klärschlammmasche bzw. deren weitere Umsetzung zu TSP mit geeigneten Phosphorprodukten aus dem Abwasserpfad eine grosse Chance, die gesetzten Ziele erfolgreich zu erreichen.

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

Wenn der technisch machbare Rückgewinnungsgrad einzelner Verfahren nicht den zukünftigen Vorgaben des BAFU entspricht, müssten für diese Entsorgungspfade über das Datum vom 1.1.2026 hinaus Übergangsfristen festgelegt werden, die es erlauben, die Entsorgungsinfrastruktur für den Klärschlamm entsprechend anzupassen.

Die Fragestellung nach passenden technischen Verfahren, mit denen bei der heute vorgegebenen Infrastruktur die Ziele am besten erreichen werden können, stellt sich für die Inhaber von Klärschlamm bzw. Klärschlammaschen in der ganzen Schweiz. Diesem Umstand soll in der nachfolgend genauer vorgestellten verfahrenstechnischen Marktanalyse (VTMA) Rechnung getragen werden.

### 3 VERFAHRENSTECHNISCHE MARKTANALYSE (VTMA)

#### 3.1 Zielsetzung

Die verfahrenstechnische Marktanalyse (VTMA) soll aufzeigen, welche Verfahren unter den schweizerischen Randbedingungen für die jeweils vorhandene Infrastruktur zur Abwasser- bzw. Klärschlammbehandlung für die P-Rückgewinnung aus dem Abwasserpfad geeignet sind. Dabei soll beantwortet werden, mit welchem Verfahren die P-Rückgewinnung am vorteilhaftesten beim Entsorgungspfad «Monoverbrennung» (Schlammverbrennungsanlagen, SVA) und beim Pfad «Trocknung und Zementwerk» (TuZ) ausgestaltet werden soll. Wenn möglich, soll auch eine Aussage gemacht werden, wie die Klärschlammbehandlung sinnvollerweise auszugestalten ist, wenn diese - zum Beispiel als Ablösung der Mitverbrennung in einer KVA - vollumfänglich erneuert werden muss.

Im Herbst 2017 entschied sich die Projektgruppe der VTMA, dass sich die beteiligten Projektpartner / Anlagenbetreiber an den Grundsätzen des Abfall-Leitbildes von 1986 orientieren wollen. Daraus wurde abgeleitet, dass aus der Abwasser- und Schlammbehandlung wiederverwertbare, marktfähige Produkte entstehen sollen und der Anteil des zu deponierenden Materials zu minimieren ist. Inhaltlich bedeutet dies, dass ein möglichst hoher Anteil des P wieder in den Kreislauf zurückgeführt und die mineralischen Rückstände so aufbereitet werden sollen, damit diese einer Verwertung zugeführt werden können.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt sollen den beteiligten Projektpartnern und weiteren Interessierten als konkrete Entscheidungshilfe dienen.

**Alle Ziele der VTMA im Überblick:** Die von den beteiligten Inhabern von Klärschlamm bzw. Klärschlammaschen und den Verbänden zu Beginn gemeinsam festgelegten Ziele sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

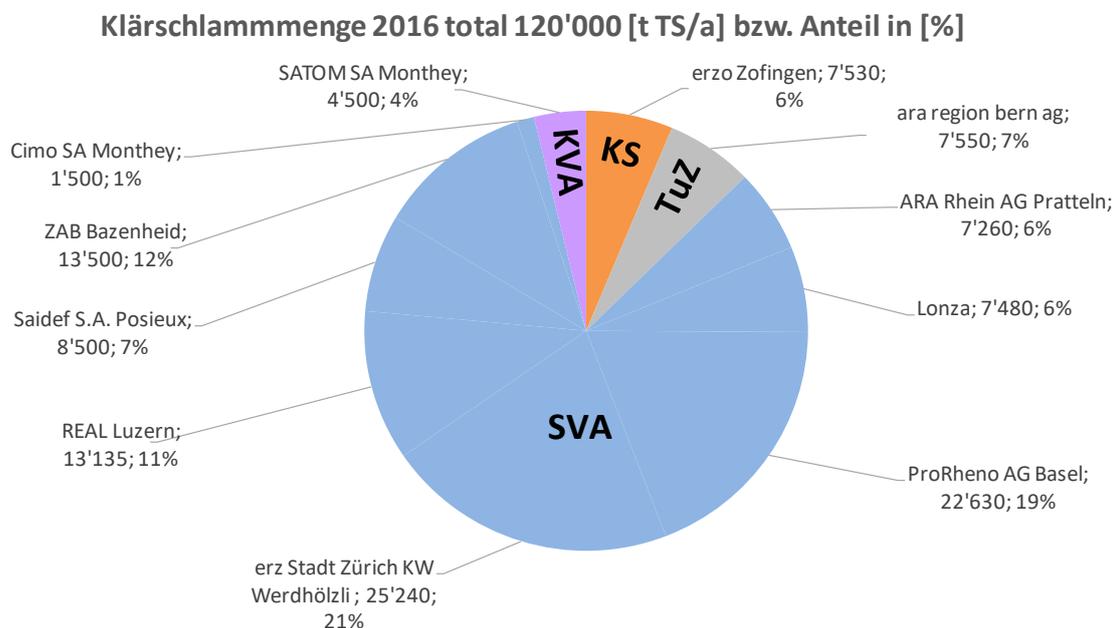
- 1 Mit der VTMA soll geklärt werden, mit welchem **Verfahren** der **P am besten aus dem Abwasserpfad** zurückgewonnen werden kann, unter Berücksichtigung der gegebenen Infrastruktur und den Zielen bzw. Auswahl- und Bewertungskriterien.
- 2 Die Beteiligten sollen die Möglichkeit erhalten, im Rahmen von **Hearings** sich mit den einzelnen Lösungsansätzen für das P-Recycling aus dem Abwasserpfad auseinander zu setzen. Durch den **Beizug von Fachexperten** bei den Hearings soll die **Vernetzung** und der **Informationsaustausch** sichergestellt werden.
- 3 Die beteiligten **Anlagebetreiber und Verbände** sollen für ihre **Entscheidungsfindung** zu zusätzlichen Erkenntnissen kommen, damit die Anlagenbetreiber sich für ein Verfahren entscheiden, respektive die Verbände ihre Mitglieder entsprechend beraten können. Das **Resultat der VTMA** wird zuhänden der zuständigen Entscheidungsträger **dokumentiert**.
- 4 Die VTMA soll die Möglichkeit bieten, dass sich beteiligte Trägerschaften mit analogen Infrastrukturlösungen über zukünftige **strategische Ausrichtungen/Kooperationen** austauschen können.
- 5 Die VTMA soll aufzeigen, wie mit einem innovativen Ansatz bei der Abwasserbehandlung neben dem gereinigten Abwasser ausschliesslich verwertbare Produkte wie Biogas, Phosphor- und Metallkonzentrate sowie rezyklierbare mineralische Stoffe entstehen (**Produkte statt Deponiegüter**).

### 3.2 Vorgehen

Für die Erarbeitung einer Entscheidungshilfe mit Empfehlungen zur Auswahl von künftigen Verfahren für die Phosphorrückgewinnung bzw. zum weiteren Vorgehen, wurde im Herbst 2017 auf Initiative des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kanton Zürichs mit der verfahrenstechnischen Marktanalyse (VTMA) eine Plattform für den Dialog interessierter Kreise geschaffen.

Der Partizipationsprozess mit den Anlagenbetreibern und Verbänden spielte über die ganze Phase des Projekts eine zentrale Rolle. Er diente der gemeinsamen Lösungsfindung und Formulierung von Empfehlungen zur Verfahrensauswahl und zum weiteren Vorgehen. Der Prozess war charakterisiert durch eine offene Kommunikation und einen kontinuierlichen Informationsaustausch.

Die Fragestellung nach passenden technischen Verfahren stellte sich letztlich für Inhaber von Klärschlamm bzw. Klärschlammaschen in der ganzen Schweiz. Bis zum Projektstart im Herbst 2017 konnten vom Wallis bis in die Ostschweiz 11 Betreiber von Klärschlammverwertungsanlagen (KSV), Gross-ARAs und die mit dieser Fragestellung konfrontierten Fachverbände gewonnen werden, sich an der VTMA zu beteiligen. Sie repräsentieren 61% des heutigen Klärschlammanfalls in der Schweiz. Gemäss Abbildung 3 entfällt der Hauptteil davon heute auf die in Schlammverbrennungsanlagen (SVA), konzipiert als Wirbelschichtanlagen, welche Klärschlämme zu Klärschlamm-asche (KSA) mineralisieren. Der Rest der repräsentierten Klärschlammmenge verteilt sich auf eine Gross-ARA mit Entsorgung im Zementwerk (ara region bern ag), eine Kombination mit einer KVA (erzo Zofingen) sowie die KVA-Mitverbrennung (SATOM). Somit sind im Rahmen der VTMA alle in der Schweiz vorhandenen Wege zur Klärschlamm Entsorgung repräsentativ vertreten. Nicht direkt angesprochen waren die Betreiber von mittleren und kleinen ARAs.



**Abbildung 3: Entsorgte Klärschlammmenge der VTMA-Projektpartner im Jahr 2016, in t TS/a bzw. %-Anteilen.**

Mit der VTMA haben die Beteiligten die Möglichkeit erhalten, sich im Rahmen von Hearings mit den einzelnen Lösungsansätzen auseinander zu setzen. Die interessierten Anlagenbetreiber und Verbände tauschten im Partizipationsprozess Informationen und Absichten aus. In Hearings wurden die eingeladenen Technologieanbieter von der Expertengruppe befragt. Durch den Beizug von sowohl schweizerischen als auch ausländischen Fachexperten und Vertretungen der Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Landwirtschaft (BLW) bei den Hearings wurde die Vernetzung zu anderen Gremien

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

sichergestellt. Die Begleitung und Moderation dieser Evaluation und die systematische Zusammenstellung der Ergebnisse geschah durch eine Koordinationsstelle (HOLINGER AG).

Im vorliegenden Schlussbericht wird

- das Vorgehen für die Verfahrenstechnische Marktanalyse skizziert
- das gesammelte Wissen sowie die Ergebnisse aus diesem Prozess, und den vor- und nachgelagerten Arbeiten der dafür gegründeten Projektgruppe zusammenfassend dokumentiert,
- eine Entscheidungshilfe für die Bewertung und deren Resultat festgehalten.

Er dient als Grundlage für Empfehlung an die Entscheidungsträger bezüglich der Verfahrensauswahl und des weiteren Vorgehens.

### 3.3 Projektorganisation

Die Projektorganisation wurde in der Projektgruppe wie folgt festgelegt.



Abbildung 4: **Organigramm VTMA**

Es wurde vereinbart, dass jeder Projektpartner (Anlageninhaber / Verbände) mit je einer Person in der Projektgruppe vertreten ist (Stellvertretung möglich). Eine vollständige Liste aller Projektpartner befindet sich im Anhang 1. Bei den Hearings wurde jedem Projektpartner die Möglichkeit geboten, dass zwei Personen an den Hearings teilnehmen konnten.

### 3.4 Projektübersicht mit Meilensteinen

Das Projekt dauerte von September 2017 bis Mai 2018. Der Terminplan mit den Meilensteinen wurde durch die Steuer- respektive Projektgruppe festgelegt. Abbildung 5 zeigt den zeitlichen Ablauf des gesamten VTMA-Projekts.

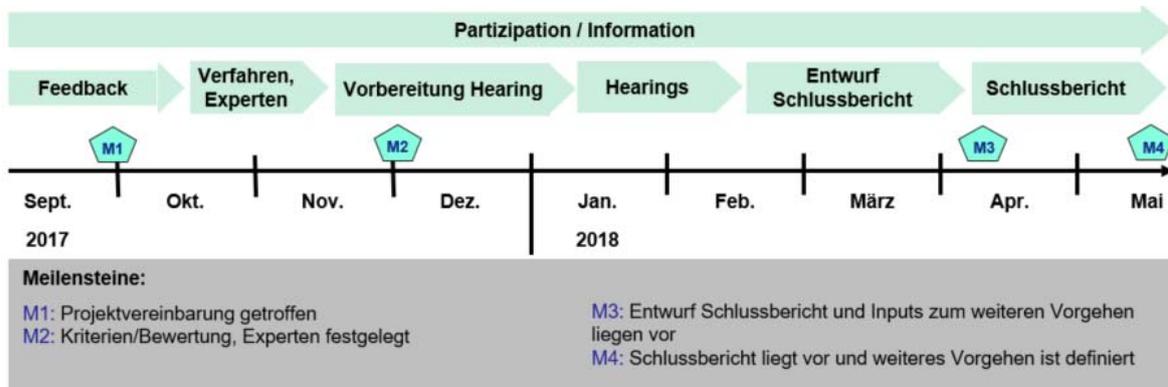


Abbildung 5: Terminplan VTMA

### 3.5 Rahmenbedingungen und Kriterien für die VTMA

Für die Auswahl der in Frage kommenden Verfahren zur Phosphorrückgewinnung war es von entscheidender Bedeutung, dass neben den Zielen auch die Rahmenbedingungen und Einladungs- bzw. Bewertungskriterien zu Beginn des Projekts gemeinsam zielführend definiert wurden.

Folgende **Rahmenbedingungen** wurden zu Beginn des Projekts in der Projektgruppe gemeinsam definiert:

Die VTMA schafft **keine Doppelspurigkeiten** zu Fachgremien, sondern **vorhandenes Expertenwissen wird miteinbezogen**.

Die VTMA sucht Wege, welche sich **an der bestehenden Infrastruktur der Abwasseranlagen (Abwasserreinigung, Klärschlammbehandlung) in der Schweiz orientieren**.

Für die Hearings sind nur Unternehmen / Anbieter zugelassen, welche die von der Projektgruppe festgelegten **Einladungskriterien erfüllen**.

Standorte von Rückgewinnungsanlagen sollten in der Schweiz oder mindestens mit der Einhaltung der Schweizer Grundlagen möglich sein. Im Sinne der Legal Compliance: **Die Einhaltung der Schweizer Umweltstandards muss gewährleistet sein**.

Die VTMA geht davon aus, dass die **Abfallverordnung VVEA fristgerecht einzuhalten** ist.

### 3.5.1 Rechtliche Einordnung und Abgrenzung

Zu Beginn des gemeinsamen Projektes wurde klar definiert, um was es sich bei der Analyse handelt und um was nicht.

#### Was die VTMA ist/beinhaltet:

- Eine Marktanalyse zur Evaluation der aktuell relevanten Verfahren
- Das Ergebnis soll ein umfassender Evaluationsbericht als Basis für die künftige Strategie der Teilnehmenden sowie weiterer Kreise sein.
- Ein Verfahren, das allgemein gehaltene Bewertungskriterien nennt.

#### Was die VTMA nicht ist / nicht beinhaltet:

- Ein Verfahren, in dem verbindliche Offerten der Unternehmer erwartet und abgegeben werden.
- Ein Verfahren, in dem gegenüber den Unternehmern der Eindruck einer Submission entstehen darf.
- Eine Bindungswirkung im Sinne einer Verpflichtung zur Verfahrenswahl oder zur Wahl eines Unternehmers / Anbieters durch die Projektpartner.
- Ein Verfahren, das die Unternehmer abschliessend bindet oder festlegt.

**Damit ist die VTMA kein Submissionsverfahren und hat die entsprechenden formellen Rahmenbedingungen nicht einzuhalten.**

### 3.5.2 Einladungskriterien

Bei der Auswahl der im Rahmen der VTMA zu prüfenden Verfahren/Anbieter einigte sich die Projektgruppe auf folgende einzuhaltende **Einladungskriterien**:

	Einladungskriterium	Begründung
1	<b>Lösungsansatz nutzt die bestehende Klärschlamm- sorgungsinfrastruktur</b>	Berücksichtigung Status/Kapazitäten heute: z.B. Kanton Zürich: ARA Werdhölzli (Monoverbrennung), z.B. Stadt Bern: ARA mit Trocknung und anschliessender Verwertung im Zementwerk.
2	<b>Stoffliche Verwertbarkeit muss gewährleistet sein</b> a) <b>Phosphorrückgewinnung</b> bezogen auf das Po- tential im Rohabwasser sollte mind. 50% sein und b) <b>Mineralik</b> : Sollte mind. 95% stofflich verwertbar sein. Die Qualitätsvorgaben für die stoffliche Verwer- tung sind zu erfüllen (Anhang 4, VVEA).	Ressourcenschonung (P)  Verwerten statt deponieren: Gemäss Abfalleitbild (Res- sourcenschonung, Schonung Deponieraum)
3	<b>Markt</b> : Produktqualität erlaubt Absatz CH/EU unein- geschränkt (Volumen, Qualität, Anzahl der Abneh- mer etc.).	Produktabsatz im Markt ist gewährleistet («keine Pro- dukte auf Halde»)
4	<b>Entwicklungsstand</b> : Marktreife in 2-3 Jahren (ab 2017 betrachtet)	Technologischer Reifegrad muss ausreichend für umge- hende Umsetzung sein (Abluft, Abwasser, Boden...)
5	<b>Prozess hat eine hohe Verfügbarkeit</b>	Keine grössere Zwischenlagerung von Produkten

### 3.5.3 Bewertungskriterien

Die Bewertung der in die VTMA aufgenommenen Unternehmen/Verfahren erfolgte nach den folgenden **Bewertungskriterien**.

<b>Bewertungskriterien</b>	
<b>1</b>	<b>Stoffliche Verwertung (für P und Mineralik)</b> 1.1 Rückgewinnungsgrad (bezogen auf P im Rohabwasser) 1.2 Anteil der stofflich verwerteten Mineralik
<b>2</b>	<b>Produktqualität / Markt (für P und Mineralik)</b> 2.1 Marktgrösse CH / EU 2.2 Marktdiversität / Absatzsicherheit 2.3 Abnahmegarantien, Abnahmevereinbarungen 2.4 Hoher P-Gehalt im Produkt (% P2O5) 2.5 Vermarktungs- und Konformitätskosten: Höhe und Träger
<b>3</b>	<b>Umwelt / Ökologie</b> 3.1 Ökologische Bewertungen (Ökobilanz, Energie, Chemikalien, Abfälle etc.) 3.2 Ökoeffizienz
<b>4</b>	<b>Technische Verfügbarkeit / Betrieb / Unterhalt</b>
<b>5</b>	<b>Kosten als Element der Klärschlamm Entsorgung</b> 5.1 Investitionsbedarf (Grobannahmen) 5.2 Betriebskosten (Grobannahmen) 5.3 Produktertrag 5.4 Zusatzerträge /-nutzen 5.5 Kostenanteile an den gesamten Klärschlamm Entsorgungskosten (Faulung, Entwässerung, Transport, thermische Behandlung)
<b>6</b>	<b>Integrierbarkeit in / Kompatibilität mit / mögliche Synergien mit bestehende(r) Infrastruktur (SVA, ARA)</b> 6.1 Platzbedarf 6.2 Einfluss auf Betrieb von SVA / ARA
<b>7</b>	<b>Kompatibilität / Synergien mit übergeordneten Strategien / Konzepten der Verbände</b>

### 3.6 Informationsbeschaffung und Hearings

Durch die Projektsteuergruppe wurde zuhanden der eingeladenen Technologieanbieter folgende Unterlagen erstellt:

- ein Raster für ein 2-seitiges Faktenblatt zur allgemeinen Kurzbeschreibung des Verfahrens sowie zur Begründung, wieso das Verfahren die Einladungskriterien erfüllt;
- ein Fragebogen mit allen relevanten Fragen zur Bewertung der Verfahren hinsichtlich der Bewertungskriterien.

Diese Unterlagen wurden allen Anbietern rund zwei Monate vor dem Hearing zur Beantwortung zugesendet. Die beiden Dokumente (Faktenblatt und Fragebogen) standen ergänzend zu den während der Hearings übermittelten Angaben den Experten und dem Berichtsverfasser zur Bewertung zur Verfügung.

Mit der VTMA haben die beteiligten Organisationen die Möglichkeit erhalten, sich im Rahmen von Hearings an einer zweitägigen Veranstaltung am 1. und 2. Februar 2018 in Luzern mit den einzelnen Lösungsansätzen auseinander zu setzen. Die interessierten Anlagenbetreiber und Verbände tauschten im Partizipationsprozess Informationen und Absichten aus.

In den Hearings wurden die eingeladenen Technologieanbieter (siehe Anhang 3) von der Experten- gruppe (siehe Anhang 2) befragt. Sie brachte folgende Expertise ein:

- (1) Schlüsselpersonen im Bereich P-Recycling aus Abwasser und deren Verfahren
- (2) Expertise Verfahrenstechnik/Anlagebau/-betrieb
- (3) Expertise Ökologische Bewertung und
- (4) Expertise Phosphor-Produkte(-qualitäten)/Markt.

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

Durch die Vertretung des BAFU und des BLW bei den Hearings wurde die Vernetzung zu den für die P-Rückgewinnung zentralen Bundesstellen sichergestellt. Weiter waren auch Vertreter der Verbände VSA und VBSA am Hearing beteiligt. Beide Organisationen waren Teil der Projektgruppe VTMA.

Die Begleitung und Moderation dieser Evaluation und die systematische Zusammenstellung der Ergebnisse geschah durch eine Koordinationsstelle (HOLINGER AG). Marktexperten wurden vorgängig für ein Referat über den Schweizer Düngemarkt in der Projektgruppensitzung am 22. November 2017 eingeladen.

Im Anschluss an die Hearings wurde am zweiten Tag in Gruppenarbeit ein «World-Café» durchgeführt. Die Teilnehmenden wurden in vier Gruppen eingeteilt. Die vier Gruppen haben abwechselnd die vier prioritären Themen («Produkte und Märkte», «Finanzen und Finanzierung», «Technologien und Kooperationen» und «Rahmenbedingungen und Politik») sowie damit verknüpfte Fragen aus Sicht der Anlagenbetreiber diskutiert und die Ergebnisse festgehalten.

Im Hearing noch nicht beantwortete Restfragen wurden zur Berücksichtigung im Schlussbericht bei Bedarf den Technologieanbietern nachträglich zugestellt.

## **4 AUSWAHL DER TECHNOLOGIEANBIETER**

Die in Tabelle 1 angegebenen Technologieanbieter wurden angefragt, ob sie an der Teilnahme an der VTMA interessiert wären. Die Auswahl betraf Verfahren, welche

- a) aus Sicht der Projektsteuergruppe mit grosser Wahrscheinlichkeit die Einladungskriterien erfüllen,
- b) in Bezug zur EBP-Studie «Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung» vom Januar 2017 im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) alle vielversprechend sind und hohe Bewertungspunktzahlen erreichten und
- c) in Verbindung zu aussichtsreichen Projekten der Projektteilnehmer stehen.

**Tabelle 1: Angefragte Technologieanbieter für die VTMA unter Nutzung der bestehenden Infrastruktur der Schlammverbrennung (SVA), Klärschlammverwertung (KS) bzw. thermischer Trocknung und Verwertung in Zementwerk (TuZ).**

	Verfahren	Anbieter / Firma	Kurzbeschreibung	Begründung für Wahl	
Infrastrukturpfade	SVA	Phos4Life®	Técnicas Reunidas SA	Nasschemische Extraktion von Klärschlammasche mit Schwefelsäure zur Produktion von Phosphorsäure, gereinigt mit Flüssig-Flüssig-Extraktion	Vorschlag AWEL/ERZ: Von der Stiftung ZAR mit Técnicas Reunidas (TR) entwickeltes Verfahren zur Phosphorsäureproduktion aus Klärschlammasche
		TetraPhos®	REMONDIS Aqua GmbH & Co. KG	Nasschemische Extraktion mit Phosphorsäure zur Produktion von Phosphorsäure, gereinigt mit Ionentauscher	Vorschlag der Steuergruppe (interessante allfällige Alternativ-Variante zu Phos4Life und ECOPHOS)
		ECOPHOS	ECOPHOS s.a.	Nasschemische Extraktion mit Phosphorsäure zur Produktion von Phosphorsäure, gereinigt mit Ionentauscher	Vorschlag Steuergruppe (interessante allfällige Alternativ-Variante zu Phos4Life und TetraPhos)
		CIMO/Sepholix	Cimo Industrial Company Monthey SA	Nasschemische Laugung von Klärschlammasche und Kombination mit bestehender Nassoxidation zur Produktion von TCP	Vorschlag Steuergruppe (interessante allfällige Alternativ-Variante für KSA)
		ICL, Recophos-Verfahren	ICL Fertilizers Deutschland GmbH	Thermochemische Produktion von Weisssem Phosphor (P4) aus KSA	Vorschlag Steuergruppe (interessante allfällige Alternativ-Variante für KSA). Gemäss letztem Kenntnisstand - mit grösster Wahrscheinlichkeit nur im Ausland angeboten.
		ICL, Teno-Bateman Verfahren		Nasschemische Extraktion von KSA mit Abfall-Salzsäure zur Produktion von P-Säure, gereinigt mit Flüssig-Flüssig-Extraktion	
		ZAB-Verfahren	ZAB, Bazenheid	Nasschemischer Aufschluss von Tiermehl- und Klärschlammasche mit Phosphorsäure, um ein 46%-TSP-Produkt zu erzeugen. Bei Bedarf findet eine Abreicherung von flüchtigen Metallen durch Zugabe von Additiven im Mineralisierungsprozess statt.	Vorschlag ZAB: Mineralisierung von phosphorhaltigen Abfällen mit anschliessender Veredelung der Asche zu Dünger.
TuZ	ExtraPhos®	Budenheim	Nasschemische Extraktion mit CO <sub>2</sub> zur Produktion eines Dicalciumphosphatprodukts aus ausgefautem KS	Vorschlag ARA Bern: Erfolgversprechendes Verfahren für Variante ARA mit bestehender Infrastruktur zur KS-Verwertung im Zementwerk.	
KS	EuPhoRe®	EuPhoRe GmbH	Thermischer Aufschluss von gefautem, entwässertem KS in Drehrohr kombiniert mit der Nutzung und Reinigung von Rauchgas aus der KVA zur Produktion eines Düngerrohstoffes	Vorschlag ERZO: Spezial-Variante mit vorhandenem Drehrohr zur direkten Produktion eines Düngers.	

Mit Ausnahme von Remondis (TetraPhos®) und ICL Fertilizers Deutschland GmbH sagten alle angefragten Anbieter zu. Remondis hat sich entschieden, nicht an der VTMA teilzunehmen. Dies obwohl Remondis momentan an der ersten grosstechnischen Umsetzung des Tetraphos®-Verfahrens mit Phosphorrückgewinnung mittels IT arbeitet. Geplant ist der Bau auf der Grosskläranlage von Hamburg bis in 2 Jahren. ICL Fertilizers Deutschland GmbH begründete ihre Absage damit, dass sie kein Interesse an der Umsetzung einer Anlage in der Schweiz hätten.

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

Zwei Verfahren wurden im Rahmen der VTMA trotz vorangegangener Entwicklung in der Schweiz nicht bzw. nur teilweise (PyroPhos) berücksichtigt:

LEACHPHOS®-Verfahren der Firma BSH Umweltservice AG: Weil der Prozess sehr ähnlich zum ersten Teil des Phos4Life-Verfahren ist und aus Gründen des schlechten Produktabsatzes zurzeit vom Kanton Zürich nicht weiterverfolgt wird.

PyroPhos-Verfahren von AVA Altenrhein und CTU Clean Technology Universe AG: Weil sehr ähnlich dem EuPhoRe®-Verfahren, wurde auf eine Präsentation am Hearing verzichtet. In der Auswertung ist es jedoch berücksichtigt.

## 5 BEWERTUNG DER VERFAHREN

### 5.1 Aktueller Wissensstand

In einem ersten Schritt wurde qualitativ der aktuelle Informations- und Wissensstand anhand der von den Technologieanbietern in den Fragebögen bzw. im Hearing zur Verfügung gestellten Informationen erfasst (Abbildung 6). Dabei werden die grossen Differenzen zwischen den einzelnen Verfahrensanbietern deutlich sichtbar. Für aschebasierte Verfahren gibt es 3 Verfahren mit einem schon sehr grossen Informations- und Wissensstand. Für klärschlamm-basierte Verfahren, die einen Dünger produzieren steht ein Verfahren mit grossem Kenntnisstand zur Verfügung.

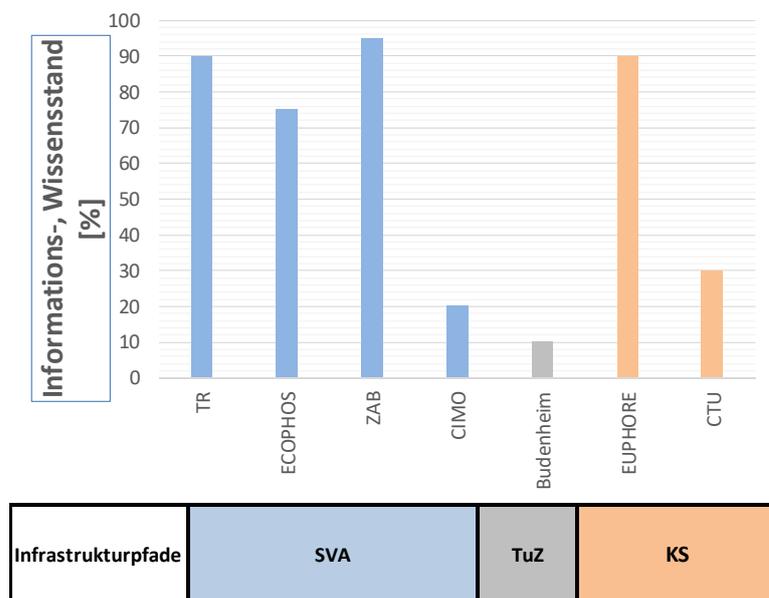


Abbildung 6: Qualitativer Informations- und Wissensstand der vorgestellten Verfahren.

## 5.2 Überprüfung der Einladungskriterien

Tabelle 2 zeigt das Resultat der Überprüfung der Einladungskriterien nach der Auswertung der zur Verfügung gestellten Informationen vor, am und nach dem Hearing.

Dabei wird ersichtlich, dass bezüglich des Entwicklungsstandes sowohl für Sepholix von CIMO, wie auch ExtraPhos von Budenheim nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Marktreife bis in 2-3 Jahren erreicht werden kann. In beiden Fällen ist die vorliegende Datenbasis aus den Labor- bzw. Pilotversuchen noch viel zu wenig detailliert und verlässlich. Bei EcoPhos ist der Kernprozess des Ionenaustauscherverfahrens bisher nicht pilotiert worden und lediglich im Batch-Betrieb im Labor evaluiert. Die Marktreife ist hierfür auch noch nicht absehbar. Beim Phos4Life-Prozess muss dafür die laufende Pilotierung bis zum Sommer 2018 abgewartet werden.

Bei Budenheim kommt neben der technischen Reife noch erschwerend hinzu, dass gemäss der Information, welche der Projektgruppe vorliegt, lediglich eine Phosphorausbeute von knapp 35% realisiert werden kann und das Produkt mit seinem «Klärschlammgeruch» nicht ohne weiteres absetzbar sein wird. Für das thermochemische Verfahren EuPhoRe ist zurzeit die Einhaltung der in der Schweiz neu vorgesehenen MinRec-Grenzwerte nicht gewährleistet. Analoges gilt auch für das PyroPhos-Verfahren.

Lediglich das ZAB-Verfahren erfüllt zum heutigen Zeitpunkt alle Einladungskriterien. Das Projekt hat nur regionale Bedeutung, da die Mengen Klärschlamm und Tiermehl gegenseitig abgestimmt werden müssen. Die Behandlung grosser Klärschlamm- bzw. Klärschlammaschenmengen ist nicht geeignet und nicht vorgesehen.

Tabelle 2: Beurteilung bezüglich der Einladungskriterien

		Anbieter	Técnicas Reunidas SA (TR)	EcoPhos s.a. (ECOPHOS)	Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid (ZAB)	Compagnie Industrielle de Monthey SA (CIMO)	Chemische Fabrik Budenheim KG (Budenheim)	EuPhoRe GmbH (EUPHORE)	CTU Clean Technology Universe AG (CTU)
		Verfahren	Phos4Life	EcoPhos-Verfahren	ZAB-Verfahren	Sepholix	ExtraPhos®	EuPhoRe®-Verfahren	Pyrophos
		Input	KSA	KSA	KS- und Tiermehlasche	KSA	KS	KS	KS, EKS
Einladungskriterien	1	Integration in die bestehende Infrastruktur für die KS-Entsorgung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	2a	P-Rückgewinnung bezogen auf das Potenzial im Rohabwasser >50%	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein (30-50%)	Ja	Ja
	2b	Mineralik verwertbar zu >95%	Ja	Ja	Ja	Unklar	Ja	Ja	Ja
	3	Markt: Produktqualität erlaubt Absatz in CH / EU	Ja H3PO4 technical grade acid (TGA)	Ja H3PO4 merchant grade acid (MAG)	Ja, TSP, 46%	Ja TCP	Unklar	D/EU: Ja CH: Nein, noch nicht	Nein, noch nicht, PK-Dünger Granulat
	4	Entwicklungsstand: Marktreife in 2-3 Jahren / Technologischer Reifegrad (TRL)	Ja (falls Pilot bestätigt)	Vielleicht (Pilotversuche notwendig)	Ja	Nein	Nein	Ja	Vielleicht (Pilotversuche notwendig)
	5	Prozess hat eine hohe Verfügbarkeit	8000 h	7800 h	7500 h	Unklar	gemäss KS-Anfall	8400 h	7500 h

### 5.3 Stoffliche Verwertung (für P und Mineralik)

#### Phosphor-Rückgewinnungsgrad

Abbildung 7 zeigt die Auswertung des **Phosphor-Rückgewinnungsgrades** bezogen auf den Input ins Verfahren. Es zeigt sich, dass mit Ausnahme des sehr tiefen Wirkungsgrades des Budenheim-Verfahrens von 30% (gemäss Information, die der Projektgruppe vorliegt) bis max. 50% (optimistische Prognose) und des Verfahrens von CIMO (ca. 70%) für alle anderen Verfahren mit Rückgewinnungsraten grösser als 90% gerechnet werden kann.

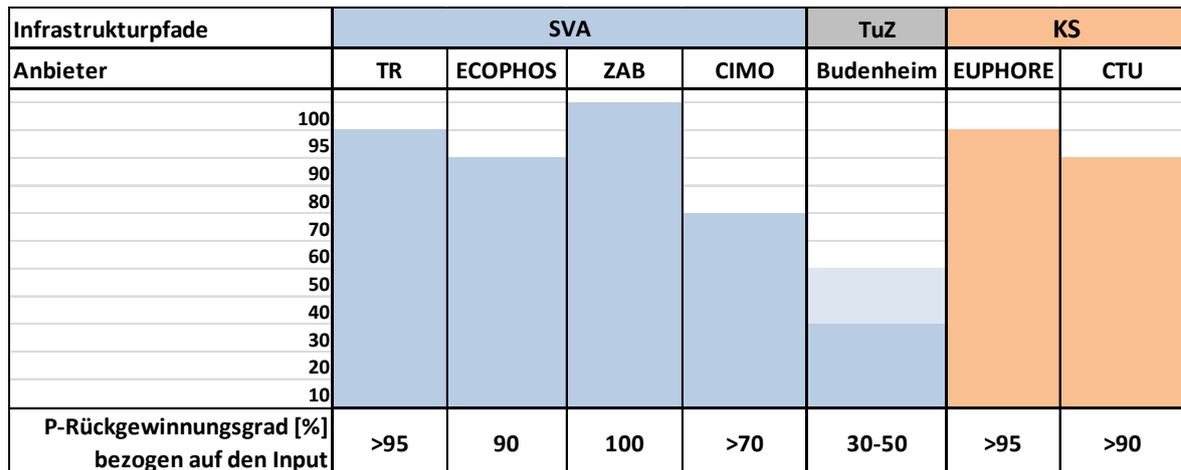


Abbildung 7: Phosphorrückgewinnungsgrad der einzelnen Verfahren

#### Anteil an verwertbarer Mineralik aus dem Klärschlamm

Tabelle 3 zeigt den Anteil an verwertbarer Mineralik aus dem Klärschlamm.

Tabelle 3: Anteil der stofflich verwertbaren Mineralik

Infrastrukturpfade	SVA				TuZ	KS	
Anbieter	TR	ECOPHOS	ZAB	CIMO	Budenheim	EUPHORE	CTU
Anteil stofflich verwertbarer Mineralik [%] (bzgl. Input)	>90	unklar	100	Unklar	100	100	100

SVA

#### Für KS-Inhaber mit einer SVA:

Für das Phos4Life-Verfahren von TR wird durch die starksauren Laugungsbedingungen eine nahezu vollständige Schwermetallabreicherung in der Mineralik und demzufolge die Voraussetzungen einer stofflichen Verwertung erfüllt. Die Mineralik erfüllt die gesetzlichen Vorgaben als Inertstoff und somit auch zur stofflichen Verwertung im Zementwerk.

Auch ECOPHOS rechnet damit, dass ihre mineralischen Nebenprodukte (Kalziumchloridlösung und Eisensilikate) einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Dies erscheint derzeit aber unter Schweizer Rahmenbedingungen (gesetzliche Vorgaben) als eher unwahrscheinlich, sofern in ihrem Verfahren nicht weitere Aufbereitungsschritte zur Erreichung der erforderlichen marktconformen Produktqualitäten implementiert werden.

**Für KS-Inhaber mit einer ARA mit Trocknung/Zementwerkweg:**

Für das ExtraPhos-Verfahren von Budenheim ist die Verwertungsquote durch die nachfolgende Verwertung in Zementwerk bei nahezu 100%.

**Für KS-Inhaber mit diverser Infrastruktur:**

Bei den Verfahren EuPhoRe, CTU und ZAB, welche den gesamten mineralischen Anteil des Klärschlammes in das Produkt (Dünger/Düngerrohstoff) überführen, darf streng genommen nicht von einer Verwertung gesprochen werden, da die Mineralik bezogen auf die beabsichtigte Düngewirkung des Produktes nur einen «Ballaststoff» darstellt, der systembedingt mit dem Wertstoff Phosphor mitläuft, da sie im gewählten Verfahrenskonzept nicht abgetrennt werden kann.

**5.4 Produktqualitäten und Absatzmärkte für Phosphor und Nebenprodukte**

Tabelle 4 enthält die wichtigsten Angaben aus den Fragebögen zur Produktqualität, den erzielbaren Marktpreisen und zum Absatzmarkt im Überblick.

**Tabelle 4: Produktqualitäten, Produkterlöse und Absatzmärkte**

Infrastrukturpfade	SVA				TuZ	KS	
	TR	ECOPHOS	ZAB	CIMO	Budenheim	EUPHORE	CTU
Input	30'000 t/a KSA		KSA, Tier- und Knochenmehl, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	3-5'000 t/a KSA	Klärschlamm (KS)		
Produzierte Phosphor-Produkt Menge (in t/a)	9'740 (2'300 t P/a)	9'260 (2'100 t P/a)	15'000 (rund 3'100 t P/a, davon je rund 25% aus KS- und aus Tiermehlasche)	5'000 (ca. 700 t P)	Abhängig von KS-Durchsatz	5000 (ca. 400 t P/a)	4800 (ca. 390 t P/a)
Welches bisherige Handelsprodukt wird auf dem Markt 1:1 substituiert	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> technical grade acid (TGA)	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> merchant grade acid (MAG)	TSP 46%	Tricalcium-phosphate (TCP)	keine, da neues Produkt	Rohphosphat und teilaufgeschlossenes Rohphosphat	
Produkterlös [CHF/t]	700	400	300	20-100	k.A.	5-20	k.A.
Grösse des Absatzmarktes innerhalb der Schweiz (in t/a)	2'000	Produkt von EcoPhos zu 100% abgenommen	10'000	k.A.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Bedarf in Mineraldüngern	4200 t P/a	k.A.
Hauptabnehmer in der Schweiz	Chemikalienhandel, Industrie	EcoPhos	Düngemittel-industrie	Gespräche laufen	k.A.	Landor mit Landi, Hasli etc.; Hauert	Landor oder Direktvermarktung
Grösse des Absatzmarktes innerhalb der EU (in t/a)	>300'000, ohne Dünger-industrie	3-4 Mio. (Dünger, Tierfutter, etc.)	5'000	k.A.	k.A.	ca. 1 Mio. t P/a	k.A.
Hauptabnehmer in der EU	Chemikalienhandel, Industrie, Düngemittelindustrie	EcoPhos	Düngemittel-industrie	Düngemittel-industrie	k.A.	Düngemittel-industrie	offen
Weitere Produkte	Eisen(III)chlorid-lösung 40%; HCl 17%; Metallkonzentrat	Calciumchlorid-lösung, 35%; Eisensilikat					

## Für KS-Inhaber mit einer SVA:

### Phosphorsäure:

Den beiden Verfahren von **TR** und **ECOPHOS** liegt eine Anlagengrösse von 30'000 t/a KSA zugrunde. Für die beiden Verfahren, welche Phosphorsäure unterschiedlicher Qualität produzieren, entsprechen die Produktqualitäten gängigen Marktprodukten. Sowohl in der Schweiz (begrenzt) wie auch in Europa besteht ein grosser etablierter Markt für die gewonnenen Produkte. Der Marktpreis orientiert sich an der jeweiligen Qualität.

### Nebenprodukte:

**TR:** Beim Phos4Life-Verfahren wird neben Phosphor ebenfalls Eisen mit einer Ausbeute von ca. 70% zurückgewonnen. Dies geschieht in Form einer 40%igen Eisen(III)chloridlösung, die als Fällmittlersatz in den ARAs verwendet heutige Eisenfällmittel 1:1 ersetzen könnten. Weitere Nebenprodukte sind 17%ige saubere Salzsäure und ein Metallkonzentrat der separierten Schwermetalle. Sowohl die anfallende Salzsäure als auch das Metallkonzentrat können einer stofflichen Verwertung zugeführt werden (z.B.: FLUWA-/FLUREC/SwissZinc-Prozess).

**ECOPHOS:** Auch ECOPHOS rechnet damit, dass ihre mineralischen Nebenprodukte (Kalziumchloridlösung und Eisensilikate) einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Dies erscheint derzeit aber unter Schweizer Rahmenbedingungen (gesetzliche Vorgaben) als eher unwahrscheinlich, sofern nicht weitere Aufbereitungsschritte implementiert werden. Der angedachte Einsatz des ECOPHOS-Nebenproduktes Calciumchlorid (35%ige Lösung) als Enteisungsmittel ist in der Schweiz nicht umsetzbar.

Den Laugungsrückstand Eisensilikat als Ausgangsstoff für eine zukünftige Eisenfällmittelproduktion einzusetzen, welche nicht innerhalb der betrachteten Systemgrenze des ECOPHOS-Verfahrens enthalten ist, wäre theoretisch machbar. Dies wird aber nicht wie von ECOPHOS kostenneutral erfolgen können. Die Angaben zur Verwertung der Nebenprodukte erscheinen, wie von ECOPHOS behauptet, auf den ersten Blick als Konzept theoretisch machbar, erfordern aber noch in der angedachten Umsetzung einigen technischen Aufwand. Zukünftige Weiterentwicklungen des Verfahrens müssen hier somit abgewartet werden.

Fazit: Das Phos4Life-Verfahren von TR ist bei der stofflichen Verwertung dem ECOPHOS-Verfahren überlegen.

**ZAB:** Durch die gleichzeitige Mineralisierung der phosphorhaltigen Abfälle Klärschlamm und Tiermehl und, sofern notwendig, durch die Abreicherung von Schwermetallen (Zugabe Additiven) wird eine schwermetallarme Asche erhalten. Wird diese mit Phosphorsäure teilaufgeschlossen und das nachfolgende Produkt getrocknet und granuliert, so entsteht ein Triplesuperphosphat, das sowohl im Inland als reiner Phosphordünger als auch als Phosphorbaustein der Mehrkomponentendüngerformulierung im Ausland eingesetzt werden kann. Einschränkend gilt hier zu beachten, dass der Phosphor des TSP-Produktes zu rund 50 Gewichtsprozent aus extern zugeführter Phosphorsäure und je etwa 25 Gewichtsprozent aus schwermetallarmen Knochen-/Tiermehl und aus Klärschlamm stammt. Das Verfahren bietet somit nur eine begrenzte Kapazität zur Mitbehandlung von Klärschlammaschen.

**CIMO:** Beim Sepholix-Verfahren wird davon ausgegangen, dass maximal 5'000 t/a KSA verarbeitet werden können. Die seitens CIMO angegebene Produktqualität TCP (Tricalciumphosphat) ist nur für eine KSA-Mitverarbeitung von ca. 500 t/a gewährleistet. Der derzeitige Ursprung dieses TCP-Produktes ist das Produkt der Nassoxidation eines phosphorhaltigen flüssigen Industrieabfalls ohne signifikante Schwermetallgehalte (lediglich Cu). Auswirkungen der angedachten Mitverarbeitung von 3'000 – 5'000 t/a KSA mit deutlich anderer Inputcharakteristik und deren Auswirkung auf die Produktqualität werden erst in den kommenden Monaten möglich sein, da dazu noch keine Versuche stattgefunden haben. Der Produktabsatz, sollte die TCP-Qualität erreicht werden, ist in Europa möglich, da Rohphosphat damit ersetzt werden kann.

**Für KS-Inhaber mit einer ARA mit Trocknung/Zementwerkweg:**

**Budenheim:** Beim ExtraPhos-Verfahren ist die Produktqualität und Vermarktung aufgrund des Geruches nach Klärschlamm und der unzureichenden Datenbasis derzeit nicht beurteilbar und der Anbieter kann heute auch noch keine Angaben zum möglichen Absatzmarkt machen. Die stoffliche Verwertungsquote durch die nachfolgende Verwertung in Zementwerk liegt bei nahezu 100%.

**Für KS-Inhaber mit diverser Infrastruktur:**

**EUPHORE** und **CTU:** Die Produktqualität ist durch die anteilig nicht eingehaltenen MinRec-Grenzwerte eher als gering zu beurteilen. Der Absatzmarkt dieser Produkte ist durch die schlechte Integrierbarkeit in bisherige Kanäle der Düngemittelindustrie (vgl. Abbildung 2, Kap. 0), gering und bestenfalls von lokalem Interesse. Im Falle des CTU-Verfahrens ist der Kenntnisstand diesbezüglich Produktqualität und möglichem Absatzmarkt noch sehr unsicher, so dass auf die Erkenntnisse aus den laufenden Pilotversuchen gewartet werden muss.

TuZ

KS

## 5.5 Technische Verfügbarkeit / Betrieb / Unterhalt

Eine abschliessende Bewertung bzgl. der technischen Verfügbarkeit, dem Betrieb und zum Unterhalt ist auf Grund des heutigen Kenntnisstandes und den bisherigen Erfahrungen zum Grossmassstab noch nicht abschliessend möglich.

### Für KS-Inhaber mit einer SVA:

**TR:** Die analoge Laugung von Klärschlammasche mit Schwefelsäure wurde im Grossversuch in der KVA Bern (LeachPhos-Projekt, 300kg/h KSA, 2012) erfolgreich getestet und ist heute im Bereich Flugaschewaschung ein in der Praxis angewandtes und etabliertes Standardverfahren zur Extraktion von Rohstoffen aus Aschen. Auch die von TR angewandte Solventextraktion ist ein Standardverfahren bei der Reinigung von Phosphorsäure aus Phosphaterzen. Bei dem Phos4Life-Verfahren werden somit weltweit etablierte Prozesse aus der Aschenaufbereitung und Phosphorsäurereinigung in einem neuartigen Verfahrenskonzept kombiniert. Für die Auslegung dieser beiden zentralen Bestandteile und die damit verbundene Betriebssicherheit bzw. Anlagenverfügbarkeit steht dem international renommierten Grossanlagenbauer Técnicas Reunidas ein versiertes, erfahrenes und interdisziplinäres Ingenieurteam zur Verfügung. Die zahlreichen weltweiten Referenzen bei analogen Projekten zeigen ebenfalls die grosse Erfahrung der mit der Entwicklung betrauten Firma. Das Verfahren ist fertig entwickelt und befindet sich derzeit im Pilotbetrieb. Bei erfolgreichem Abschluss der Pilotierung im Sommer 2018 wird die grosstechnische Umsetzbarkeit und das Scale-Up anschliessend durch ein fundiertes Engineering ohne technisches Risiko ausgeführt werden können.

**ECOPHOS:** Die Technologie der KSA-Laugung wird mit einigen Modifikationen zur Gewinnung von Calcium-Phosphaten als Futtermittelzusatz eingesetzt. In Dünkirchen wurde eine Grossanlage mit Phosphorerz als Rohstoff im 2017 im Betrieb genommen. Wie komplex und herausfordernd die sich in Planung befindliche Produktionslinie mit KSA als Rohstoff ist, konnte aus dem Hearing nicht ermittelt werden. Der Einsatz von Ionenaustauscher zur Schwermetallseparierung ist dafür vorgesehen. Über die Eignung der Ionenaustauscher zur Reinigung der rohen Phosphorsäure gibt es widersprüchliche Aussagen. In der primären Phosphorsäureproduktion konnte sie allerdings für den hier angedachten Zweck bisher nicht erfolgreich eingesetzt werden. Von ECOPHOS wurde der Einsatz der Ionenaustauscher bisher noch nicht pilotiert. Die Angaben beruhen auf Batch-Laborversuchen und somit lassen sich zu den damit verbundenen technischen Risiken (Auslegung, Scale-Up, Produktqualität, Verfügbarkeit, Stabilität etc.) keine gesicherten Angaben machen. Die Pilotierung des Ionenaustauscherprozesses ist für das laufende Jahr 2018 in der ECOPHOS Demonstrationsanlage in Bulgarien (Technophos, Varna) vorgesehen.

**ZAB:** Die Wirbelschichtverbrennung ist bewährte Technologie. Zumischen von Phosphorsäure und Granulation sind einfache, bewährte Prozessschritte. Das ZAB-Verfahren dient primär der Verwertung des in der Region anfallenden Klärschlammes und des am Standort Bazenheid vorhandenen Tiermehls. Das Verfahren ist fertig entwickelt und technisch ohne grosse Risiken.

**CIMO:** Das heutige Verfahren ist eine ausgereifte Technologie für die anfallenden Rückstände der Nassoxidationsanlage. Sowohl die Laugung als auch die Fällung sind Standardverfahren. Solange einerseits die Qualität des bisher verkauften Produkts (TCP) nicht beeinträchtigt wird und andererseits keine Störungen durch die geänderten Inputbedingungen im aktuellen Prozess auftreten, könnten auch zusätzliche externe KSA-Mengen eingesetzt werden. Dazu sind allerdings zuerst weitergehende Abklärungen und Pilotversuche notwendig.

SVA

TuZ

**Für KS-Inhaber mit einer ARA mit Trocknung/Zementwerkweg:**

**Budenheim:** In Mainz wird eine Pilotanlage betrieben. Das relativ einfache Verfahren wurde in Mainz erprobt, ist aber gemäss der Projektgruppe vorliegenden Information weder bezüglich der Ausbeute noch bezüglich der Verfahrenstechnik fertig entwickelt. Was notwendige Optimierungen für Konsequenzen auf den zukünftigen Betrieb haben werden, muss erst abgeklärt werden.

**Für KS-Inhaber mit diverser Infrastruktur:**

**EUPHORE:** Die Technologie wird aktuell im Drehrohrofen der KVA erzo in Oftringen erprobt. Die Schwermetallabreicherung erfüllt aktuell den MinRec Kupfergrenzwert nicht und den Nickelgrenzwert knapp bzw. nur bei genügend tiefer Konzentration im Klärschlamm. Das Verfahren ist abgesehen von möglichen Korrosionsproblemen im Langzeitbetrieb theoretisch relativ einfach, bedingt aber die Nachbarschaft zu einer Verbrennungsanlage, die heisses Rauchgas liefert und die entstehenden schwermetallhaltigen Abgase reinigt. Dieser Anschluss an die KVA ist herausfordernd, da der Einfluss auf den Kessel und den Verbrennungsprozess relevant ist und den Betrieb der KVA nicht gefährden darf. Auch ist noch nicht abschliessend geklärt, ob die korrosiven Additive über längere Betriebszeiten den Betrieb nicht gefährden oder viel teurer machen.

**CTU:** Die Weiterentwicklung der Alkalipyrolyse ist auf Laborstufe ziemlich weit fortgeschritten (seit 2012 laufen Forschungsprojekte im Rahmen der KTI). Eine Pilotierung ist ab Frühjahr 2018 geplant. Dabei ist die Einhaltung der MinRec-Konformität erst noch zu bestätigen. Aussagen zu technischen Verfügbarkeit, zum Betrieb und Unterhalt sind dann erst möglich.

KS

### 5.6 Integrierbarkeit in bestehende Infrastruktur

Tabelle 5 fasst die Angaben der Anbieter zum Platzbedarf, Einflüssen auf bestehende Infrastrukturbetriebe sowie mögliche Synergien mit anderen Betrieben, wie KVA etc. zusammen.

**Tabelle 5: Platzbedarf und Integrierbarkeit in bestehende Infrastruktur(en)**

Infrastrukturpfade	SVA				TuZ	KS	
	TR	ECOPHOS	ZAB	CIMO	Budenheim	EUPHORE	CTU
<b>Anlagendurchsatz und maximale Kapazität</b>	Durchsatz: 30'000 t/a KSA Kapazität: >>30'000 t/a KSA		Durchsatz: 7'500 t/a KSA Kapazität: 15'000 t/a KSA	Durchsatz/Kapazität: 500-5000 t/a KSA	k.A.	Durchsatz: 10'000 t/a KS Kapazität: >10'000 t/a KS	
Platzbedarf für Anlage (m3)	60x60x20 =72'000 m3	50x50x10 =25'000 m3	40x30x15 =18'000 m3	bestehend	Abhängig von KS-Durchsatz	30x15x5 =2'250 m3	20'000 m3 exkl. Trocknung
Zusätzlicher Platzbedarf (für Anlieferung, Logistik, Wartezonen etc.) (m2)	2'000	3'000	5'000	bestehend	Keine	250	1'500
<b>Platzbedarf total (in m2)</b>	<b>5'600</b>	<b>5'500</b>	<b>6'200</b>	<b>bestehend</b>	<b>k.A.</b>	<b>700</b>	<b>ca. 3500</b>
<b>Einfluss auf ARA-Betrieb</b>	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Teilweise
<b>Einfluss auf KS-Behandlung</b>	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
<b>Mögliche Synergien:</b>	KVA (Energie) FLUWA / FLUREC / SwissZinc: Personal, Labor, QS und Verwertung von Nebenprodukten	KVA (Energie)	1) Tier- und Knochenmehl- verwertung; 2) Abnahme sauberer Phosphorsäure	Betriebsintern	ARA	KVA Personal, Rauchgas, Rauchgas- reinigung	ARA

Die wichtigsten Auswirkungen und mögliche Synergien sind nachfolgend für die jeweiligen Infrastrukturfade angegeben.

SVA	<p><b>Für KS-Inhaber mit einer SVA:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Der Bau der P-Rückgewinnung kann unabhängig von der ARA bzw. der SVA ohne Einfluss auf Betrieb und Platzverhältnisse erfolgen. Idealerweise wird so eine Anlage in der Nähe einer KVA gebaut. Für die beiden Optionen TR oder ECOPHOS werden ca. 5500 m<sup>2</sup> Fläche benötigt. Durch Kombination mit in der Schweiz etablierten Prozessen (FLUWA/FLUREC bzw. dem geplanten SwissZinc-Verfahren) ergeben sich im Falle des Phos4Life-Verfahrens von TR interessante, weitere Synergiemöglichkeiten.</li><li>○ ZAB und CIMO nutzen Synergien im eigenen Betrieb und haben selber die notwendigen Platzreserven. Beide Varianten sind nur von regionalem Interesse.</li></ul>
TuZ	<p><b>Für KS-Inhaber mit einer ARA mit Trocknung/Zementwerkweg:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Wäre im Falle des Budenheim-Verfahrens der Bau der P-Rückgewinnung mit Synergien bzw. Einfluss auf den ARA-Betrieb und deren Platzverhältnisse (heute noch unbekannt).</li></ul>
KS	<p><b>Für KS-Inhaber mit diverser Infrastruktur:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Im Falle des CTU-Verfahrens wäre der Bau der P-Rückgewinnung mit Synergien bzw. Einfluss auf den ARA-Betrieb und deren Platzverhältnisse (rund 3'500m<sup>3</sup> Platzbedarf, ohne Trocknung).</li><li>○ Im Falle des EuPhoRe-Verfahrens wäre der Bau der P-Rückgewinnung ohne Synergien bzw. Einfluss auf den ARA-Betrieb und deren Platzverhältnisse. Das Verfahren ist aber abhängig von der Kombination mit einer bestehenden KVA, um vor allem die Abgase reinigen zu lassen und um Abwärme zu nutzen.</li></ul>

## 5.7 Kompatibilität mit der übergeordneten Strategie des Bundes

Zur termingerechten Umsetzung der Phosphorrückgewinnung müssen sich Lösungswege an der Schweizer Infrastruktur orientieren. Dabei werden regionale Schlammverbrennungsanlagen mit der Produktion von Klärschlammasche gegenüber denjenigen Verfahren zur Klärschlammverwertung im Hinblick auf die Phosphorrückgewinnung eine dominierende Rolle einnehmen (vgl. Kap. 2). Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Informationen der Verfahren zeigen, dass der inländischen Verwertung von sauberer Phosphorsäure aus KSA mit weiteren sekundären Phosphorprodukten eine wichtige Rolle zukommen kann (z.B. ZAB-Verfahren). Als mögliche Anbieter der Phosphorsäureproduktion aus KSA stehen TR und ECOPHOS zur Auswahl. Nicht an der VTMA teilgenommen hat Remondis die mit ihrem Tetra Phos-Verfahren auch auf die Gewinnung von Phosphorsäure aus der Klärschlammasche setzt. Die beiden anderen KSA-verwertenden Verfahren der Anbieter CIMO und ZAB sind aufgrund ihres limitierten KSA-Einsatzes (maximal 5'000 t/a KSA) nur von regionalem Interesse und nicht zur flächendeckenden Umsetzung und Verwertung der heute anfallenden Klärschlammaschen geeignet. Alternative Verwertungswege zeichnen sich derzeit für diesen Infrastrukturfad (SVA) nicht ab und spielen somit für eine inländische Phosphorrückgewinnungsstrategie keine Rolle.

Die restliche Menge des schweizweit anfallenden Klärschlamm (ca. 30%) kann mit regionalen Konzepten zur P-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm aufbereitet werden. Dabei kann dies einerseits auf der thermischen Trocknung und Verwertung in Zementwerk mit Hilfe des Budenheim-Verfahrens aufbauend oder durch Implementierung des EuPhoRe bzw. Pyrophos-Verfahrens erfolgen.

Wenn, wie seitens des BLW und des BAFU kommuniziert, die Phosphorströme aus dem Klärschlamm im Sinne von Art. 15 Abs. 3 VVEA so gelenkt werden sollen, dass damit für die schweizerische Landwirtschaft schadstoffarme Phosphordünger im Sinne des MinRec-Ansatzes bereitgestellt werden sollten, so muss dieses Konzept dringend weiterentwickelt werden.

Der jetzige Ansatz würde bedingen, dass die Düngerproduktion in der Schweiz stattfinden oder durch entsprechende Chargen qualitativ abgesichert im Ausland produziert würden. Beides würde, insbesondere bei der Herstellung, der im Markt dominierenden Mehrkomponentendünger, zu zusätzlichen Kosten führen. Hier müsste das BLW für eine entsprechende Finanzierungslösung besorgt sein, denn die mit der Düngerherstellung verbundenen Mehrkosten dürfen nicht auf die Abwassergebühren abgewälzt werden.

Für den Fall, dass die Produktion von Düngerkomponenten für die schweizerische Landwirtschaft im europäischen Raum stattfindet, stellt sich zudem die Frage, ob die Bestimmungen von Art. 15 Abs. 3 VVEA noch gerechtfertigt bzw. zulässig wären.

Gemäss den Grundsätzen der Umweltschutzgesetzgebung (Art. 30) müssen Abfälle umweltverträglich und, soweit möglich und sinnvoll, im Inland entsorgt werden. Dies wird zusätzlich in Art. 17 lit. c der Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA) präzisiert, wonach das BAFU für Abfälle aus der öffentlichen Abwasserreinigung nur dann eine Ausfuhr bewilligt, wenn die Entsorgung in der Schweiz nicht möglich ist oder die Ausfuhr der Abfälle im Rahmen einer vertraglich vereinbarten regionalen grenzüberschreitenden Zusammenarbeit vorgesehen ist. Da der Bau einer Anlage für die Rückgewinnung des Phosphors aus der Klärschlammmasche recht grosse Investitionen erfordert, ist es wichtig, dass seitens des Bundes eine klare und verbindliche Aussage dazu gemacht wird, ob sich der Bund auch bei der Beurteilung von Exportgesuchen für Klärschlammaschen - im Hinblick auf die Rückgewinnung und Verwertung des Phosphors - an die genannten Grundsätze hält und zwar auch dann, wenn für die Entsorgung im Ausland erheblich tiefere Preise prognostiziert werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, zur Erlangung der erforderlichen Planungssicherheit.

### 5.8 Kosten als Element der Klärschlamm Entsorgung

Im Rahmen der Fragebögen wurden die Verfahrensanbieter gebeten, die Kosten und Erlöse zu ihren Verfahren detailliert offenzulegen. Dies erfolgte mit einem sehr unterschiedlichen Detaillierungsgrad, sodass die sieben Verfahren nicht direkt miteinander verglichen werden können. Unterschiedliche Systemgrenzen und der schon eingangs erläuterte unterschiedliche Reifegrad erschwerten die Genauigkeit der Angaben zu verifizieren. Ein Experte wurde gebeten Kosten und Einnahmen auf Basis von Schweizer Rahmenbedingungen für Verfahren mit gleicher zugrundeliegender Infrastruktur anzupassen. Mit einer Vereinheitlichung der allgemeinen Betriebskosten (Grundchemikalien, Elektrizität, Dampf, Personal, Deponiekosten etc.) konnte ein **normierter, objektiver Vergleich für Verfahren mit gleicher zugrundeliegender Infrastruktur** erreicht werden. Als Basis dienten typische Marktpreise der letzten 5 Jahre. Weitere Angaben zur Normierung und eine detaillierte Kostenbetrachtung der Verfahren sind im Anhang 6 gegeben.

Für **klärschlammmaschebasierte Verfahren** wurden lediglich die beiden Verfahren ECOPHOS und Phos4Life ausgewertet, da sowohl das Sepholix-Verfahren bei CIMO als auch das ZAB-Verfahren im Kombination mit der Tiermehlverarbeitung in Bazenheid nur von regionaler Bedeutung ist und beide nur eine geringe KSA-Menge verarbeiten können. Im Kontext der schweizweit anfallenden KSA-Fracht könnten an den beiden Orten mit dem Sepholix- und ZAB-Verfahren maximal 17% der Gesamtmenge

behandelt werden. Die Behandlungskosten pro Tonne KSA liegen in der normierten Variante für ECOPHOS bei 290 CHF/t und bei Phos4Life bei 370 CHF/t. Unter der Berücksichtigung, dass diese Daten noch durch die laufende bzw. ausstehende Pilotierung bestätigt werden müssen, kann aus heutiger Sicht kein Unterschied in Behandlungskosten zwischen den beiden Verfahren sichergestellt werden.

Ein analoges Bild zeigt sich bei den drei **klärschlammbehandelnden Verfahren** EuPhoRe, Pyrophos und ExtraPhos. Es wird dabei von einem Kostenbereich zwischen 200 – 300 CHF pro Tonne trockenem Klärschlamm ausgegangen (inkl. der thermischen Behandlung des Klärschlammes). Sowohl bestehende technische Risiken als auch Absatzprobleme (Konformität mit MinRec) der Phosphorprodukte erschweren hier eine genauere Angabe zu den Kosten.

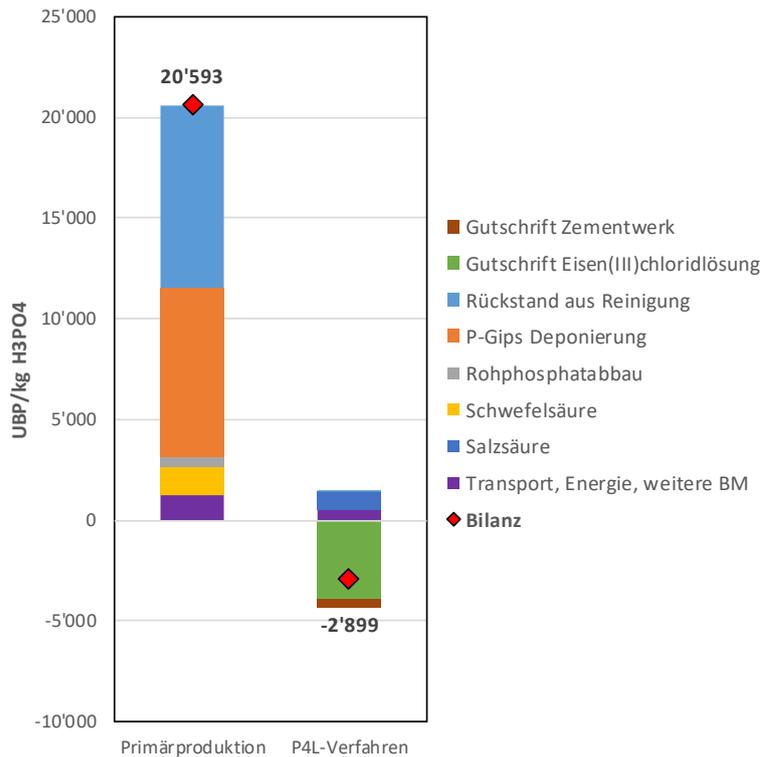
Für die Umsetzung einer möglichst effektiven Phosphorrückgewinnungsstrategie in der Schweiz bedeutet dies nun, dass alleine anhand der Kostenbetrachtung keine Verfahrensentscheide getroffen werden können. Im Vordergrund wird daher die Nutzung regionaler Synergien, Abstützung der Phosphorrückgewinnung auf die vorhandene Infrastruktur und Zusammenschlüsse der Klärschlammanscheinhaber zu einer grösseren Interessensgruppe stehen.

## 6 UMWELT / ÖKOLOGIE

Der ökologische Vergleich stellt die notwendige Legitimation eines Recyclingprozesses gegenüber dem etablierten primären Gewinnungsweg dar. Weil der Vergleich von Verfahren, welche ein klar substituierbares Produkt (wie z.B. Phosphorsäure) mit Verfahren, welche einen Dünger produzieren, sehr schwierig bzw. nicht direkt möglich ist, wurde in der Projektgruppe vereinbart, düngerproduzierende Verfahren nicht einer ökobilanziellen Betrachtung zu unterziehen. Natürlich macht ein Vergleich generell nur dann Sinn, wenn die Datenlage für ein Verfahren ausreichend ist und den Aufwand für eine ökologische Analyse rechtfertigt.

Dies war nur im Falle von P4L gewährleistet. Deshalb wird hier nur auf den Vergleich zwischen dem P4L-Prozess und der primären P-Säureproduktion eingegangen. Die ETH Zürich hat dazu eine umfassende Ökobilanz inkl. Sensitivitätsanalysen durchgeführt (Mehr & Hellweg, 2018). Als Wirkungsabschätzungsmethoden für die Abschätzung der Umweltwirkungen wurden für diesen Vergleich die Methode der ökologischen Knappheit (UBP), IPCC 2013 GWP 100a, USEtox (sowohl Öko- als auch Humantoxizität), die CExD-Methode (Mineralien) sowie ReCiPe Endpoint (H) gewählt. Die funktionelle Einheit der Ökobilanz beträgt 1 kg Phosphorsäure ( $H_3PO_4$ , 100%). Abbildung 8 zeigt den Vergleich zwischen dem P4L-Prozess und der primären P-Säureproduktion bezüglich der Methode der ökologischen Knappheit (UBP).

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad



**Abbildung 8: Ökobilanzieller Vergleich der primären Phosphorsäureproduktion mit dem P4L-Verfahren anhand der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (UBP). Quelle: Mehr&Hellweg, 2018.**

Die **Erkenntnisse** aus der Studie können wie folgt zusammengefasst werden:

Die Phosphorsäureproduktion mit dem P4L-Verfahren ist unter Schweizer Rahmenbedingungen und den Zielsetzungen des Entwicklungsprojektes in Bezug auf alle Wirkungsabschätzungsmethoden ökologisch deutlich vorteilhaft gegenüber der Primärproduktion von Phosphorsäure (Abbildung 8). Eine Substitution primärer Phosphorsäure führt demnach zu erheblichen Einsparungen von Umweltwirkungen. Einen weiteren positiven Nebeneffekt spielt dabei die Rückgewinnung der Eisen(III)chloridlösung, welche energieintensive primäre Eisen(III)chloridlösung substituieren kann. In geringem Masse wird die Umweltwirkung darüber hinaus noch durch die Gutschriften des Nebenproduktes Salzsäure und die Verwertung von Rückständen beeinflusst. Der gesamte Betriebsmittelaufwand spielt hierbei eine untergeordnete Rolle. Die Primärproduktion zieht hingegen beträchtliche Umweltwirkungen nach sich, hauptsächlich durch die cadmium-/uranhaltigen Rückstände, die zu einem grossen Teil auf direktem Weg in die Umwelt gelangen. Um Unsicherheiten der Verwertung bzw. dem Absatz der Nebenprodukte und Rückstände zu berücksichtigen sowie mögliche Fortschritte in der Umweltgesetzgebung der Primärproduktion einzubeziehen, wurde in einer Sensitivitätsanalyse für die Primärproduktion ein Best-Case- und für das P4L-Verfahren ein Worst-Case-Szenario erstellt. Selbst unter diesen für das P4L-Verfahren ungünstigsten Voraussetzungen ist aus KSA produzierte P-Säure ökologisch vorteilhaft im Vergleich zu primärer P-Säure.

Zusammenfassend weist die Produktion von technisch reiner Phosphorsäure mit dem P4L-Verfahren eine deutlich geringere Umweltbelastung als deren Primärproduktion aus Rohphosphat auf. Analoges würde auch für das ECOPHOS-Verfahren gelten, wobei dort zum heutigen Stand die Eisenrückgewinnung noch nicht gutgeschrieben werden dürfte.

## 7 ANMERKUNGEN ZUR FINANZIERUNG

Wer sich in seinem Alltag mit der Abwasserreinigung und dem Schutz der Gewässer auseinandersetzt, fühlt sich den Zielen der Gewässerschutzgesetzgebung (GSchG) verpflichtet und will nachteilige Einwirkungen auf die Gewässer vermeiden. Bei den Zielen des Gewässerschutzgesetzes geht es u.a. um die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen, um den haushälterischen Umgang mit Trink- und Brauchwasser, um den Lebensraum der Gewässer und die Sicherung der natürlichen Funktion des Wasserkreislaufs.

Einen beachtlichen Teil des Wassers, das wir in unserer Zivilisation nutzen, verwenden wir mit höchster Selbstverständlichkeit als Transportmittel, um unsere Exkremente und andere flüssige Abfälle über das Abwassersystem zu entsorgen. Letztlich geht es also darum, Abfälle zu transportieren, um diese dann später zu entsorgen.

Es ist eines der Kernanliegen des Gewässerschutzes, das Abwasser zu reinigen, bevor das kostbare Gut Wasser wieder dem Kreislauf in der Natur übergeben wird. Damit ist das Gedankengut im Gewässerschutz stark mit dem Schutz, der Sanierung und der Wiedergutmachung verbunden. Mit den Abwassergebühren wird eine Dienstleistung abgegolten, es wird ein Entgelt für einen konsumierten Nutzen entrichtet.

Wer sich in seinem Alltag mit der Entsorgung von Abfällen auseinandersetzt, der steht durch den Auftrag des Umweltschutzgesetzes in der Pflicht, diese so zu behandeln, dass diese soweit möglich verwertet werden können. Erkenntnisse und Entwicklungen der letzten 30 Jahre haben dazu geführt, dass der stoffliche und energetische Wert, der in diesen Abfällen steckt, immer konsequenter genutzt wird – nicht zuletzt, weil sich das Deponieren von unzureichend behandelten Abfällen oft als Bumerang erwiesen hat.

Wer Abfälle entsorgen will, muss für die Kosten der Entsorgung aufkommen. Dieser Grundsatz ist allgemein anerkannt, denn das Umweltschutzgesetz basiert auf dem Verursacherprinzip: Der Inhaber der Abfälle trägt die Kosten der Entsorgung. Gemäss Umweltschutzgesetz umfasst *die Entsorgung* neben der Verwertung und der Ablagerung auch die Vorstufen der Sammlung, Beförderung, Zwischenlagerung und Behandlung.

Gestützt auf das Umweltschutz- und das Gewässerschutzgesetz hat der Bundesrat am 4. Dezember 2014 die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) erlassen. Daraus geht hervor, dass aus kommunalem Abwasser, Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen und der Asche aus der thermischen Behandlung von solchem Klärschlamm Phosphor zurückzugewinnen und stofflich zu verwerten ist. Die gleiche Aufgabe geht an die Inhaber von Tier- und Knochenmehl, das nicht als Futtermittel verwertet werden kann. Dies ist eine konkrete Vorgabe, wie nach einer Übergangsfrist von zehn Jahren der Phosphor im Abwasserpfad oder in den nicht als Futtermittel verwertbaren tierischen Abfällen verwertet werden muss.

**Die zur Verwertung erforderliche Behandlung der phosphorreichen Abfälle ist ein Teil der Klärschlammentsorgung, und zwar in technischer wie auch finanzieller Sicht.**

Bei der Rückgewinnung des Phosphors aus dem Abwasserpfad sind verschiedene Akteure sehr direkt – und viele indirekt – angesprochen:

### **Kantone:**

- Die Kantone stehen in der Verantwortung. Sie sind gemäss Art 31b Ziffer 1 und Art 36 Umweltschutzgesetz dafür verantwortlich, dass u.a. Siedlungsabfälle, Abfälle aus dem öffentlichen Strassenunterhalt und der öffentlichen Abwasserreinigung entsorgt, d.h. entsprechend behandelt und verwertet werden. Selbst jene Kantone, die diese Aufgabe an Gemeinden oder Dritte delegiert haben, stehen letztlich in der Pflicht, dafür zu sorgen, dass der Klärschlamm entsprechend den Vorgaben des Bundesrates entsorgt wird.

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

Die Kantone stehen gemäss Art. 18 der Gewässerschutzverordnung weiter in der Pflicht, einen Klärschlamm Entsorgungsplan zu erstellen. Zudem haben sie gemäss Art 31b Abs. 2 die Kompetenz und Pflicht, für die Entsorgung dieser Abfälle Einzugsgebiete festzulegen und für einen wirtschaftlichen Betrieb der Abfallanlagen zu sorgen.

- Zur Finanzierung der Entsorgung von Siedlungsabfällen verfügt das Umweltschutzgesetz in Art 32a über eine deckungsgleiche Formulierung wie dies im Gewässerschutzgesetz in Art. 60 a für Bau, Betrieb, Unterhalt, Sanierung und Ersatz der Abwasseranlagen der Fall ist. Die Kantone stehen somit in der Pflicht, im Sinne dieser Bestimmungen für die Finanzierung der stofflichen Phosphorverwertung zu sorgen, unabhängig davon, wo im Prozess der im Abwasser enthaltene Phosphor zurückgewonnen wird.

### **Gemeinden oder Zweckverbände:**

- Gemeinden oder Zweckverbände, die die Aufgaben der Abwasserreinigung übernommen haben, sind für die Entsorgung des Klärschlammes verantwortlich, der in ihrem Abwasserreinigungsprozess anfällt. Damit verbunden steht künftig in der Prozesskette auch die Verpflichtung, den im Abwasser enthaltenen Phosphor nach einer entsprechenden Behandlung der stofflichen Verwertung zuzuführen.

### **Anlagenbetreiber:**

- Betreiber von Monoverbrennungsanlagen für Klärschlamm sind – vor der Deponierung der Verbrennungsrückstände – die letzten Akteure in einer Entsorgungskette, die indirekt in der Pflicht stehen, den Phosphor stofflich zurückzugewinnen, wenn dieser nicht bereits in einem vorgelagerten Prozessschritt ausgeschleust wurde.

### **Bund:**

- Der Bund kann durch eine gezielte finanzielle Förderung den Umsetzungsprozess wesentlich beeinflussen. Analysiert man nüchtern, was einer der wichtigsten Treiber in der Umsetzung der Abwasserreinigung und der Abfallbehandlung in der Schweiz in den letzten 50 Jahren war, so kommt man unweigerlich auf die finanzielle Förderung des Bundes: Er hat Pilotprojekte finanziert, Subventionen erteilt oder Bürgschaften übernommen.

## 8 EMPFEHLUNGEN DER EXPERTEN

Hier wird eine Zusammenfassung der vier eingeladenen Expertenmeinungen (Hans-Peter Fahrni, Johannes Pinnekamp, Clemens Adam und Anders Nättorp), die im Detail im Original im Anhang 5 zu entnehmen sind bzw. am Hearing wiedergegeben wurde, durch die Autorenschaft gegeben.

Aus der Einschätzung der Experten wurde die nachfolgende Bewertung der sechs am Hearing präsentierten Verfahren abgeleitet. Anschliessend werden übergeordnete und allgemeine Zusammenhänge erörtert und die Empfehlungen der Experten daraus abgeleitet.

### 8.1 Kurze Beurteilung der einzelnen Verfahren

**Phos4Life und ECOPHOS:** Es sind beides sehr vielversprechende Verfahren, die mit Phosphorsäure einen wichtigen Baustein der Düngemittelproduktion zur Verfügung stellen wollen. Stark unterschiedlich stellt sich die jeweilige Preiskalkulation und das zugrundeliegende Geschäftsmodell dar. Die Kostenschätzung von ECOPHOS erscheinen für Schweizer Verhältnisse doch sehr tief, insbesondere müssen z.B. die Erträge, welche z.B. dem Verkauf eines Nebenproduktes (Calciumchlorid) erzielt werden sollen, kritisch überprüft werden. Eine erste Überprüfung der Kostenkalkulation von ECOPHOS mit zugrundeliegenden Schweizer Verhältnissen relativiert den Kostenunterschied deutlich, so dass für beide Verfahren Behandlungskosten in ähnlicher Grössenordnung resultieren könnten (siehe Anhang 5 und 6). Die Phosphorsäure als Produkt beider Verfahren ermöglicht eine umfangreiche Verwertung. Der Hauptunterschied liegt in der eingesetzten Technologie für die Abreicherung / Reinigung der Produkte von den Schwermetallen: Ionentauscher vs. Solvent Extraktion. Über die Eignung von Ionenaustauschern zur Reinigung der rohen Phosphorsäure gibt es widersprüchliche Aussagen. Phos4Life ist ECOPHOS einen Schritt voraus bezüglich der Verwertung der Mineralik. Zudem wird die von Phos4Life gewählte Solventextraktion seit Jahrzehnten erfolgreich bei der Gewinnung reiner Phosphorsäure aus Phosphaterzen und zur Trennung von Metallen eingesetzt. Das Verfahren von Ecophos basiert auf dem Einsatz von Ionentauschern, einem in der Phosphorsäuregewinnung weniger breit eingesetzten Verfahren.

**ZAB-Verfahren:** Wird als sehr interessantes Konzept für den ZAB-Standort in Bazenheid und die Region Ostschweiz erachtet. Das Produkt TSP ist sowohl ein marktüblicher Einzelkomponentendünger als auch der wichtigste Phosphorbaustein weiterer Mehrkomponentendünger. Der ZAB würde mit diesem Verfahren ein wichtiger Akteur im Schweizer Düngemarkt, was für einen Abfallverband als keine einfache Aufgabe betrachtet wird. Das Zusammenführen der phosphorreichen Abfallströme in Kombination mit sauberer Phosphorsäure aus der Schweiz (z.B. Phos4Life, ECOPHOS) wird als sehr interessante, zu verfolgende Lösung betrachtet.

**Cimo / Sepholix:** Die Erweiterung der bestehenden Nassoxidation mit dem zugeschalteten Sepholix-Prozess wird als regional interessante Variante von Cimo eingeschätzt. Das Produkt Tricalciumphosphat (TCP) kann analog zu Rohphosphat in der Düngemittelherstellung eingesetzt werden. Die Produkterträge sind eher geringfügig. Offen ist noch die Möglichkeit bzw. Bereitschaft von Cimo, neben der eigenen KSA (lediglich 500 t) auch weitere zusätzliche externe KSA (4000 – 5000 t/a) in den heute «sauberen» Prozess aufzunehmen. Dabei gilt es Kontaminationen des heutigen Produktes TCP durch die zusätzlich angenommene KSA zu vermeiden. Die angedachte Lösung ist ein möglicher Baustein für eine regionale Klärschlamm-Verwertung und Phosphorrückgewinnung im Wallis/Westschweiz. Das Modell hat somit nur einen begrenzten, regionalen Charakter.

**Budenheim/ ExtraPhos:** Die der VTMA zu Verfügung gestellten Informationen waren nicht umfassend und der noch tiefe Entwicklungsstand hat überrascht, da das Verfahren schon länger in Entwicklung ist. Die Rückgewinnungsquote bezogen auf den Input an Klärschlamm liegt bei tiefen 30 – 35%. Diese müsste noch massiv gesteigert werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist dieses Verfahren daher nicht

empfehlenswert. Ob eine Ausbeute von 50% je erreicht werden kann, wird als wenig wahrscheinlich eingeschätzt, was nicht für eine breite Anwendung spricht. Eine Pilotierung in der ARA Bern ist jedoch ohne grosses Risiko durchführbar und wird eventuell zusätzliche Daten liefern können.

**EuPhoRe:** Wird als eine mögliche Lösung für die bestehende Infrastruktur (Drehrohrofen) bei erzo in Oftringen betrachtet. Die Einhaltung der Vorgaben der MinRec ist für dieses Verfahren noch nicht möglich und somit eine grosse Herausforderung für den Produktabsatz. Für Neuanlagen und andere Standorte in der Schweiz ist dieses Verfahren nur in Kombination mit einer KVA sinnvoll. Dabei gilt es neben der unzureichenden Produktqualität insbesondere den Risiken der Korrosion sowie Betriebsbeeinträchtigung der angeschlossenen KVA besonderes Augenmerk zu schenken.

## 8.2 Allgemeine Beurteilung und Empfehlungen der Experten

Alle Experten sind sich einig, dass eine abschliessende Beurteilung bzw. Empfehlung zu den Verfahren durch folgende Tatsachen erschwert wird:

- 1) die jeweiligen Verfahren und die Herstellung der Produkte sind technologisch sehr unterschiedlich ausgestaltet;
- 2) Entwicklungsstand bzw. technischer Reifegrad sind sehr unterschiedlich;
- 3) die Aussagen zu den spezifischen Kosten der Verfahren sind nicht direkt vergleichbar und uneinheitlich;
- 4) die Dokumentation in den Fragebögen sowie den vorgetragenen Präsentationen ist zum Teil lückenhaft.

Ein objektiver Vergleich ist somit höchstens für Verfahren möglich, die auf der gleichen Infrastruktur aufbauen, das heisst zum Beispiel klärschlamm- oder aschebasierte Verfahren oder diejenigen, die gleiche Produkte erzeugen. So wird im Falle der aschebasierten, phosphorsäureproduzierenden Verfahren ECOPHOS und Phos4Life der grösste Unterschied in der jeweils angewendeten Verfahrenstechnik zur Reinigung der Phosphorsäure von den enthaltenen Schwermetallen gesehen. Während die Solvent-Extraktion als Standardtechnologie in der heutigen primären Phosphorsäureproduktion gilt, wird der Prozess des Ionenaustauschs dort bisher nicht nur in wenigen Anwendungen für Aufreinigung von Phosphorsäure eingesetzt. Die Eignung dieser beiden technischen Prozesse für die gestellte Aufgabe muss sich daher durch fundierte, transparent nachvollziehbare Daten aus den laufenden (P4L) bzw. ausstehenden (ECOPHOS) Pilotierungen nachweisen. Anschliessend wird ein fairer und transparenter Wettbewerb dieser beiden Verfahren als wichtiger Schritt angesehen, da deren Produkt Phosphorsäure den zentralen Baustein in einer Schweizer Phosphorrückgewinnungsstrategie einnehmen könnte (vgl. Kap. 0). Erst nach dem Vorliegen gesicherter Daten aus einer repräsentativen Pilotierung sind belastbare Aussagen zu den spezifischen Verfahrenskosten möglich.

Dieser Umstand zeigt sich insbesondere in den von den Verfahrensanbietern gemachten **Kostenangaben**. Diese sind – trotz grosser Sorgfalt bei der Vorbereitung der Abfrage – kaum vergleichbar. Dies hat mehrere Gründe: (1) Nicht allen Berechnungen liegt das hohe Schweizer Preisniveau zugrunde. (2) Schnittstellen einzelner Anlagen sind – trotz Befragung im Fragebogen – nicht genau erkennbar. (3) Um Interesse an ihrem Verfahren zu wecken, haben Anbieter «taktische» Kostenangaben gemacht, die im Rahmen konkreter Verhandlungen höher ausfallen können. (4) Die Kostenschätzungen insbesondere für den Bau der Anlagen und deren elektromechanische bzw. chemisch-verfahrenstechnische Ausrüstung können meist nicht im Detail überprüft werden, weil die technische Auslegung der vorgesehenen Behandlungsanlagen zur Phosphorrückgewinnung nicht offengelegt wurde (Prozess-

schritte/ Dimensionierung/ Materialisierung der Prozesse, erwartete Standzeiten). Um diesen Tatsachen Rechnung zu tragen und eine objektivere Gegenüberstellung ähnlicher Verfahren zu ermöglichen, erfolgte die Kostenbetrachtung unter Einbezug der Schweizer Rahmenbedingungen (siehe dazu auch Anhang 5 und 6).

Die bei den einzelnen Verfahren entstehenden **Produkte** sind unterschiedlich, daher adressieren sie auch unterschiedliche Märkte. Dies wird insbesondere bei den Verfahren ersichtlich, die einen Dünger bzw. Düngerrohstoff produzieren. Ein wichtiger Punkt dabei sind der Düngemarkt und die Vermarktung der entstehenden Produkte. Hierzu sind noch viele Punkte zu klären / zu diskutieren, insbesondere auch der Export. So produzieren die Verfahren EuPhoRe, ExtraPhos und Sepholix keine Standarddüngerprodukte, wodurch einerseits geringere Produkterlöse bzw. andererseits Schwierigkeiten beim Produktabsatz gesehen werden. Verallgemeinert kann für düngerproduzierende Verfahren folgendes festgehalten werden:

- Es wird nicht als sinnvoll erachtet, wenn in der kleinen Schweiz viele verschiedene Produkte / Märkte entwickelt werden. Es wird empfohlen die Kräfte zu bündeln und nach gesetzeskonformer gleichbleibender Qualität zu produzieren. Nur so wird die Düngerindustrie ein Interesse daran haben. Partnerschaften mit Düngerunternehmen oder mehrere alternative Abnehmer sind nötig für die Absatzsicherung. Die starke Marktkonzentration und die Stellung im Düngemarkt von ICL und Landor/Fenaco sind dabei zu beachten.
- Vor weiteren Entscheidungen zum noch nicht ausreichend entwickelten ExtraPhos-Verfahren von Budenheim müssen die Versuche in Mainz und allenfalls in Bern abgewartet werden. Es ist aber nicht erkennbar, dass das Verfahren eine zentrale Rolle für die Schweiz spielen wird.
- Die beiden vorgestellten, regionalen Konzepte und an existierende Anlagen gebundenen Projekte (ZAB und Sepholix/CIMO) sollten weiterverfolgt werden. Sie sind im Falle von CIMO von lokalem und im Falle von ZAB regionalem oder nationalem Interesse. Letzteres deshalb, da das designierte Produkt TSP einen problemlosen Einstieg in den nationalen/internationalen Düngemarkt als Standardkomponente gewährleistet und in Kombination mit anderen Verfahren eine Möglichkeit zur eigenen Schweizer Phosphordüngemittelversorgung bieten könnte.
- Für das scheinbar ausgereifte EuPhoRe-Verfahren mit noch offenen Fragen zur Einhaltung der geplanten Vorgaben für MinRec-Recyclingdünger wird nur die Kombination mit einer KVA als zielführend erachtet.
- Falls ExtraPhos, EuPhoRe (und auch das nicht an der VTMA direkt beteiligte PyroPhos-Verfahren) erfolgreich hochskaliert werden, könnten diese Verfahren in der Schweiz ergänzend eingesetzt werden, um die zukünftig nicht mittels Monoverbrennung behandelte Klärschlammmenge einer Phosphorrückgewinnung zuzuführen.

Die **Umsetzung** der Phosphor-Rückgewinnung aus dem Abwasserpfad bis 2026 wird aber mit der aktuellen Ausgangslage als möglich erachtet. Die an den beiden Tagen präsentierten Lösungen können in zielführender Kombination als Lösung für die Schweiz angesehen werden, deren Umsetzung scheint machbar. Zentrale Anlagen zur Phosphorsäureproduktion aus KSA, kombiniert mit der Düngemittelproduktion (TSP) aus mehreren Ausgangsmaterialien bzw. Zwischenprodukten, stehen dabei im Vordergrund. Regionale Konzepte, die sich an lokalen Infrastrukturen orientieren und dies als Synergievorteil nutzen können, runden das mögliche Gesamtpaket ab.

Es wird daher empfohlen, auf die Infrastruktur abgestimmte **Lösungen parallel weiter zu verfolgen** und in zirka einem Jahr ein Update dieser Standortbestimmung vorzunehmen. Dabei ist auch zu klären, welche ökologischen Auswirkungen die Verfahren an bestimmten Standorten haben.

Abschliessend wird den Mitgliedern der Projektgruppe empfohlen, den **Schwung im Thema Phosphor-Rückgewinnung bzgl. der Umsetzung unbedingt beizubehalten** und gleich dynamisch wei-

terzuziehen. Es sollte verhindert werden, dass Know-how und personelle Ressourcen/zentrale Personen bei den verschiedenen Stakeholdern (Lieferanten, Behörden etc.) als Folge von längeren Verzögerungen verloren gehen.

## 9 WORKSHOP WORLD-CAFÉ

Eine Zusammenfassung der Gruppenarbeiten zu den prioritären Themen und Fragen aus Sicht der Teilnehmer am Hearing ist im Anhang 7 enthalten. Die wichtigsten Erkenntnisse daraus sind auch im nachfolgenden Kapitel enthalten.

## 10 FAZIT UND WEITERES VORGEHEN

Mit der Einführung der Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad will der Bund schwermetallarme Dünger aus sekundären Quellen der Landwirtschaft zuführen. Das Ziel ist, die aktuellen Phosphorimporte in Form von Mineraldüngern von ca. 4'200 t/a durch saubere, sekundäre Produkte aus dem Abwasserpfad zu ersetzen. Führt man sich vor Augen, dass in den Schweizer Abwasserbehandlungsanlagen zum Schutz der Gewässer jährlich ca. 6'000 t Phosphor abgetrennt werden, so verfügt die Schweiz über genügend eigene Phosphorquellen zur Substitution der ökologisch nachteiligen primären, uran- und kadmiumbelasteten Mineraldünger. Rein rechnerisch ergibt sich aus dieser Zielsetzung ein minimal geforderter Gesamtwirkungsgrad der Phosphorrückgewinnung von 70%.

Wenn die zeitgerechte Umsetzung der VVEA-Anforderung zur Phosphorrückgewinnung erreicht werden soll, müssen sich die Verfahren zwingend an der bestehenden Infrastruktur orientieren (Abbildung 9). Diese besteht derzeit zu 64% aus Klärschlammverwertung in Schlammverbrennungsanlagen (SVA). Im Sinne eines zielgerichteten Phosphorminings wird diesem Pfad wegen seiner heutigen Bedeutung eine wichtige Rolle zukommen. Sollten in den kommenden Jahren noch weiter(e) Monoverbrennungsanlagen gebaut werden – wie derzeit am Standort der erzo in Oftringen in Planung – so könnte der Mengenanteil des in der Klärschlammmasche zwischengelagerten Phosphors für die nachfolgende Rückgewinnung weiter zunehmen.

Von den klärschlammmaschebehandelnden Verfahren sind derzeit diejenigen zu favorisieren, die hochwertige, saubere Phosphorsäure als universellen und marktüblichen Baustein zur Düngemittelversorgung bereitstellen. Die Phosphorausbeute liegt bei diesen Verfahren bei mehr als 90%. Mit dieser sauberen Säure könnten weitere sekundäre Phosphorprodukte der Schweizer Klärschlammverwertung veredelt werden, beispielsweise durch eine Kombination mit dem ZAB-Verfahren. Die Verwendung der Phosphorsäure ist in in- oder ausländischen Industriezweigen bis hin zur Düngemittelproduktion uneingeschränkt möglich.

Bei den klärschlamm-basierten Verfahren muss ein besonderes Augenmerk auf die erzielbaren Produktqualitäten und die Marktfähigkeit der Produkte gelegt werden. Beim Absatz der Phosphorprodukte sollten die Anlagenbetreiber als Zulieferer der Düngemittelindustrie agieren und nicht direkt Düngemittelprodukte an die Landwirte absetzen wollen. Erkenntnisse aus der VTMA bestätigen, dass es im heutigen Markt für bereits etablierte Produkte (TCP) erfolgversprechende Wege gibt. Dabei ist zu beachten, dass die Schweiz nicht mehr über eine Infrastruktur zur Düngemittelproduktion verfügt. Diese müsste durch Interessenten oder eine zukünftige Trägerschaft erst noch aufgebaut werden. Alternativ dazu kann TSP als Commodity auch problemlos in die europäische Düngemittelproduktion einfließen; so können etablierte Prozesse optimal genutzt werden. Die Produzenten müssten dabei sicherstellen, dass die Qualitätsvorgaben für Schweizer Dünger (analog zu MinRec) eingehalten werden.

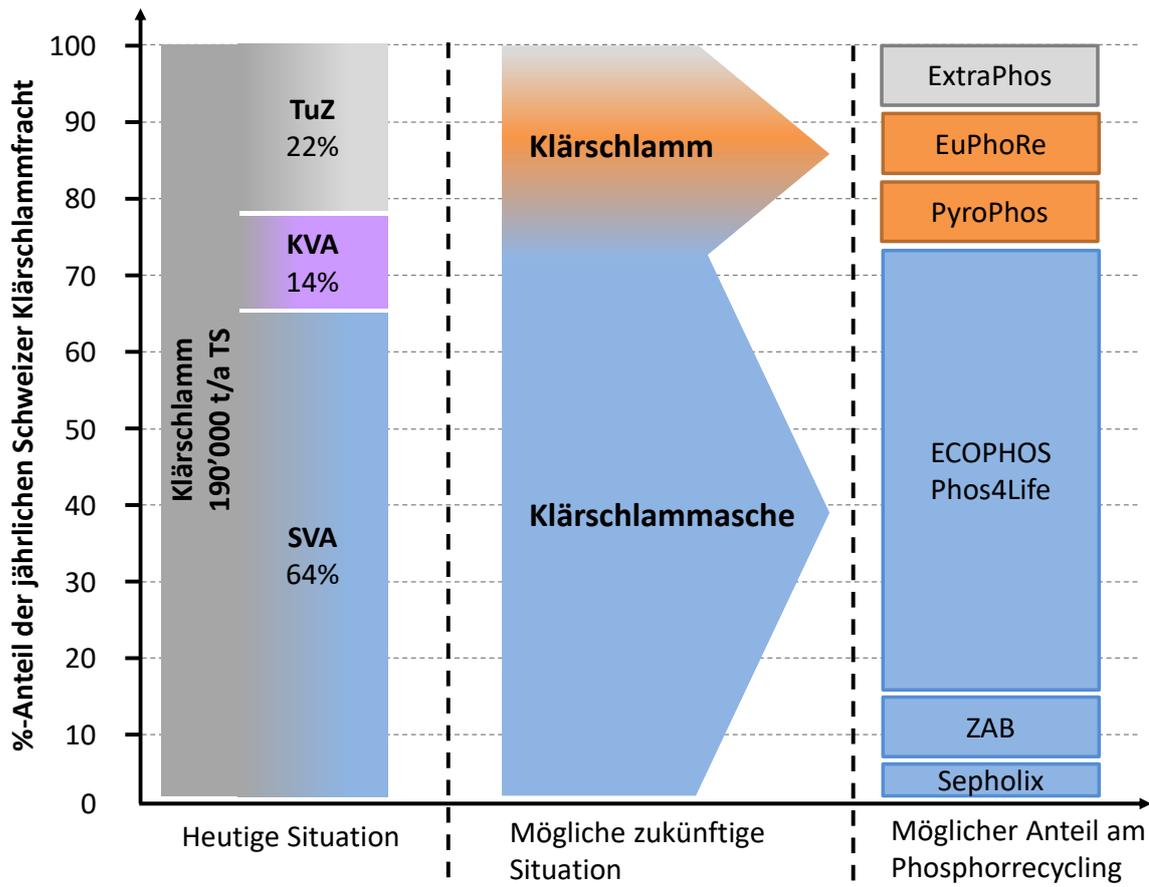


Abbildung 9: Heutige und mögliche Infrastruktur zur Klärschlammverwertung in der Schweiz mit den potenziell möglichen Verfahren.

### Kosten als Teil der Klärschlammbehandlung

Die von den Verfahrensanbietern gemachten Kostenangaben sind noch unvollständig und z.T. schlecht vergleichbar. Nicht allen Berechnungen liegt das hohe Schweizer Preisniveau zugrunde, Schnittstellen sind z.T. unterschiedlich und nicht einfach erkennbar. Auch haben einzelne Anbieter «taktische» Kostenangaben gemacht, die im Rahmen konkreter Verhandlungen höher ausfallen können. Kosten für den Bau der Anlagen können zudem meist nicht im Detail überprüft werden, weil die technische Auslegung noch nicht im Detail bekannt ist. Angesichts dieser hohen Unsicherheiten wurde von einem Experten eine Kostenschätzung für Schweizer Rahmenbedingungen gemacht. Für phosphorsäureproduzierende aschebasierende Verfahren könnten die Kosten im Bereich von  $330 \pm 40$  CHF/t KSA ermittelt werden. Für klärschlammverwertende Verfahren liegen die Kosten im Bereich von  $260 \pm 50$  CHF/t trockenem Klärschlamm (inkl. der thermischen Verwertung des Klärschlammes). Umgerechnet auf eine Tonne KSA werden die Kosten für diese Verfahren zwischen 400 – 600 CHF liegen (bei 50 % organischem Anteil im Klärschlamm).

Wird bei einer typischen mittleren Schweizer Kläranlage ein Kilogramm Phosphor aus dem Abwasserstrom abgetrennt, entstehen Kosten von ca. 15 CHF. Bei klärschlammmaschebasierte Verfahren, die Phosphorsäure produzieren, kostet die Rückgewinnung eines Kilogramms Phosphor ca. 5 CHF. Der Marktwert eines Kilogramms primär produzierter Phosphorsäure liegt bei 2 – 3 CHF.

## 10.1 Empfehlungen der Experten

Es wird empfohlen, **mehrere Lösungen parallel weiterzuverfolgen** und in zirka zwei Jahren wieder eine Standortbestimmung vorzunehmen. Bessere Kostenschätzungen mit identischen Rahmenbedingungen für die Schweiz sowie analoge Systemgrenzen sind dabei zwingend. Dafür ist es zielführend, wenn sich Akteure der gleichen Infrastruktur zusammenschliessen und in Vorprojekten genauere und belastbarere Angaben zu den Risiken und Kosten erarbeiten.

Nach Möglichkeit sind **Synergien in der Schweiz** zu nutzen. Diese könnten darin bestehen, dass mit Phos4Life bzw. ECOPHOS Phosphorsäure produziert wird und ZAB diese zur TSP-Produktion nutzt.

Es wird den Mitgliedern der Projektgruppe empfohlen, den **Schwung im Thema Phosphor-Rückgewinnung unbedingt beizubehalten** und gleich dynamisch weiterzuziehen. Es sollte verhindert werden, dass Know-how und personelle Ressourcen/zentrale Personen bei den verschiedenen Stakeholdern (Lieferanten, Behörden etc.) wegen längeren Verzögerungen verloren gehen.

### ***Empfehlungen zu Verfahren zur Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche:***

Es wird empfohlen, die beiden phosphorsäureproduzierenden Verfahren Phos4Life und ECOPHOS einem direkten Vergleich zu unterziehen. Die bisherige Datenbasis des ECOPHOS Verfahrens ermöglicht wegen der fehlenden technischen Reife keinen direkten Vergleich. Legt man dem ECOPHOS-Verfahren übliche Schweizer Marktpreise zugrunde (vgl. Anhang 7), könnten Kosten in der Grössenordnung derjenigen des Phos4Life-Verfahrens resultieren. Nach Abschluss der jeweiligen Pilotierungsphase bis Ende 2018 sollte zudem die technische Machbarkeit beider Verfahren verglichen werden. Auf der Grundlage dieser Daten kann dann ein fundierter Entscheid zur Anwendung eines der beiden phosphorsäureproduzierenden Verfahren getroffen werden.

### ***Empfehlungen zu Verfahren mit Produktion eines Düngerrohstoffes:***

- Es wird empfohlen die Kräfte zu bündeln und nach gesetzeskonformer gleichbleibender Qualität zu produzieren. Es wird in der kleinen Schweiz als nicht erfolgversprechend eingeschätzt, viele verschiedene Produkte / Märkte zu entwickeln.
- Vor weiteren Entscheidungen zum noch nicht ausreichend entwickelten ExtraPhos-Verfahren von Budenheim müssen die Versuche in Mainz und gegebenenfalls in Bern abgewartet werden. Dem Verfahren wird für die Schweiz aber keine zentrale Rolle attestiert.
- Die beiden vorgestellten Projekte, die an existierende Anlagen angelehnt und regional verankert sind (ZAB und CIMO), sollten weiterverfolgt werden.
- Das EuPhoRe-Verfahren wird nur in Kombination mit einer KVA als zielführend erachtet. Als interessant werden mögliche Synergien zum mit dem ZAB-Verfahren eingeschätzt.

## 10.2 Fazit und Empfehlungen der VTMA-Projektgruppe

### Fazit der VTMA-Projektgruppe:

Für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad stehen vielversprechende Verfahren zur Verfügung. Das Recycling von Phosphor ist gegenüber dem Abbau ökologisch deutlich vorteilhafter, wie an einem Beispiel eindrücklich gezeigt wird. Die vorgestellten Lösungen weisen einen sehr unterschiedlichen Entwicklungsstand auf. Zusammen mit den in der Schweiz geltenden Rahmenbedingungen lässt dies im heutigen Zeitpunkt noch keinen Verfahrensentscheid zu. In dieser Situation einfach abzuwarten ist keine Lösung. Koordination ist notwendig, aber auch das reicht nicht. Die präsentierten technischen Lösungsansätze müssen von den Akteuren weiter konkretisiert werden. In Kenntnis eines besseren Wissensstandes können dann in rund zwei Jahren, unter Berücksichtigung der P-Vermarktungssituation, die richtigen Systementscheide getroffen werden.

**Aus Sicht der VTMA-Projektgruppe gibt es anhand der gewonnenen Erkenntnisse acht wesentliche Empfehlungen. Hinzu kommen vier Anträge an das BAFU.**

Hier die Empfehlungen:

- 1) Die in der VTMA präsentierten Lösungen sind weiter auszuarbeiten und in der Umsetzung voranzutreiben. Basierend auf den Rahmenbedingungen der schweizerischen Gesetzgebung und mit vergleichbaren Systemgrenzen sind fundierte Kostenkalkulationen vorzunehmen, Stoffflüsse zu definieren und Umweltauswirkungen zu ermitteln.
- 2) Diese Erkenntnisse sollen bis in zirka zwei Jahren vorliegen und in einer erneuten VTMA ausgewertet werden.
- 3) Den Kantonen wird empfohlen, mit den für die Abwasserreinigung und Klärschlamm Entsorgung verantwortlichen Akteuren zeitnah ihr Klärschlamm Entsorgungskonzept so anzupassen, dass damit die Entsorgungssicherheit für Klärschlamm unter den neuen Rahmenbedingungen der Phosphorrückgewinnung inklusive der Nutzung der Mineralik ab Anfang 2026 gewährleistet werden kann.
- 4) Den Akteuren, die auf den gleichen Infrastrukturfad zur Entsorgung des Klärschlammes setzen, wird eine enge Zusammenarbeit für die Phosphorrückgewinnung empfohlen. Dies bedeutet konkret in einem ersten Schritt, im Rahmen von Pilotversuchen oder Vorprojekten gemeinsam in die Weiterentwicklung der favorisierten Lösungsansätze zu investieren.
- 5) Zur Nutzung möglicher Synergien wird im Hinblick auf die Vermarktung der Produkte empfohlen, Zwischenprodukte bzw. Produkte der einzelnen Lösungsansätze zu kombinieren.
- 6) Die Inhaber kommunaler Abwasseranlagen werden eingeladen, im Sinne von Art. 60 a Ziffer 3 GschG die entsprechenden Kosten in der Finanzplanung der kommenden Jahre zu berücksichtigen, damit die Finanzierung der Phosphorrückgewinnung im Sinne der VVEA umgesetzt werden kann.
- 7) Von zentraler Bedeutung für die Weiterverfolgung von Lösungsansätzen zur Phosphorrückgewinnung ist die Frage, ob und inwiefern die Entsorgung des Klärschlammes aus öffentlichen Abwasseranlagen einschliesslich Rückgewinnung des Phosphors innerhalb der Schweiz zu erfolgen hat. Diese Frage soll einerseits im Hinblick auf die Entsorgungssicherheit im Sinne

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

von Art. 30 Abs. 3 USG, andererseits im Hinblick auf die Versorgungssicherheit mit lebenswichtigen Gütern im Sinne von Art. 4 Abs. 2 LVG geklärt werden.

Ebenfalls ist zu prüfen, unter welchen Bedingungen die Entsorgung des Klärschlammes inklusive P-Rückgewinnung aus industriellem Abwasser im Ausland erfolgen kann, da diese gemäss VeVA nicht unter den Art. 17 fallen.

- 8) Wenn es im Interesse des Gesetzgebers liegt, die Phosphorressourcen aus dem Klärschlamm zu nutzen, um der schweizerischen Landwirtschaft schadstoffarme Dünger zur Verfügung zu stellen (Bodenschutz und Versorgungssicherheit in der Schweiz), muss dafür gesorgt werden, dass die qualitativen Anforderungen aus MinRec auch für primäre Dünger gelten und diese in der Praxis umgesetzt werden.

Die Anträge an das Bundesamt für Umwelt (BAFU):

- I. Das BAFU wird eingeladen, in enger Absprache mit dem Bundesamt für wirtschaftliche Landesversorgung und dem Bundesamt für Landwirtschaft, sich zeitnah zur Frage zu äussern, ob und inwiefern die Entsorgung des Klärschlammes aus öffentlichen Abwasseranlagen einschliesslich Rückgewinnung des Phosphors innerhalb der Schweiz zu erfolgen hat. Ebenfalls ist zu prüfen, unter welchen Bedingungen die Entsorgung des Klärschlammes inklusive P-Rückgewinnung aus industriellem Abwasser im Ausland erfolgen kann.
- II. Das BAFU wird eingeladen, im Sinne der Bestimmungen der VVEA eine Aussage darüber zu machen, wann eine Behandlung und Verwertung des Phosphors aus dem Abwasserpfad dem Stand der Technik (insbesondere bezüglich P-Rückgewinnungsgrad) entspricht.
- III. Das BAFU wird eingeladen zu klären, unter welchen Bedingungen für die Errichtung von Anlagen zur Rückgewinnung des Phosphors aus dem Klärschlamm a) Risikogarantien im Sinne von Art. 64a GSchG gewährt und b) finanziell unterstützt werden könnten.
- IV. Falls es sich erweisen sollte, dass für eine bestehende Infrastruktur zur Klärschlamm Entsorgung keine geeigneten Verfahren zur P-Rückgewinnung zur Verfügung stehen und die Amortisation der getätigten Investitionen nachweislich über das Jahr 2025 hinausreicht, müsste in Erwägung gezogen werden, dass für diese Entsorgungseinheiten über das Datum vom 1.1.2026 hinaus eine Fristverlängerung festgelegt wird.

### Weiteres Vorgehen:

Um die, mit dem Projekt VTMA entstandenen Kontakte weiter zu pflegen und in einem späteren Zeitpunkt erneut eine Verfahrenstechnische Marktanalyse (VTMA) durchführen zu können, haben die Projektpartner der VTMA, also die Klärschlammhalter und die relevanten Verbände, am 30. April 2018 beschlossen, die bestehende Organisation als «Plattform VTMA» weiter zu führen. Wenn im August 2018 der Vorgehensvorschlag für die weiteren Tätigkeiten vorliegt, können sich unter der Voraussetzung der finanziellen Beteiligung weitere Akteure (Klärschlammhalter) als Projektpartner der Trägerschaft anschliessen.

**11 ABKLÜRZUNGSVERZEICHNIS**

ARA	Abwasserreinigungsanlage
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (des Kantons Zürich)
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
CIMO	Compagnie industrielle de Monthey SA
EKS	Gefaulter und entwässerter Klärschlamm (mit 30% Trockensubstanz)
EW	Einwohner
GeschG	Gewässerschutzgesetz
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Phosphorsäure
KS	Klärschlamm
KSA	Klärschlammasche
KVA	Kehrichtverwertungsanlage
MinRec	Mineralischen Recyclingdünger (MinRec-Dünger); Projekt „Mineralische Recyclingdünger“ (MinRec) des BLW, das sich mit der Entwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen beschäftigt
NPK	Mehrkomponentendünger (Stickstoff-Phosphor-Kalium-Dünger)
OKI	Organisation Kommunale Infrastruktur
P	Phosphor
P4L	Phos4Life-Verfahren
SVA	Schlammverbrennungsanlage
t	Tonnen
TR	Técnicas Reunidas SA
TS	Trockensubstanz
TCP	Tricalciumphosphat
TSP	Triplesuperphosphat (Phosphordünger)
TuZ	Trocknung und Verwertung in Zementwerk
USG	Umweltschutzgesetz
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung)
VeVA	Verordnung über den Verkehr mit Abfällen
VSA	Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
VBSA	Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen
VTMA	Verfahrenstechnische Marktanalyse
ZAB	Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid

## 12 LITERATUR

Mehr J. & Hellweg S. (2018), Studie zum ökologischen Vergleich der Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche mit dem Phos4Life-Verfahren mit der Primärproduktion von P-Säure aus Rohphosphat, Endbericht, ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwissenschaften, Gruppe Ökologisches Systemdesign.

Nättorp A. & Remmen Ch. (2015), Life Cycle Cost, P-REX-Project, Amsterdam, 11. Juni 2015

Remy C. & Jossa P. (2015). Life Cycle Assessment of selected processes for P recovery from sewage sludge, sludge liquor, or ash. Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency. P-REX Project.

**ANHANG 1:        PROJEKTPARTNER**

<b>Name, Vorname</b>	<b>Organisation</b>	<b>E-Mail</b>	<b>Gruppen, Rolle</b>
Ammann, Beat	ara region bern ag	beat.ammann@arabern.ch	PG, STG
Bianculli, Claudio	ZAB Bazenheid	claudio.bianculli@zab.ch	PG
Blatter Edi	SATOM SA	Edi.Blatter@satomsa.ch	PG
Gremaud, Gabriel	Saidef SA Freiburg	Gabriel.Gremaud@saidef.ch	PG, STG
Hartmann, Jacques	erzo Zofingen	Jacques.Hartmann@erzo.ch	PG
Maisonnier, Blandine	Cimo SA	blandine.maisonnier@cimo.ch	PG
Müller, Peter	ARA Rhein AG, Pratteln	peter.mueller@ararhein.ch	PG
Stucky, Franz	Lonza Visp	franz.stucky@lonza.com	PG, STG
Wiederkehr, Peter	ERZ Zürich	Peter.Wiederkehr.erp@zuerich.ch	PG
Zässinger, Alain	ProRheno Basel	alain.zaessinger@prorheno.ch	PG, SG
Zumstein, Martin	REAL-Abwasser Luzern	martin.zumstein@real-luzern.ch	PG
Quartier, Robin	VBSA	quartier@vbsa.ch	PG
Bukowiecki, Alex	OKI	alex.bukowiecki@staedteverband.ch	PG
Hasler, Stefan	VSA	<a href="mailto:Stefan.hasler@vsa.ch">Stefan.hasler@vsa.ch</a>	PG
Abegglen, Christian		<a href="mailto:christian.abegglen@vsa.ch">christian.abegglen@vsa.ch</a>	
Egli, Christoph		<a href="mailto:christoph.egli@ava-altenrhein.ch">christoph.egli@ava-altenrhein.ch</a>	
Adam, Franz	AWEL Zürich	franz.adam@bd.zh.ch	STG
Morf, Leo	AWEL Zürich	leo.morf@bd.zh.ch	Bericht
Meyer, Jürg	HOLINGER AG	Juerg.Meyer@holinger.com	Moderation
Zumbühl, Thomas	HOLINGER AG	thomas.zumbuehl@holinger.com	Koordination

Legende: PG Projektgruppe, STG Steuergruppe,

## ANHANG 2: EXPERTEN UND GÄSTE

Die Steuergruppe hat der Projektgruppe die folgenden Experten und Gäste vorgeschlagen und sie für das Hearing eingeladen.

### Fachexperten:

Die Fachexperten werden im Hearing für die Bewertung der Verfahren einbezogen, da sie folgende Expertise mitbringen:

Person	Funktion/Organisation	Begründung
Dr.-Ing., Universitätsprofessor, Johannes Pinnekamp	RWTH Aachen, Leiter Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Leiter DWA-Arbeitsgruppe «Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm»	Experte in Deutschland im Bereich Abwasserreinigung, Phosphorrückgewinnung, Gesamtbetrachtungen und Politik.
Dr. Anders Nättorp	FHNW, School of Life Sciences, Institute for Ecopreneurship, P-REX-Projektleiter	Verfahren, Gesamtsystembetrachtungen, ökologische Expertise
Clemens Adam	Privat, ehemaliger Geschäftsführer einer Abfallbehandlungsanlage, Sicherheitsingenieur EKAS	Anlagebau/-betrieb, Experte für Verfahrenstechnik und Sicherheitstechnik
Dr. Hans-Peter Fahrni	Senior Consultant im Bereich Abfallwirtschaft, Ehem. Abteilungsleiter der Abteilung Abfall, BAFU	Experte für Abfallwirtschaft, Verfahren, Verfahrenstechnik, Gesamtbetrachtungen und Politik.

### Markt-Experten:

Die Marktexperten wurden vorgängig für ein Referat über den Schweizer Düngemarkt in der Projektgruppensitzung am 22. November 2017 eingeladen.

Person	Funktion/Organisation	Begründung
Jürg Friedli und Michael Müller	Geschäftsführer LANDOR, fenaco Leiter Marketing LANDOR, fenaco, Mitglied der Geschäftsleitung	Kennt CH-Dünger-Markt, LANDOR ist grösster Player im CH-Dünger-Markt (>70%)
Eva Optiz, als Vertretung von Dr. Rainer Schnee	Projektleiterin bei Budenheim	Kennt P-Recycling Verfahren und den Phosphor-Markt

### Gäste:

Durch die Vertretung des BAFU und des BLW bei den Hearings wurde die Vernetzung zu den für die P- Rückgewinnung zentralen Bundesstellen sichergestellt.

Person	Funktion/Organisation	Begründung
Dr. M. Monteil	BAFU-Abteilungsleiter Abfall/Rohstoffe	BAFU als Gast
Dr. K. Schenk	BAFU-Phosphorrecycling	BAFU als Gast
Dr. M. Zimmermann	BLW Agrarumweltsysteme & Nährstoffe	BLW als Gast

**ANHANG 3: ANBIETER UND VERFAHREN****I. Anbieter mit Verfahren, deren Umsetzung in der Schweiz möglich ist (vorgesehen für detaillierte Bewertung in der VTMA)**

Verfahren	Anbieter / Firma	Personen / Kontakt	Link	Begründung für Wahl	Hearing
A ExtraPhos®	Budenheim	Dr. Rainer Schnee (Leiter Innovation und New Business Development, Budenheim) und Eva Opitz (Projektleiterin) und Beat Ammann (ara region birm ag)	<a href="https://www.budenheim.com/">https://www.budenheim.com/</a>	Vorschlag ARA Birm: Erfolgversprechendes Verfahren für die Variante ARA mit bestehender Infrastruktur zur Klärschlammverwertung im Zementwerk.	Ja
B EuPhoRe®	EuPhoRe GmbH	Frank Zepke	<a href="http://euphore.de/">http://euphore.de/</a>	Vorschlag ERZO (Spezial-Variante mit vorhandenem Drehrohr zur direkten Produktion eines Düngers).	Ja
C ZAB-Verfahren	ZAB Bazenheid	Claudio Bianculli (ZAB Bazenheid)	<a href="http://www.zab.ch">www.zab.ch</a>	Vorschlag ZAB: Mineralisierung von phosphorhaltigen Abfällen mit anschließender Veredelung der Asche zu Dünger.	Ja
D Phos4Life	Stiftung ZAR und Técnicas Reunidas (TR)	Dr. Stefan Schlumberger (ZAR) und Angél Galindo Carbaljo (TR)	<a href="https://zar-ch.ch">https://zar-ch.ch</a>	Vorschlag AWEL/ERZ: Von ZAR mit Técnicas Reunidas entwickeltes Verfahren zur P-Säureproduktion aus Asche aus bestehender Klärschlammmonverbrennung	Ja
E TetraPhos®	REMONDIS Aqua GmbH & Co. KG	Dr. Martin Lebek	<a href="http://www.remondis-aqua.de">http://www.remondis-aqua.de</a>	Vorschlag der Steuergruppe (interessante allfällige Alternativvariante zu Phos4Life)	Nein
F ECOPHOS	ECOPHOS s.a.	Dr. Rob de Ruiter	<a href="http://www.ECOPHOS.com">http://www.ECOPHOS.com</a>	Vorschlag Steuergruppe (interessante allfällige Alternativvariante zu Phos4Life)	Ja
G CIMO/ Sepholix	Cimo Industrial Company Monthey SA	Blandine Maisonnier und Rebecca Rutler	<a href="https://www.cimo.ch">https://www.cimo.ch</a>	Vorschlag Steuergruppe (interessante allfällige Alternativvariante zu Phos4Life und ECOPHOS)	Ja

**II. Anbieter mit Verfahren, die mit grösster Wahrscheinlichkeit nur im Ausland angeboten werden (im Sinne einer weitgefächerten Umfeldbeobachtung in der VTMA trotzdem berücksichtigt mit qualitativer nicht detaillierter Bewertung)**

<p>H</p> <p>ICL, RECOPHOS-Verfahren</p>	<p>ICL, Tenova Bateman Verfahren</p>	<p>ICL Fertilizers Bekannt sind zwei Alternativen:</p>	<p>ICL Fertilizers Deutschland GmbH</p>	<p>Kees Langeveld, Vice President Business Development ICL Europe</p>	<p><a href="http://www.iclfertilizers.de">http://www.iclfertilizers.de</a></p>	<p>Vorschlag Steuergruppe: Erfolgversprechende allfällige Alternativvariante zu Phos4Life und ECOPHOS.</p>	<p>Nein</p>
---	--------------------------------------	--	---	---	--	--	-------------

Erläuterung zu H:

ICL, RECOPHOS: Thermisches Verfahren zur Gewinnung von P4 und abgeleitete Produkte (Lebensmittelqualität d. Phosphorsäure) aus KSA. Aufnahme von 400.000 Tonnen/Jahr Aschell (auch gemäss EPB-Studie vielversprechende Alternative)

ICL, Tenova Bateman Verfahren: Lebensmittelqualität der Phosphorsäure aus KSA mit Einsatz von Rücklauf Salzsäure (Abfallsäure).

**III. Weitere Anbieter mit Verfahren deren Umsetzung in der Schweiz möglich ist (nicht vorgesehen für detaillierte Bewertung in der VTMA)**

<p>I</p> <p>LEACH-PHOS®</p>	<p>BSH Umweltservice AG</p>	<p>Siegfried Reithaar, <a href="mailto:siegfried.reithaar@bsh.ch">siegfried.reithaar@bsh.ch</a></p>	<p><a href="https://www.bsh.ch">https://www.bsh.ch</a></p>	<p>Anfrage von Anbieter, da aber sehr ähnlich wie Phos4Life, wird auf eine Präsentation am Hearing verzichtet.</p>	<p>Nein</p>
<p>J</p> <p>Pyrophos</p>	<p>AVA Altenrhein und CTU Clean Technology Universe AG</p>	<p>Christoph Egli, <a href="mailto:christoph.edli@ava-altenrhein.ch">christoph.edli@ava-altenrhein.ch</a></p>	<p><a href="http://www.fibl.org/de/projekt-datenbank/projektitem/project/1253.html">http://www.fibl.org/de/projekt-datenbank/projektitem/project/1253.html</a></p>	<p>Anfrage von Projektpartner, da aber sehr ähnlich wie EuPhoRe®, wird auf eine Präsentation am Hearing verzichtet.</p>	<p>Nein</p>

## **ANHANG 4: STELLUNGNAHMEN DER EXPERTEN**

### **4.1 Dr. Hans-Peter Fahrni**

Beurteilung der einzelnen Verfahren nach den Unterlagen und Präsentationen, wie sie am 2. 2. 2018 vorlagen.

#### **Allgemeines**

Die am 1. und 2. Februar 2018 an der VTMA vorgestellten Verfahren weisen einen stark unterschiedlichen Entwicklungsgrad auf. Die zum Teil lückenhafte Darstellung in den Unterlagen und in den Präsentationen erschwert eine zuverlässige Beurteilung. Die Kostenschätzungen insbesondere für den Bau der Anlagen und deren elektromechanische bzw. chemisch-verfahrenstechnische Ausrüstung können meist nicht im Detail überprüft werden, weil die technische Auslegung der vorgesehenen Behandlungsanlagen zur Phosphorrückgewinnung nicht offengelegt wurde. (Welche Prozessschritte sind vorgesehen, in wie vielen parallelen Strassen soll diese Behandlung erfolgen. Welche Dimensionierung ist vorgesehen, welche Materialien für Reaktoren und Behälter werden gewählt, welche Standzeiten von Rührern, Pumpen, bzw. Zyklen bei Ionentauscher-Harzen usw. werden erwartet.)

Etwas besser ist die Datengrundlage dort, wo bestehende Anlagen zur Phosphorrückgewinnung nachgerüstet werden, sei dies nun ein bestehendes Drehrohr (Euphore) oder eine bestehende Wirbelschichtverbrennung (ZAB Verfahren).

Die Angaben über die Kosten von Investitionen und Betrieb sind deshalb zum Teil nicht überprüfbar und wegen fehlender Informationen zu den einzelnen Verfahren lässt sich diese Lücke auch nicht einfach schliessen.

#### **Zu den einzelnen Verfahren**

##### **1. Phos4Life**

###### *Kurzbeschreibung:*

Klärschlammasche wird mit Schwefelsäure extrahiert, wobei Phosphorsäure und Schwermetalle in Lösung gehen. Mittels Solventextraktion werden in einer ersten Stufe Eisen und dann in einer zweiten Stufe die Schwermetalle abgetrennt. Das Eisen wird aus der organischen Phase rückextrahiert und fällt als gelöstes Eisenchlorid an, welches in ARA wieder zur Phosphorfällung eingesetzt werden kann.

###### *Beurteilung der Technologie*

Die Solventextraktion ist ein Standardverfahren bei der Gewinnung von Phosphorsäure aus Phosphatmineralien. Die mit der Entwicklung betraute Firma weist hier eine grosse Erfahrung auf. Nicht im grosstechnischen Massstab angewendet wurde meines Wissens der erste Schritt, d.h. die Abtrennung von Eisen aus der schwefelsauren Lösung. Das Verfahren ist fertig entwickelt und im Labormassstab pilotiert.

###### *Verfahrensentwickler*

Technicas Reunidas, weist grosse Erfahrung bei der Aufbereitung von Phosphorsäure in Grossanlagen auf.

###### *Produkte*

Phosphorsäure 75%, hohe Reinheit, hoher Rückgewinnungsgrad

- Eisen(III)chloridlösung, 40%, Verwendung in ARA
- Mineralischer, von Schwermetallen befreiter Rückstand kann wahrscheinlich in Zementwerke gegeben werden.

###### *Kosten*

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

Die berechnete Gate Fee ist mit CHF 400.- pro Tonne KS-Asche relativ hoch. Dies gilt insbesondere, weil von Konkurrenten deutlich tiefere Kosten in Aussicht gestellt werden.

### *Empfehlung*

Die Pilotierung abschliessen, Angaben zu Kosten überprüfen. (Sehr hohe Kosten für Salz- und Schwefelsäure); Überprüfen der Kosten, sehr grosses Gebäudevolumen 60 mal 60 Meter mal 20 m bei einem Durchsatz von 30'000 t KS-Asche pro Jahr (entspricht 3.75 t pro Stunde). In der Schweiz fallen maximal 90'000 t KS-Asche pro Jahr an. Zwar fallen davon wegen dem möglichen Bau von Anlagen wie ZAB mindestens 10'000 t weg. Trotzdem ist wegen der sich abzeichnenden Economy of scale auf eine grössere Anlage hinzuarbeiten. Allenfalls auch Interesse im benachbarten Ausland abklären.

## **2. EuPhoRe-Verfahren**

### *Kurzbeschreibung*

Klärschlamm wird in einem Drehrohr thermo-chemisch behandelt. Um Schwermetalle in die Gasphase überzuführen und abzutrennen, werden chlorhaltige Additive (Alkali oder Erdalkalichloride) zugegeben. Die resultierende Asche weist einen – im Vergleich zu Handelsdüngern - relativ tiefen P-Gehalt auf.

### *Beurteilung der Technologie*

Die Technologie wird aktuell im Drehrohrföfen in der KVA erzo In Oftringen erprobt. Die Schwermetall-Abreicherung erfüllt aktuell die MinRec Bedingungen für Nickel und Kupfer nicht. Gerade bei flüchtigen Metallen, wie Quecksilber, Cadmium, Blei und Quecksilber werden durch den Prozess aber 85% bis 95% des Schwermetalls aus dem Klärschlamm, bzw. dessen Asche entfernt.

Das Verfahren ist relativ einfach, bedingt aber die Nachbarschaft zu einer Verbrennungsanlage, die heisses Rauchgas liefert und die entstehenden Schwermetall haltigen Rauchgase reinigt. Im Stand-Alone ergeben sich wohl deutliche Mehrkosten.

Das Produkt, eine bezüglich biologischer Verfügbarkeit des Phosphors aktivierte Asche, würde sich anbieten, um durch Zugabe von Phosphorsäure zu einem handelsüblichen Phosphordünger weiterverarbeitet zu werden.

### *Verfahrensentwickler*

LUKSON AG/EuPhoRe GmbH, relativ kleines Ingenieurbüro.

### *Produkte*

Aktivierter, von flüchtigen Schwermetallen abgereicherter KS-Asche. Zur direkten Verwendung als Dünger oder zur weiteren Veredelung zu einem Dünger.

### *Kosten*

Die zu erwartende Gate Fee ist rund CHF 200.- pro Tonne trockenem Klärschlamm. Sie ist durch die Synergieeffekte sogar günstiger als eine entsprechende Klärschlammverbrennung ohne P-Rückgewinnung.

### *Empfehlung*

Die Pilotierung abschliessen, insbesondere Möglichkeiten zur besseren Abtrennung von Schwermetallen durch Wechseln der Additive abklären.

Verfahren ist wegen der möglichen Synergien interessant bei bestehenden Verbrennungsanlagen.

Möglichkeiten der Zusammenarbeit, z.B. mit ZAB, zur Veredelung des Produktes zu einem handelsüblichen P-Dünger abklären.

### 3. ECOPHOS-Verfahren

#### *Kurzbeschreibung*

Klärschlammasche wird mit Phosphor-Säure behandelt. Aus der resultierenden Lösung werden Calcium und Magnesium sowie die Schwermetalle durch Ionentauscher abgetrennt. Bei der Säurebehandlung verbleibt ein Eisen und Aluminium reicher Rückstand. Die Ionentauscher werden mit Salzsäure regeneriert, aus dem Eluat werden durch schrittweise pH-Anpassung die Schwermetalle abgetrennt.

#### *Beurteilung der Technologie*

Die Technologie wird mit einigen Modifikationen zur Gewinnung von Calcium-Phosphaten als Futtermittelzusatz eingesetzt. In Dünnkirchen ist eine Grossanlage in Bau. Über die Eignung von Ionentauschern zur Reinigung der rohen Phosphatlösung gibt es widersprüchliche Aussagen.

In Varna, Bulgarien, wird eine Demo-Anlage betrieben.

#### *Verfahrensentwickler*

Verfahrensentwickler und Lizenzgeber: ECOPHOS s.a., Louvain-la-Neuve

#### *Produkte*

Phosphorsäure, typischerweise 54% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Calciumchloridlösung

#### *Kosten*

Die vom Verfahrensentwickler angegebenen Kosten sind wahrscheinlich nicht realistisch. Insbesondere wird der Ertrag aus dem Verkauf des als Nebenprodukt anfallenden Calcium-Chlorids wohl drastisch überschätzt.

Die angegebenen Investitionskosten fallen für die doch recht komplexe Anlage mit grossen Ionentauschern und diversen Behälter usw. recht tief aus.

Der Personalaufwand, insbesondere die in der Schweiz zu erwartenden Kosten pro Vollzeitstelle wird unterschätzt. Die zu erwartende Gate Fee ist mit CHF 2.- pro Tonne Klärschlamm-Asche sehr tief.

Werden für Schweizer Verhältnisse realistischer Zahlen als Kostenbasis eingesetzt, bzw. identischen wie beim Phos4Life-Verfahren zur Vergleichbarkeit, kommt man schnell in den Bereich von etwa **340.- CHF pro Tonne KSA** als gate fee für eine 30'000 t Anlage (vgl. Anhang 5).

Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist aber das Angebot der Promotoren, die Asche aus der Schweiz zu einem sehr günstigen Preis zu übernehmen und in einer Anlage in Dünnkirchen zu behandeln. Im Übrigen ist ECOPHOS auch an der Übernahme von Phosphorsäure aus der Schweiz interessiert.

#### *Empfehlung*

Angesichts der tiefen Kosten, welche die Promotoren geltend machen und mit Rücksicht auf die von gewissen Stellen geäusserten Zweifel an der Zuverlässigkeit des Ionentauscher-Verfahrens für Klärschlammasche sollte die bestehende Möglichkeit zur Pilotierung des Verfahrens in Varna (Bulgarien) mit einer grösseren Menge KS-Asche genutzt werden. Auch ist auf eine realistische Kostenschätzung hinzuwirken.

### 4. ExtraPhos

#### *Kurzbeschreibung*

Ausgefauter Klärschlamm wird in einem Rohrreaktor unter Druck (10 bar) mit Kohlendioxid behandelt.

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

Dabei geht ein Teil des im KS enthaltenen Phosphats - nicht aber die Schwermetalle - in Lösung. Die Mischung wird entspannt und CO<sub>2</sub> für weitere Extraktionsschritte aufgefangen. Der KS wird durch Zentrifugieren entwässert. Die Lösung wird durch Zugabe von Kalkmilch basisch gestellt, worauf Dicalciumphosphat abgetrennt werden kann. Der behandelte Klärschlamm kann offenbar etwas besser entwässert werden. Er soll getrocknet und in Zementwerken verbrannt werden.

### *Beurteilung der Technologie*

In Mainz wird eine Pilotanlage betrieben. Das Verfahren ist aber weder bezüglich der Ausbeute noch bezüglich der Verfahrenstechnik fertig entwickelt. So könnte offenbar der mit 35% doch sehr begrenzte Rückgewinnungsgrad durch Erhöhung des Drucks und durch längere Verweilzeit oder einen zweiten Durchgang erhöht werden. Auch die Verfahrenstechnik könnte optimiert werden. Insbesondere wäre der Übergang zu einem Batchverfahren zu prüfen, bei dem weniger Energie zum Einpumpen von Klärschlamm in den Druckreaktor notwendig ist.

### *Verfahrensentwickler*

Chemische Fabrik Budenheim KG

### *Produkte*

Dicalciumphosphat

### *Kosten*

Nach ersten Angaben ergeben sich doch recht hohe Kosten insbesondere für das eingesetzte CO<sub>2</sub> und den elektrischen Strom.

### *Empfehlung*

Für eine definitive Empfehlung müsste zumindest der Abschluss der Versuche in Mainz und die Ergebnisse der Optimierung des Rückgewinnungsgrades abgewartet werden. Falls es nicht gelingt, bei einem durchschnittlichen Klärschlamm den Rückgewinnungsgrad auf über 50% zu steigern, wirkt das Verfahren wenig überzeugend. Falls bessere Rückgewinnungsgrade erzielt werden, müsste das Verfahren wahrscheinlich verfahrenstechnisch optimiert werden. Zudem sind die Kosten für Investitionen, Energie und Chemikalien abzuklären und darzustellen.

## **5. ZAB-Verfahren**

### *Kurzbeschreibung*

Tiermehl und Klärschlamm werden zusammen in einer bestehenden Wirbelschichtverbrennung verbrannt. Das Phosphat in den bei der Verbrennung anfallenden Rückständen wird mit Phosphorsäure in eine für Pflanzen besser verfügbare Form überführt. Der so entstehende Dünger wird granuliert und z.B. als Ersatz des handelsüblichen Triplesuperphosphats kommerzialisiert.

### *Beurteilung der Technologie*

Die Wirbelschichtverbrennung ist bewährte Technologie. Zumischen von Phosphorsäure und Granulation sind einfache, bewährte Prozessschritte. Der ZAB ist für die Phosphorrückgewinnung in einer speziell günstigen Lage, verfügt er doch über Tier- und Knochenmehl aus einer benachbarten Tiermehlfabrik. Durch die Mitverbrennung des Tiermehls zusammen mit dem entwässerten Klärschlamm resultiert eine Asche mit tiefem Schwermetallgehalt. Das Verhältnis von Phosphor zu Schwermetallen wird durch Zumischen von Phosphorsäure noch weiter verbessert. Falls notwendig oder erwünscht, könnte durch Zugabe von Additiven während der Verbrennung noch eine bessere Abreicherung flüchtiger Metall erzielt werden.

### *Verfahrensentwickler*

ZAB, Zwizachstrasse 26, 9602 Bazenheid

*Namen des Verfahrens*

ZAB-P-Dünger

*Inputmaterial*

40'000 t entwässerter Klärschlamm, 10'000 t Tiermehl (Verhältnis 2:1 bis 3:1 bezogen auf die entsprechende Asche), Phosphorsäure

*Produkte*

Phosphordünger mit 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (wie Triplesuperphosphat)

*Kosten*

Es ergeben sich gegenüber der alleinigen Verbrennung von Klärschlamm Mehrkosten von rund 20%. Typischerweise CHF 125/t entwässertem Klärschlamm.

*Empfehlung*

Das Verfahren ist ausgereift und bewirkt als Synergie auch eine Nutzung des in Tiermehls enthaltenen Phosphors. Es sollen gezielt die am Markt nachgefragten Düngerqualitäten in marktüblicher Form (P-Gehalt, Granulierung, Verpackung) hergestellt werden. Aufgrund der tiefen zu erwartenden Kosten und der guten Absatzmöglichkeiten handelt es sich hier um eine sinnvolle Nischenlösung, die aber den schweizerischen Markt für Phosphordünger zu einem wesentlichen Teil abdecken kann.

## **6. Sepholix**

*Kurzbeschreibung*

Die Firma Cimo in Monthey betreibt seit 30 Jahren eine Nassoxidationsanlage zur Behandlung von phosphorhaltigen Abfällen. Aus den anfallenden Rückständen wird mit Kalkmilch Tricalciumphosphat (TCP) ausgefällt. Jährlich werden gut 4'000 t TCP (mit 15% P) verkauft. Das Verfahren könnte auch zur Behandlung von Klärschlammasche eingesetzt werden. In diesem Fall könnten wohl 4'000 - 5'000 t Asche pro Jahr angenommen werden. Dabei muss die Asche zuerst mit Säure ausgewaschen werden. Zur Fällung von Schwermetallen wird Sulfid eingesetzt.

*Beurteilung der Technologie*

Das heutige Verfahren ist eine ausgereifte Technologie für die anfallenden Rückstände der Nassoxidationsanlage. Sowohl die Laugung als auch die Fällung sind Standardverfahren. Solange die Qualität des bisher verkauften Produkts (TCP) nicht beeinträchtigt wird, und solange keine Störungen im aktuellen Prozess auftreten, kann auch KS-Asche eingesetzt werden. Falls die Asche mit starken Säuren intensiv gewaschen wird, ist mit einer beträchtlichen Lösung von Eisen zu rechnen. Dieses Eisen muss – zusammen mit weiteren Schwermetallen – wieder aus der Lösung entfernt werden, bevor sauberes TCP gefällt werden kann.

*Verfahrensentwickler*

CIMO – Compagnie Industrielle de Monthey SA

*Produkte*

Aktuell Tricalciumphosphat. Dieses kann wie bis anhin verkauft werden oder allenfalls extern zu Phosphorsäure umgesetzt werden.

*Kosten*

Da relativ viele Installationen bereits in ausreichender Kapazität vorhanden sind, ist mit relativ günstigen Kosten zu rechnen. Zur Zeit sind keine Angaben dazu vorhanden.

*Empfehlung*

Den Abschluss der aktuell laufenden Pilotierung der Behandlung von Klärschlammasche abwarten. Es handelt sich hier allenfalls um eine lokale Lösung für die in der Region anfallende Klärschlammasche.

## 4.2 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp

### Zusammenfassende Stellungnahme zum VTMA-Hearing am 1./2. Februar 2018 in Luzern

Am 1. und 2. Februar 2018 fand in Luzern ein Hearing statt, an dem im Rahmen der «Verfahrenstechnischen Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad (VTMA)» sechs Anbieter ihr Verfahren und ihr Geschäftsmodell der Projektgruppe und einigen geladenen Experten präsentiert und im Anschluss Fragen beantwortet haben. Im Folgenden gebe ich einen kurzen zusammenfassenden Bericht über meine Einschätzungen wieder:

1) Es wurde deutlich, dass es einen grossen Unterschied im sog. technologischen Reifegrad (TRL) der Verfahren gibt. Der Reifegrad reicht dabei definitionsgemäss von «TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips» bis zu «TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes». Leider lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Detailtiefe der Vorträge nicht für jedes Verfahren eine gut abgesicherte Einstufung vornehmen, ich schlage folgende Reifegrade vor:

- Phos4Life: TRL 6
- EuPhoRe: TRL 7
- ECOPHOS: TRL 7
- ExtraPhos: TRL 5
- ZAB: TRL 6
- Sepholix: TRL 6

2) Die von den Verfahrensanbietern gemachten Kostangaben sind – trotz grosser Sorgfalt bei der Vorbereitung der Abfrage – kaum vergleichbar. Dies hat mehrere Gründe:

- Nicht allen Berechnungen liegt das hohe Schweizer Preisniveau zugrunde.
- Es ist nicht erkennbar, wo genau die Schnittstellen der jeweiligen Anlagen liegen.
- Um Interesse an ihrem Verfahren zu wecken, werden «taktische» Kostangaben gemacht, die sich im Rahmen konkreter Verhandlungen dann erhöhen können.

Die vom BAFU angekündigte Kostenstudie erscheint daher wichtig und dringend.

3) Die bei den einzelnen Verfahren entstehenden Produkte sind unterschiedlich, daher adressieren sie auch unterschiedliche Märkte. Dies erschwert die Vergleichbarkeit:

- Phos4Life: Phosphorsäure (75%),  $\text{FeCl}_3$
- EuPhoRe: Schwermetall-abgereicherte Asche
- ECOPHOS: Phosphorsäure (TG),  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$
- ExtraPhos: Phosphorarmer Schlamm,  $(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)$
- ZAB: TSP 46
- Sepholix: TCP 34, aufkonzentrierte Schwermetalle

4) Eine standortunabhängige Bewertung der Verfahren ist kaum möglich.

- EuPhoRe kann sinnvoll nur neben einer KVA oder einer ähnlichen thermischen Anlage realisiert werden.
- ZAB ist an die gemeinsame Verbrennung von Klärschlamm mit phosphorreicherem, schadstoffarmem Tiermehl gebunden.
- Sepholix bietet sich nur auf dem Chemiapark CIMO an.
- Die anderen Verfahren sind weitgehend standortunabhängig, wobei es natürlich wichtige Synergien geben kann in Bezug z.B. auf die Energiebilanz oder die Weiterverwendung der entstandenen Rezyklate.

5) Mit den verschiedenen Verfahren sind zum Teil unterschiedliche Akteursstrukturen und Geschäftsmodelle verbunden:

- ECOPHOS bietet die Abnahme von Klärschlammasche zu einem mengenabhängigen Preis an. Bei grossen Mengen sollen keine Kosten für den Klärschlammverbrenner und Lieferanten der Asche entstehen.
- Budenheim (ExtraPhos) nennt eine Vielzahl von Beteiligten, die an einem «runden Tisch» die beste Lösung und Vertragsform finden müssen.

6) Aus meiner Sicht können folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Die beiden vorgestellten, an existierende Anlagen gebundenen Projekte (ZAB und Sepholix/CIMO) sollten weiterverfolgt werden.
- Es sollte angestrebt werden, mögliche Synergien zu nutzen. Diese könnten darin bestehen, dass die Verfahren Phos4Life und ECOPHOS Phosphorsäure produzieren, ZAB diese benötigt. Ein übergreifendes Geschäftsmodell bietet sich an.
- Trotz erheblicher Unterschiede im Detail sind die beiden Verfahren Phos4Life und ECOPHOS verfahrenstechnisch ähnlich. Die Entscheidung für eines der beiden Verfahren sollte daher im Wettbewerb fallen.
- Das Budenheim-Verfahren (ExtraPhos) scheint noch nicht ausreichend entwickelt zu sein. Vor weiteren Entscheidungen müssen die Versuche in Mainz und gegebenenfalls in Bern abgewartet werden. Es ist aber nicht erkennbar, dass das Verfahren eine zentrale Rolle für die Schweiz spielen wird.
- Das EuPhoRe-Verfahren scheint ausgereift zu sein, auch wenn es noch Fragen zu den optimalen Additiven gibt. Da es sinnvoller Weise in Kombination mit einer thermischen Anlage realisiert werden sollte, ist eine Realisierung neben der ZAB zu untersuchen.

Aachen, den 12. Februar 2018

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp

### 4.3 Dr. Anders Nättorp

Folgende Stellungnahme basiert auf mündlichen Aussagen und begrenzter Informationen im Rahmen des VTMA sowie früheren Erfahrungen. Eine Validierung der Einschätzung mit den Inputgebern war im Rahmen des Auftrags nicht möglich.

#### Gesamtsystem

Die Verfahren verfolgen zentrale oder regional angepasste Ansätze. Daher konkurrenzieren sich manche Verfahren und Andere können komplementär genutzt werden. AWEL strebt auf Grund von Skalenvorteilen mit anderen Monoverbrennern eine gemeinsame, zentrale Anlage für die Aschebehandlung an. Deren Standort kann zum Beispiel auf Grund von Verkehrserschliessung oder Synergien mit bereits vorhandenen chemischen Anlagen und Rohstoffen gewählt werden.

Es gibt auch Lösungen für die Behandlung von Asche die von den lokalen Ressourcen ausgehen:

- Sepholix nutzt eine vorhandene Fällungsstufe und den umgebenden Chemiestandort.
- ZAB nutzt regional vorhandenes Knochenmehl als Schadstoffarmer Rohstoff.

Auch für die Behandlung von (getrocknetem) Klärschlamm gibt es Lösungen die von den lokalen Ressourcen ausgehen:

- Euphore nutzt Drehrohrofen und vorhandene Rauchgas(-Reinigung) eines KVA/Kraftwerk um das Verfahren kosten- und energiegunstig zu gestalten.
- Pyrophos (Altenrhein) gab im VTMA Input, aber nahm am Hearing nicht Teil. Bei diesem thermischen Verfahren wird ähnlich wie bei Euphore die Energie aus dem regionalen Trockenschlamm verwertet und ein Düngerrohstoff hergestellt.
- Extraphos verarbeitet nicht entwässerten Faulschlamm und muss daher dezentral auf der ARA realisiert werden.

Wie in der Tabelle ersichtlich bieten die in VTMA evaluierten Verfahren eine Vielfalt und Anlagegrösse die ausreichend aber nicht übermässig gross sind für die Schweizer Klärschlammmenge.

#### Beurteilung der Technologien

Die Technologien weisen unterschiedliche technologische Reifegrade (TRL)<sup>1</sup> auf, wodurch das technische Risiko und Zeit/Aufwand bis zur Implementierung unterschiedlich gross sind (Tabelle).

#### Produkteabsatz

Sepholix, Euphore und Extraphos produzieren keine Standarddüngerprodukte, wodurch die Produkt-erlöse vermutlich tief sein werden. Solange nach gesetzeskonformer gleichbleibender Qualität produziert wird, wird die Düngerindustrie ein Interesse daran haben. Dennoch ist die starke Marktkonzentration und die Stellung im Düngemarkt von ICL und Landor/Fenaco zu beachten. Partnerschaften mit Düngerunternehmen oder mehrere alternative Abnehmer sind nötig für die Absatzsicherung.

#### Kosten

Kostenangaben sind vorläufig noch nicht vorhanden, insbesondere für Extraphos, ECOPHOS und Sepholix. Momentan kann ich folgende Tendenzen ausmachen:

- Für Aschebehandlung scheinen vorerst die Kosten für Phos4Life wesentlich grösser als ECOPHOS zu sein.
- Für Klärschlamm scheint Euphore (und Altenrhein) an Standorten mit guter Wärmenutzung eine günstigere Lösung als Monoverbrennung mit Phosphorrückgewinnung zu sein.

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

- Die VTMA bestätigt, dass bei Phosphorrückgewinnung kleine bis mittelgrosse Zusatzkosten im Vergleich zu den heutigen Entsorgungskosten vom Schlamm entstehen (+0% bis +50% Zusatzkosten)<sup>1</sup>. Somit muss die Phosphorrückgewinnung bei der Klärschlamm Entsorgung mitberücksichtigt werden. Allerdings ist die Phosphorrückgewinnung noch kein Grund eine gute Entsorgungslösung mit kurzen Transportwegen, gute Trägerschaften und effizienter Energienutzung grundlegend in Frage zu stellen.

	Approx. TRL <sup>2</sup>	Erläuterung	Grösse <sup>3</sup>
ECOPHOS	5	IEX mit KSA separat pilotiert (150 Zyklen).	15'000-100'000 t Asche
Phos4Life	6		15'000-100'000 t Asche
Sepholix	4	Laugungsschritt noch im Labor. Verfahrensansatz analog LeachPhos mit TRL 6	5'000 t Asche, eventuell mehr.
ZAB	7	Lizenziert, vermutlich auf RECOPHOS, DE (TRL 8) aufbauend	10'000-15'000 t Asche
EuPhoRe	7	400 h Betriebsversuche Erzo. Grossanlage in Planung in D.	20'000- 135'000 t EKS
ExtraPhos	5	Erst kürzlich TRL 4 verlassen.	Auf Kläranlagen mit >50'000 PE/ 3000 t EKS

### Umweltauswirkungen

Die Umweltprüfung steht mit Ausnahme von Pyrophos noch aus. Die Umweltauswirkung der Verfahren und insbesondere die Umsetzungsprojekte inklusive Wärmerückgewinnung sollten gegenüber einem Referenzszenario geprüft werden. Ich empfehle die Auswirkung des Verfahrens/Umsetzungsprojekts auf UBP als Entscheidungskriterium mit zu berücksichtigen. Ein aus Umweltsicht motiviertes Anliegen wie die Phosphorrückgewinnung darf nicht zu Umweltschäden durch zum Beispiel Klimaerwärmung führen.

### Fazit

Ich empfehle mehrere Lösungen parallel weiter zu verfolgen und in zirka einem Jahr wieder eine Abstimmung vorzunehmen. Diese könnte im Rahmen vom Phosphornetzwerk Schweiz erfolgen.

Schweizer Aschen könnten nach heutigem Kenntnisstand z.B. in einer zentralen Anlage (ECOPHOS/ Phos4Life), einer kleinen Sepholix- Anlage und einer ZAB-Anlage behandelt werden. Falls ExtraPhos, EuPhoRe und Pyrophos erfolgreich hochskaliert werden, könnten mehrere solcher Anlagen in der Schweiz eingesetzt werden, um die 40% des Klärschlamms die heute nicht monoverbrannt werden, zu behandeln. Folgende Punkte sind wichtig zu klären:

- Technische Machbarkeit/Leistung des Verfahrens (ExtraPhos, Sepholix)

<sup>1</sup>Nätötp, A., Remmen, K., & Remy, C. (2017). Cost assessment of different routes for phosphorus recovery from wastewater using data from pilot and production plants. *Water Sci Technol*, 76, 413–424. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.212>

<sup>2</sup>Definition Z.B. BMWi-Fachprogramm «Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien» TRL4: Versuchsaufbau im Labor; TRL5: Versuchsaufbau in (simulierter/ vereinfachter) Einsatzumgebung TRL6: Prototyp in (simulierter/vereinfachter) Einsatzumgebung; TRL 7: Prototyp im (realen) Einsatz

<sup>3</sup>Gesamtsschweiz, VBSA 2016: 120 kt TS/ 60 kt Asche in Mono; 70 kt TS in KVA/ZW)

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

- Kosten des Verfahrens im Schweizer Kontext, insbesondere Option Verwertung Laugungsrückstand (ECOPHOS)
- Gesetzeslage (Mischungsverbot: ZAB und andere; MinRec: EuPhoRe/Altenrhein; Ausbeute: ExtraPhos)
- Umweltauswirkung der Verfahren inklusive Standort

Basel 13.2.2018

A. Nättorp

### **4.4 Clemens Adam**

Stellungnahme berücksichtigt in der Zusammenfassung zum Hearing.

## ANHANG 5: ECOPHOS MIT SCHWEIZER RAHMENBEDINGUNGEN

H. P. Fahrni wurde als Experte am Hearing gebeten, die von ECOPHOS abgegebene Kostenschätzung bzgl. der in der Schweiz üblichen Rahmenbedingungen zu überprüfen und bei Bedarf anzupassen. In der folgenden Tabelle sind die Zahlen dazu in der rechten Spalte zusammengestellt. Bei identischen Betriebsmitteln wurden die Preisgrundlagen des Phos4Life-Verfahrens angewendet. Somit ist eine objektivere Vergleichbarkeit für einen zukünftigen Schweizer Standort gegeben.

Nr.	Parameter	Einheit	ECOPHOS	Schätzung H.P. Fahrni	Bemerkung zur Anpassung
a)	<b>Erträge durch Produktlöse als negative Kosten</b>	[CHF/a]	-7 712 750	-3 700 000	CaCl <sub>2</sub> wurde als kostenneutral gewertet, da kein Markt für CaCl <sub>2</sub> in der CH
b)	<b>Betriebskosten:</b>		877 000	2 300 000	Fe-Silikat ist ein Rückstand, nicht kostenneutral sondern bestenfalls Inertstoffdeponie à 35.-/t; höhere Kosten für Schwermetallrückstand à 250.-/t Chemikalien- und Energie/Dampfkosten analog zu Phos4Life 16 Vollzeitstellen, 1 Vollzeitstelle kostet 120-130 kCHF. Die Synergie mit SVA ist kleiner als 60%! Daher wurden 10 Stellen à 120 kCHF angenommen. Keine Anpassung
	Entsorgungskosten für Rückstände	[CHF/a]			
	Betriebsmittelkosten	[CHF/a]	3 318 100	6 300 000	
	Personalkosten	[CHF/a]	450 000	1 200 000	
	Unterhaltskosten	[CHF/a]	500 000	500 000	
	<b>Zwischentotal Betriebskosten</b>	[CHF/a]	5 145 100	10 300 000	
c)	<b>Andere Kosten</b> verteilt auf Abschreibungsdauer	[CHF/a]	538 000	538 000	Keine Anpassung

## Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad

<b>d) Kapitalkosten:</b>		
Abschreibungskosten [CHF/a] 1 666 000	2 500 000	Investition für Technik (15a) und Gebäude (30a) erscheint zu tief. Eher 45 Mio. statt 25 Mio. CHF. Abschreibedauer verlängert, analog zu P4L.
Zinskosten bei einem Zinssatz von 2% p.a. [CHF/a] 425 000	450 000	
<b>Zwischentotal Kapitalkosten</b> [CHF/a] 2 091 000	2 950 000	
<b>Gesamtkosten</b> (Summe aus a, b, c und d) [CHF/a] <b>61 350</b>	<b>10 088 000</b>	
<b>Annahmepreis pro t Input</b> [CHF/t TS] <b>2.0</b>	<b>336</b>	

Bemerkungen von H.P. Fahrni zur obigen Schätzung:

### Erträge aus Produkten

#### 1) Ca-Chlorid (Nebenprodukt 2):

Mehr als Phosphorsäureertrag ist nicht möglich, höchst riskant: CaCl<sub>2</sub> (35% Lösung)

→ 75 CHF/t als prognostizierter Ertrag seitens ECOPHOS ist unrealistisch für CH (kein Produktabsatz in der CH!)

#### Falls kein Absatz: Gipsproduktion durch ECOPHOS und Verkauf in CH:

Ein Betrieb der Schweizer Zementindustrie nimmt derzeit getrockneten sauberen REA-Gips einer KVA gegen eine geringe Zuzahlung ab. Das Zwischenprodukt CaCl<sub>2</sub> (35% Lösung) gibt mit als «gratis» angenommener Schwefelquelle rund 25'000 t/a trocken Gips. Die Trocknung muss durch ECOPHOS ebenfalls gewährleistet werden (>95%TS) → **d.h. statt 4 Mio. CHF Ertrag → Kosten von 0.5 Mio. CHF** (ohne Trocknungskosten und Sulfatquelle, beides stark vereinfacht als «gratis» angenommen, was nicht der Realität entspricht.). Wohlwollend wird ClCl<sub>2</sub> deshalb als kostenneutral ±0 CHF/t KSA übernommen.

#### 2) Fe-Silikat (Laugungsrückstand) (Nebenprodukt 3):

Verwendungsvorschlag ECOPHOS: Grundstoff als Grundverbesserungen etc. oder eigenes Zusatzmodul zur Fe-Chloridproduktion:

#### Fragen:

- Wie soll das Modul funktionieren?
- Wie werden die SM (Zn= 925ppm, Cu=400ppm, Pb=135ppm) vom Fe-chlorid abgetrennt (in ARA kommen sie wieder in KS zurück; Aregger-Produktblatt für 40% Lösung FeCl<sub>3</sub>: Cu<3ppm, Pb < 1ppm, Zn <7ppm, Cr<9ppm), mittels IT gleiche Probleme wie bei P-Säurereinigung.

Statt Produkterlös: auf Inertstoffdeponie mit 35 CHF/t zu deponieren. Statt 0 → **0.6 Mio. CHF Aufwand**

### Kosten für Rückstände

RS1: Metallhydroxidschlamm:

In der CH nicht mit 120.-/t machbar. Abnehmer verlangt knapp 200 CHF/t. (Annahme CH-Durchschnitt: 250 CHF/t)

→ **statt 0.7 Mio. CHF → 1.5 Mio. CHF**

Abwasser: 1 CHF/m<sup>3</sup> ist ok

### Betriebsmittelkosten: (Kostenbasis analog zu Phos4Life)

- Energiekosten: Strom: 0.06 Fr/KWh (mit KEV.): -15'000 CHF  
Dampf ab KVA typisch 30 Fr/t Dampf statt 20 Fr/t: → **+1.05 Mio. CHF**
- Salzsäure: Einkaufspreis von 25 CHF/t ist unrealistisch tief, CH-Durchschnitt inkl. Transport: 60 CHF/t (gleicher Lieferant wie Dünnschichten, aber Lieferkosten in die CH viel teurer). → **+1.3 Mio. CHF**
- Kalk: Ca(OH)<sub>2</sub> wird er nicht einkaufen, da technisch unsinnig; Falls CaO eingesetzt wird: auch 200 CHF/t  
→ **+0.62 Mio. CHF**

### Personalkosten:

16 Vollzeitstellen Bedarf mal 120-130000 CHF (16x120000=1.92 Mio. statt 0.45). Synergiepotential auf MonoVerbrennung: eher Null statt 40%. Realistisch/Konservativ sind 10 Personalstellen à 120000 CHF notwendig = 1.2 Mio. statt 0.45 Mio.) → **+0.8 Mio. CHF**

### Unterhaltskosten:

So belassen.

### Andere Kosten:

ok (0.58 Mio. CHF). Frage: Was ist Goodwill von 8 Mio. CHF? (Technologiegebühren einmalig)

### Investitionskosten:

#### **Mit Gebäudeansatz CH-Standards:**

(Chemieschutz, Auffangwannen, Korrosionsschutz, kein Leichtbau, sondern betonierte Geschosse); für Kubatur von ECOPHOS in Analogie zu vergleichbaren Schweizer Projekten: daraus resultieren ca. 15 Mio. CHF für das ECOPHOS-Gebäude. Die Umrechnung der Bau bzw. Verfahrenstechnik(VT)-Kosten erfolgte anhand: 33% Bausumme = 66% VT&EMSRL → Gesamtinvestment 45 Mio. (Abschreibung: 15 Jahre für VT 30 Mio., Bau in 30 Jahren abgeschrieben, 15 Mio. in 30 J.):

→ pro Jahr Abschreibung **2.50 Mio. CHF**

### Zinskosten:

Basis ist 2% nicht 1.7% → **0.45 Mio. CHF**

## ANHANG 6: NORMIERTE KOSTENBETRACHTUNG DER VERFAHREN

Der Normierung der Betriebskosten wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

**Tabelle 6: Normierte Einheitskosten (Betriebsmittel) für eine Schweizer Anlage zur Phosphorrückgewinnung.**

Bezeichnung	Einheit	Kosten pro Einheit [CHF]
Personal	100%-Stelle	120'000
Energie	MWh	50
Dampf	T (160°C)	30
Salzsäure 32%	t	60
Schwefelsäure 96%	t	80
Kalk (CaO)	t	180
Kalkstein (CaCO <sub>3</sub> )	t	50

### Behandlungskosten für klärschlammaschebasierte Verfahren (SVA)

Von den schweizweit jährlich anfallenden 190'000 t trockenen Klärschlamm werden heute bereits 64% und zukünftig mindestens 70%, d.h. 133'000 t/a TS, in Monoverbrennungsanlagen behandelt. Die resultierende Klärschlammasche (KSA) muss einer nachträglichen Phosphorrückgewinnung zugeführt werden. Die zu dieser Infrastrukturgruppe (Schlammverwertungsanlage, SVA) gehörenden Verfahren Phos4Life, ECOPHOS, ZAB und Sepholix bieten unterschiedliche KSA-Verarbeitungskapazitäten an, die nachfolgend in einen nationalen Kontext zur gesamthaft anfallenden KSA-Fracht gesetzt werden.

**Das von CIMO angebotene Sepholix-Verfahren** ist ein lokal-regionaler Ansatz für das Wallis zur maximalen Verarbeitung der dort anfallenden KSA von ca. 3'000 – 5'000 t (das entspricht ca. 7'000 – 11'000 t/a trockenem KS). Der Anbieter CIMO schätzt, dass die Behandlungskosten pro Tonne KSA im Bereich von 200 – 250 CHF/t KSA liegen werden. Aufgrund des geringen Reifegrades, der fehlenden Erfahrungen im Versuchsbetrieb und der lückenhaften Verfahrensdokumentation kann diese Schätzung im Rahmen der VTMA nicht verifiziert werden.

⇒ *Das Verfahren wird bei der nachfolgenden Kostendiskussion nicht weiter berücksichtigt.*

**Das ZAB-Verfahren am Standort Bazenheid** ist ebenfalls eine regionale Besonderheit und nicht zur Behandlung grosser KSA-Frachten geeignet. Es beruht auf der Mineralisierung von lokal vorhandenen, schwermetallarmen Tiermehl- und KS-Fractionen, anschliessendem Teilaufschluss mit sauberer Phosphorsäure, sowie einer Trocknung und Granulierung des resultierenden Triplesuperphosphats (TSP). Die Einhaltung der MinRec-Grenzwerte wird über die Mischung der drei Edukte gewährleistet. Eine Schwermetallseparierung findet nicht statt. Der Hauptteil, gut 50% des Phosphors im Endprodukt, wird somit über die Phosphorsäure zugeführt. Die nächstgrössere Phosphorfracht kommt aus der benachbarten Tiermehlproduktion (33%). Der Anteil der lokal anfallenden Klärschlammasche (ca. 7'500 t/a) macht hingegen lediglich 17% der TSP-Produktion aus. Die vorgestellte Kostenkalkulation bezieht sich auf alle drei erforderlichen Edukte Phosphorsäure, Tiermehl und KSA und führt gemäss ZAB zu Mehrkosten der lokalen Klärschlammverwertung von 20 – 25% pro Tonne gefaulten und entwässerten Klärschlamm (EKS). Da eine Übertragbarkeit auf andere Standorte derzeit nicht sinnvoll erscheint, ist auch dieser Weg nur von lokalem Interesse; er wird keinen substantziellen Phosphorbeitrag aus dem Abwasserpfad recyceln können. Das ZAB-Verfahren könnte aber durch die integrierte

Trocknung und Granulierung des TSP-Produktes durchaus dazu in der Lage sein, sekundäre Phosphor(neben)produkte anderer Verfahren mit sauberer Phosphorsäure aus sekundären Quellen zu veredeln. Für diese Option liegen zum heutigen Zeitpunkt aber keine Kostenangaben vor.

⇒ Das Verfahren wird bei der nachfolgenden Kostendiskussion nicht weiter berücksichtigt.

Mit den beiden zuvor erwähnten Verfahren können durch die regionale Bindung an die dortige Infrastruktur lediglich 10% der schweizweit anfallenden Klärschlammasche behandelt werden. Für die übrige Menge könnte eines der beiden phosphorsäureproduzierenden Verfahren (Phos4Life und ECOPHOS) der Anbieter Técnicas Reunidas (TR) und ECOPHOS angewendet werden.

### Phosphorsäureproduzierende Verfahren von TR und ECOPHOS

Tabelle 7 zeigt einen Vergleich dieser beiden Verfahren auf der Grundlage der in Tabelle 6 normierten Betriebsmittelkosten. Neben der Anwendung der normierten Betriebsmittelkosten wurden beim ECOPHOS-Verfahren weitere Anpassungen gegenüber den Angaben des Lieferanten vorgenommen, da sich die Angaben/Kosten gemäss ECOPHOS auf eine Applikation in Frankreich beziehen und nicht auf Schweizer Kosten basieren (vgl. Anhang 5). Die Erlöse aus der Verwertung der Kalziumchloridlösung wurden als kostenneutral (ohne Ertrag) angenommen, da in der Schweiz dafür kein Markt besteht und bei einem Transport nach Nordeuropa mit deutlich geringeren Erlösen zu rechnen ist. Die von ECOPHOS zusätzlich vorgeschlagene Umwandlung dieses Zwischenproduktes in Gips ist unter Schweizer Verhältnissen ebenfalls mit Mehrkosten verbunden, die keine Erträge ermöglichen. Der mineralische Rückstand Eisensilikat kann zudem nicht gratis an einen Eisensalzproduzenten abgegeben werden und muss somit im idealsten Fall auf einer Inertstoffdeponie abgelagert werden. Dies wurde mit Deponiekosten von 35 CHF/t berücksichtigt. Hingegen wurde eine zusätzliche Gutschrift in der Höhe von 80 CHF/t KSA durch die weggefallenen Deponiekosten bei der SVA gewährt. Eine typische Reserve für Unvorhergesehenes und zusätzliche Betriebskosten in der Höhe von 10% der Gesamtbetriebskosten wurde ebenfalls integriert.

**Tabelle 7: Normierter Kostenvergleich des Phos4Life- und ECOPHOS-Verfahrens unter Anwendung gleicher Schweizer Rahmenbedingungen.**

<b>Anbieter</b>	<b>Técnicas Reunidas</b>		<b>ECOPHOS</b>
<b>Verfahren</b>	<b>Phos4Life</b>		<b>ECOPHOS</b>
<b>Lastfall</b>	30'000 t/a KSA		
Produkerträge	[CHF/a]		[CHF/a]
a) Phosphorsäure	-6.8 Mio.		-3.7 Mio.
b) Eisen(III)chlorid	-2.3 Mio.		---
c) Kalziumchlorid	---		0
d) Salzsäure 17%	-0.8 Mio.		---
e) Vermiedene Deponiekosten SVA	-2.4 Mio.		-2.4 Mio.
<b>Summe Erträge</b>	<b>-12.3 Mio.</b>		<b>-6.1 Mio.</b>
Betriebsmittelkosten	9.9 Mio.		7.3 Mio.
Verwertungskosten für Rückstände	3.2 Mio.		2.3 Mio.
Wartung und Unterhalt	1.0 Mio.		0.5 Mio.
Personalkosten	1.8 Mio.		1.2 Mio.
Abschreibungs- und Zinskosten	7.4 Mio.		3.0 Mio.
Sonstige Kosten	---		0.5 Mio.
<b>Summe Ausgaben</b>	<b>23.3 Mio.</b>		<b>14.8 Mio.</b>
<b>Gesamtkosten</b>	<b>11.0 Mio.</b>		<b>8.7 Mio.</b>
<b>Behandlungskosten pro Tonne KSA</b>	<b>370 CHF</b>		<b>290 CHF</b>

Beim Phos4Life-Verfahren wurde bei der Verwertung des mineralischen Rückstandes angenommen, dass dieser im konservativen Fall auf einer Inertstoffdeponie abgelagert werden muss, obwohl die qualitative Verwertung im Zementwerk möglich ist.

**Fazit:** *Vergleicht man die normierten, auf Schweizer Rahmenbedingungen bezogenen Kosten dieser beiden Verfahren, so liegen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten zum gegenwärtigen Kenntnisstand die Behandlungskosten pro Tonne Klärschlammasche in einer ähnlichen Grössenordnung. Beide Verfahren müssen aber im Rahmen der laufenden bzw. ausstehenden Pilotierung die hier getroffenen Angaben bestätigen. Eine genauere Kostenbeurteilung wird somit in etwa einem Jahr möglich sein. Durch eine Vergrösserung der nominalen Durchsatzmenge an KSA können in beiden Fällen die spezifischen Behandlungskosten weiter gesenkt werden. Für eine 60'000 t/a KSA-Anlage werden sich demzufolge die Behandlungskosten um 20 – 30% reduzieren lassen. Dieser Lastfall entspricht der gesamten in der Schweiz anfallenden Klärschlammasche unter Berücksichtigung der anteilig durch CIMO und ZAB verarbeiteten KSA-Mengen.*

## Behandlungskosten für klärschlamm-basierte Verfahren (KS)

Die Behandlungskosten für die klärschlamm-basierten Verfahren (inkl. P-Rückgewinnung inkl. der thermischen Verwertung des Klärschlamm) ExtraPhos, EuPhoRe und Pyrophos konnten nur für die letzten beiden Verfahren ermittelt werden. Budenheim war noch nicht in der Lage, detaillierte Informationen zum ExtraPhos-Verfahren basierend auf den laufenden Pilotversuchen in Mainz zu nennen. Lediglich die Betriebsmittelkosten wurden sehr grob mit 60 – 320 CHF/t trockenem KS abgeschätzt. Die in Tabelle 8 kursiv dargestellten Kosten/Erträge des ExtraPhos-Verfahrens wurden vom Autor anhand der beiden anderen präsentierten Verfahren abgeleitet und zur besseren Vergleichbarkeit mit aufgenommen. EuPhoRe rechnet mit Behandlungskosten (inkl. thermische Behandlung und P-Rückgewinnung) von ca. 200 – 220 CHF/t trockenem KS, wenn die Anlage bei einer Schweizer KVA integriert betrieben werden kann. Ohne diese Synergie würden die Behandlungskosten höher ausfallen (ca. 300 – 330 CHF/t trockenem KS) und dann vergleichbar mit denjenigen einer Monoverbrennung sein. Die Angaben zu Pyrophos in den für das Hearing gelieferten Unterlagen und im Fragebogen sind zum Teil widersprüchlich. Die Werte in Tabelle 8 wurden auf Grund einer Anfrage an CTU übernommen.

**Tabelle 8: Kostenvergleich der klärschlamm-behandelnden Verfahren. Für Budenheim wurden die kursiv dargestellten Kosten vom Autor anhand der Angaben des EuPhoRe- und CTU-Verfahrens abgeleitet.**

<b>Anbieter</b>	<b>EuPhoRe</b>	<b>Budenheim</b>	<b>CTU</b>
<b>Verfahren</b>	<b>EuPhoRe</b>	<b>ExtraPhos</b>	<b>Pyrophos</b>
<b>Lastfall</b>	10'000 t/a KS, TS	12'000 t/a KS, TS	
	[CHF/a]	[CHF/a]	[CHF/a]
<b>Produkterträge</b>	<b>- 0.025 – 0.10 Mio.</b>	<i>0.06 – 0.1 Mio.</i>	<b>-2.53 Mio.</b>
Betriebsmittelkosten	1.00 – 1.10 Mio.	<b>0.6 – 3.3 Mio.</b>	<b>2.20 Mio.</b>
Verwertungskosten für Rückstände	0.06 – 0.10Mio.	<i>0.10 Mio.</i>	<b>0.32 Mio.</b>
Wartung und Unterhalt	0.16 Mio.	<i>0.20 Mio.</i>	<b>0.32 Mio.</b>
Personalkosten	0.14 Mio.	<i>0.30 Mio.</i>	<b>0.86 Mio.</b>
Abschreibungs- und Zinskosten	0.60 Mio.	<i>0.60 Mio.</i>	<b>1.78 Mio.</b>
Sonstige Kosten	0.12 Mio.	---	---
<b>Summe Ausgaben</b>	<b>2.1 – 2.2 Mio.</b>	<i>3.2 Mio.</i>	<b>5.48 Mio.</b>
<b>Gesamtkosten</b>	<b>2.0 – 2.2 Mio.</b>	<b>3.1 Mio.</b>	<b>2.95 Mio.</b>
<b>Behandlungskosten pro Tonne KS, TS</b>	<b>200 – 220 CHF</b>	<b>310 CHF</b>	<b>250 CHF</b>

Allgemein muss bei den klärschlambasierten Verfahren auf die ebenfalls sehr unterschiedlichen Entwicklungsstände hingewiesen werden. Zum Zeitpunkt der VTMA waren die gelieferten Angaben zum ExtraPhos und Pyrophos-Verfahren nicht ausreichend bzw. deren Entwicklung zu wenig weit fortgeschritten. Aufgrund einer vorsichtigen Schätzung werden die Kosten dieser drei Verfahren in einer gleichen Grössenordnung sein und keine gravierenden Unterschiede aufweisen.

**Fazit:** Die resultierenden Kosten von ca. 200 – 300 CHF/t trockenem Klärschlamm (inkl. P-Rückgewinnung) sind unter der Berücksichtigung der noch vorhandenen Verfahrensunsicherheiten ( $\pm 50\%$ ) vergleichbar mit denjenigen der Monoverbrennung. Ohne die dort anfallenden Deponiekosten für die Klärschlammmasche liegen diese für die zentrale SVA des Kantons Zürich am Standort Werdhölzli bei ca. 290 CHF/t trockenem KS. Die Frage, ob nun eine MinRec-konforme Düngemittelanwendung der oben beschriebenen Verfahren ohne eine weitere Nachbehandlung bzw. Veredelung des entstehenden (Zwischen-)Produktes möglich ist, wird in Zukunft noch zu klären sein. Die schon in Kap. 5.4 getroffenen Aussagen zur geringen Marktakzeptanz dieser Produkte müssen bei der Kostenbetrachtung auch berücksichtigt werden, da dies zu Mehrkosten führen wird. Im Falle des EuPhoRe-Verfahrens führt eine Verdoppelung der Behandlungskapazität (20'000 t/a trockener KS) zu einer Kostenreduktion von ca. 30%, was mit derjenigen der KSA-basierten Verfahren vergleichbar ist.

### **Kosten im Vergleich zu den totalen Abwasserbehandlungskosten in der Schweiz**

Die Kosten der P-Rückgewinnung aller Verfahren der Technologielieferanten liegen unter Schweizer Rahmenbedingungen pro Einwohner (EW) in einem Bereich von 1.7 – 10 CHF/EW und Jahr. Vergleicht man diese mit den Gesamtkosten der Abwasserbehandlung (Kanal und ARA) von total ca. 200 CHF/EW und Jahr<sup>4</sup>, dann erkennt man deren kleine Bedeutung (1 – 5% Anteil). Die Art der Schlammbehandlung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der ARA- bzw. Gesamtabwasserkosten (<2%). Zum Vergleich sei auch erwähnt, dass für die zurzeit im Aufbau befindlichen Anlagen zur Reduktion von Mikroverunreinigungen ein mittlerer Kostenanteil von rund 10 CHF/EW und Jahr erwartet wird.

### **Kostenvergleich der Verfahren bzgl. der Produktion eines kg Phosphors**

Für klärschlammmaschebasierte Verfahren, die Phosphorsäure produzieren, kostet die Rückgewinnung eines Kilogramms Phosphor – abgeleitet aus den normierten Kostenrechnungen – ca. 5 CHF. Dieser Wert liegt im unteren Bereich der im Rahmen des Europäischen P-REX-Projekts (Nätörp & Remmen, 2015) ermittelten Kostenspanne über zwölf untersuchte P-Rückgewinnungs-Verfahren. Die Behandlungskapazität der zukünftigen Anlage hat gemäss Auskunft der beiden Anbieter einen grossen Einfluss. Wird die Kapazität von den hier im Bericht angenommen 30'000 t/a KSA auf 60'000 t/a KSA ausgeweitet, was der heute insgesamt der SVA zugeführten Klärschlammfracht entspricht, ergeben sich Kosteneinsparungen zwischen 20 und 30%. Im Vergleich zu diesen 4 – 5 CHF pro Kilogramm sekundär gewonnenen Phosphor aus Phosphorsäure liegt der Marktwert eines primär produzierten Kilogramms Phosphor zwischen 2 und 3 CHF.

---

<sup>4</sup> VSA Kennzahlenbericht 2011: Mittelwert von CHF 200 pro EW für Abwasserbehandlung (Kanal und ARA)

## **ANHANG 7: ZUSAMMENFASSUNG ZUM WORLD-CAFÉ**

In diesem Anhang werden die Erkenntnisse der Teilnehmenden aus dem am Hearing durchgeführten Workshop / Gruppenarbeit «World-Café» zu den gewählten, prioritären Themen aus Sicht der Anlagenbetreiber zusammengefasst:

### **Produkte und Märkte**

In der Frage der Vermarktungswege für Recycling-Phosphor und den entsprechenden Umsetzungschancen (Referat von M. Müller, fenaco / LANDOR, siehe Kapitel 0) zeigte sich, dass die Anlagenbetreiber als Zulieferer der (Dünger-)Industrie agieren und nicht direkt Düngerprodukte an die Landwirte absetzen wollen. Die Vorteile von flexibel einsetzbaren Produkten, wie Phosphor-Säure aus P4L bzw. ECOPHOS oder z.B. TCP, liegen auf der Hand. Aber auch standardisierte Produkte wie TSP 46 werden als geeignet angesehen, da diese auf dem Markt bekannt sind und auch international gehandelt werden können.

Einigkeit bestand darüber, dass es ein gemeinsames Ziel sein muss, andere Edukte (Zwischenprodukte) und Produkte (z.B. Rohphosphat, importierte Mineraldünger) aus dem Markt zu verdrängen und an deren Stelle die eigenen Recycling-Produkte zu positionieren.

Die Erkenntnisse des Hearings zeigten den Teilnehmenden auf, wie wichtig und vielversprechend die Zusammenarbeit zwischen den Anlagenbetreibern ist, sofern die Edukte bei passenden Verfahren in der Schweiz eingesetzt werden können. So könnte z.B. die sehr saubere Phosphor-Säure aus dem Phos4Life Verfahren vom ZAB im ZAB-Verfahren für die Herstellung des Triple-Super-Phosphates eingesetzt werden. Damit könnte der schadstoffarme Phosphor-Kreislauf in der Schweiz zunehmend geschlossen werden. Um die Planungssicherheit zu verbessern, sollten die Kontakte intensiviert und langfristige Abnahmevereinbarungen ausgehandelt werden. Auch eine regionale Zusammenarbeit mit Abnehmerorganisationen wäre denkbar. Ob es machbar bzw. zielführend ist, den gesamten in der Schweiz zurückgewonnen Phosphor auch in der Schweiz zu vermarkten, ist offen. Der Vorteil einer reinen Schweizer Lösung könnte darin liegen, dass die Qualitätssicherung über die gesamte Wertschöpfungskette gewährleistet werden kann. Allerdings ist zu beachten, dass die Schweiz über keine Infrastruktur zur Düngerproduktion mehr verfügt. Es braucht weitere Abklärungen/ Überlegungen zur Thematik. Das konkrete Vorgehen ist noch zu definieren.

Ob der Begriff «Recycling» positiv oder negativ belegt ist, war unter den Hearing-Teilnehmenden umstritten. Wegen der Nähe zu Abfall / Klärschlamm sind damit verbundene Themen wie Seuchengefahr (BSE u.a.) oder Schadstoffe (Schwermetalle und Mikroverunreinigungen) in der Beurteilung zu berücksichtigen. Dies trifft besonders auf Verfahren ohne Mineralisierung (z.B. Budenheim) zu, bei denen Organik im Dünger-Produkt enthalten ist. Zur Klärung dieser und weiterer Punkte ist eine Marktanalyse nötig, vorhandenes Wissen ist zu bündeln.

### **Finanzen und Finanzierung**

Die Teilnehmenden waren sich einig, dass – unter Schweizer Rahmenbedingungen – keine rentable P-Rückgewinnung möglich ist und es einen finanziellen Ausgleich braucht. Folgende Finanzierungsmodelle wurden zur Prüfung vorgeschlagen:

- Erhöhung der Gebühren (Abwasser- bzw. Klärschlammbehandlung).
- Finanzierung analog dem Modell zur Elimination von Mikroverunreinigungen (Fonds für die Phosphor-Rückgewinnung)
- Investitionsbeiträge des Bundes für Anlagenbetreiber, die eine Phosphor-Rückgewinnung umsetzen möchten (zeitlich begrenzte Förderung von Pionieren), eventuell finanziert durch eine Abgabe auf Phosphorimporte bis 2025 als Lenkungsmaßnahme und Starthilfe.
- Besteuerung von Futtermittel- und Düngerimporten, kombiniert mit Vorgaben, dass der importierte Dünger den Schweizer Vorgaben für Recycling-Dünger entsprechen muss.

- Versorgungssicherheit gefördert durch Bund, Landwirtschaftsbeitrag gebunden an den Einsatz von in der Schweiz zurückgewonnenem Phosphor-Dünger, Verwendung eines Teils der landwirtschaftlichen Subventionen für die Deckung der Mehrkosten der Phosphor-Rückgewinnung respektive des höheren Preises von Recycling-Dünger.

Als geeignetes Instrument, um den volkswirtschaftlichen Nutzen / Mehrwert der P-Rückgewinnung aufzuzeigen und zu entschädigen, wird die Schaffung eines (Qualitäts-)Labels angesehen. Um dieses bekannt zu machen, braucht es eine umfangreiche Kommunikationskampagne, die auf die Landwirte (prioritäre Zielgruppe: Biolandbau) und Konsumenten abzielt.

Bei allen vorgeschlagenen Wegen ist das Herstellen von Kostentransparenz als Grundlage für die Gestaltung der Finanzierungsinstrumente zentral.

### **Technologie und Kooperationen**

Die Gruppen waren der Meinung, dass es schwierig bzw. noch nicht möglich ist, die drei wichtigen Kriterien Entwicklungsstand, Technische Verfügbarkeit und Integration in bestehende Infrastruktur in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit und auf der Grundlage der heutigen Kenntnisse zu beurteilen.

Wie viele und wie grosse Anlagen es in der Schweiz brauchen würde, wurde ebenfalls diskutiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass es mindestens eine Anlage braucht, die Phosphor-Säure in der Schweiz produziert, damit weitere regionale Speziallösungen (ZAB, erzo und AVA Altenrhein) versorgt werden könnten, welche die bestehende Infrastruktur optimal nutzen und ihr Produkt mit der Phosphor-Säure aufwerten könnten. Für die Veredelung bräuchte es eine zentrale Lösung oder regionale Anstrengungen, die das Blending, die Qualitätssicherung und die Vermarktung übernehmen. Eine zentrale Anlage wäre aus wirtschaftlichen Überlegungen zu favorisieren. Bevor jedoch investiert wird, ist die Frage des Exports von Klärschlammasche nach Europa zeitgerecht einzubeziehen. Dabei ist zu beachten: Exporte sind nur möglich, wenn in der Schweiz keine Kapazitäten bestehen, zudem muss die Verwertung umweltgerecht nach Schweizer Standards erfolgen.

### **Rahmenbedingungen**

Aus Sicht der Anlagenbetreiber ist die baldige Bekanntgabe von Anforderungen an Rückgewinnungsquoten in Vollzugsbestimmungen zur VVEA notwendig. Weiter sollte ein verlässliches Qualitätsmanagement für die Verfahren und die daraus entstehenden Recycling-Produkte entwickelt werden. Und schliesslich müssen vor einem Vergleich der Verfahren die Systemgrenzen klar definiert werden.

Die Teilnehmenden sind sich nicht einig, ob die Phosphor-Rückgewinnung ab 2026 (wie von der VVEA gefordert) gewährleistet werden kann. Als Ergänzung, respektive bei ungenügender Kapazität für die Rückgewinnung in der Schweiz, wurde auch die Option Export von Klärschlammasche diskutiert. Dazu gibt es noch viele offene Fragen, die mit und von den Behörden zu klären sind.

Die Teilnehmenden haben festgestellt, dass es noch erhebliche Öffentlichkeitsarbeit braucht, um in der Schweiz die Akzeptanz für die Phosphorrückgewinnung und die daraus entstehenden Produkte zu fördern. Das BAFU wird zur Etablierung einer dazu geeigneten Plattform eingeladen.

Aus Sicht der Teilnehmenden ist die Zusammenarbeit der Kantone in der Abfallplanung von zentraler Bedeutung.

## **ANHANG 8: FAKTENBLÄTTER DER ANBIETER-/VERFAHREN**

Auf den folgenden Seiten sind die Faktenblätter, wie sie von den Technologie-Anbietern eingereicht wurden zusammengestellt.

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

---

<b>Name des Verfahrens:</b>	<b>Phos4Life</b>	
<b>Anbieter des Verfahrens:</b>	Técnicas Reunidas SA, Madrid (Spanien)	
<b>Ausgangsmaterial:</b>	Klärschlammasche und andere phosphorhaltige, anorganische Stoffe	
<b>Minstdurchsatz [t/a]</b>	30'000 t/a KSA	
<b>Produkt(e):</b>	technisch reine Phosphorsäure und Eisen(III)chloridlösung, Mineralik und Metallkonzentrat zur stofflichen Verwertung	

---

## Kurzbeschreibung:

<b>Verfahren</b>	Aus Klärschlammasche (KSA) und anderen phosphorhaltigen, anorganischen Verbindungen wird Phosphor (P) mit über 95%iger Ausbeute durch eine stark schwefelsaure Laugung extrahiert. Neben Phosphor gehen dabei auch die meisten der in der KSA enthaltenen Schwermetalle in Lösung. Der verbleibende metallarme mineralische Anteil wird abgetrennt und einer stofflichen Verwertung zugeführt. In einer ersten Solventextraktionsstufe wird Eisen als Eisenchloridlösung separiert und aufbereitet. Diese Lösung kann in Kläranlagen wieder als Fällmittel eingesetzt werden. In einer zweiten Solventextraktionsstufe wird die Phosphorsäure von den Schwermetallen befreit, aufkonzentriert und in handelsübliche technisch reine, 75%ige Phosphorsäure überführt. Die gelösten Schwermetalle werden anschliessend ausgefällt und einer stofflichen Verwertung zugeführt. Mit dieser nahezu 100%igen stofflichen Verwertung wird der ursprüngliche Abfall KSA in wiederverwertbare, hochwertige Produkte umgewandelt und Stoffkreisläufe effizient geschlossen.
<b>Schwermetallentfrachtung</b>	Zur Schwermetallentfrachtung wird hier die Technik der Solventextraktion eingesetzt. Diese Technologie ist weltweiter Standard zur Reinigung und Aufbereitung von primär hergestellter Phosphorsäure. Sie ermöglicht konstant hohe Produktqualitäten bei gleichzeitig sehr hoher Anlagenverfügbarkeit. Sollte für eine zukünftige Düngemittelherstellung eine geringere Phosphorsäurequalität (höhere Fluorid-, Chlorid- und Sulfatgehalte) ausreichend sein, so ist dies mit einer vereinfachten Verfahrensführung möglich.
<b>Produktqualität</b>	Technisch reine Phosphorsäure (75%) und Eisen(III)chloridlösung (40%) sind bestens etablierte Handelsprodukte mit grossem Absatzpotential im In- und Ausland. Dank der effizienten Schwermetallabreicherung erfüllt die Mineralik die Vorgaben zur stofflichen Verwertung in Schweizer Zementwerken bestens.
<b>Entwicklungsstand</b>	Die Entwicklung des Verfahrens befindet sich in der Schlussphase der Pilotierung. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Pilotierung Ende 2017 wird das Verfahren ab 2019 marktreif sein. Dank der weltweiten guten Referenzen und den langjährigen Erfahrungen des international renommierten Anlagenbauers Técnicas Reunidas in ähnlichen Projekten ist ein Misserfolg des Verfahrens nach der erfolgreich absolvierten Pilotierung aus technischen Gründen nahezu ausgeschlossen. Bewährte Technologien werden auf sinnvolle Weise miteinander kombiniert und ermöglichen so einen sicheren und robusten Betrieb.

---



# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

## Auswahlkriterien zur Berücksichtigung im Rahmen der VTMA

Nr.	Kriterium	Begründung, warum das Auswahlkriterium erfüllt wird
1	<b>Nutzung bestehender Infrastruktur</b>	Das Verfahren basiert auf dem Einsatz von Klärschlammasche (KSA). Demzufolge ist es für alle existierenden Schweizer Monoverbrennungsanlagen und deren anfallende Klärschlammasche geeignet. Eine grosse zentrale Anlage zur Behandlung der KSA bietet sich hier an. Ein Schweizer Standort ist dabei unabhängig vom Standort des KSA-Anfalls und nach ökologisch/ökonomischen Gesichtspunkten geeignet auszuwählen.
2	<b>P-Rückgewinnung mind. 50%</b>	Die erreichte P-Rückgewinnung liegt bei >95% bezogen auf den P-Gehalt der KSA.
	<b>Stoffliche Verwertung der Mineralik gem. VVEA Anhang 4 möglich</b>	Durch den Einsatz der starken Schwefelsäure zur KSA-Laugung werden die meisten Schwermetalle nahezu vollständig aus der KSA abgetrennt und die verbleibende Mineralik erfüllt die Qualitätsvorgaben gem. VVEA Anhang 4, Ziffer 1.1, 1.3 und 3.1 Buchstabe 1f.
3	<b>P-Gehalt im Produkt &gt;30% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Der P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalt der technisch reinen Phosphorsäure (TGA) wird lediglich durch die zu verdampfende Wassermenge in der Aufkonzentration bestimmt. Minimal beträgt dieser für TGA 51% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .
4	<b>Produktqualität</b>	<b>P:</b> technisch reine Phosphorsäure TGA (Standardhandelsware), Schwermetalle <1ppm; <b>Fe:</b> technisch reine Eisen(III)chloridlösung, Einsatz in ARAs zur P-Fällung möglich; <b>Metalle:</b> Konzentrat zur Aufbereitung in Metallhütten, SwissZinc etc.
	<b>Marktvolumen CH [t P/a]</b>	<b>TGA:</b> ca. 1'000 t P/a in CH für technische Anwendungen. Düngemittelherstellung erfolgt nicht mehr in der CH. Sollte dies aufgrund des P-Recyclings wieder eingeführt werden, so besteht auch hier ein grosser Bedarf an schwermetallarmer Phosphorsäure (>3'000 t p/a). <b>Fe, Mineralik und Metalle:</b> grosser Markt vorhanden
	<b>Marktvolumen EU [t P/a]</b>	<b>TGA:</b> ca. 150'000 t P/a. Diese Angaben beziehen sich auf Applikationen im technischen Bereich. Für den Einsatz in der Düngemittelherstellung ist das Marktvolumen in der EU noch deutlich grösser. <b>Fe, Mineralik und Metalle:</b> grosser Markt vorhanden
	<b>Anzahl der Abnehmer CH</b>	<b>TGA sowie Fe:</b> je >10 (Chemikalienhandel und Direktanwender), <b>Mineralik:</b> 2, <b>Metalle:</b> 3
	<b>Anzahl der Abnehmer EU</b>	<b>TGA sowie Fe:</b> je >100 (Chemikalienhandel und Direktanwender), <b>Mineralik:</b> >5, <b>Metalle:</b> >10
5	<b>Entwicklungsstand</b>	Pilotierung Ende 2017 abgeschlossen, Marktreife ab 2019
6	<b>Verfügbarkeit</b>	Anlage basiert auf weltweit etablierter Verfahrenstechnik zur Phosphorsäurereinigung, Verfügbarkeit > 8'000 h/a, keine Zwischenlagerung notwendig.

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

---

<b>Name des Verfahrens:</b>	<b><i>Ecophos Verfahren</i></b>
<b>Anbieter des Verfahrens:</b>	<b><i>Ecophos s.a.</i></b>
<b>Ausgangsmaterial:</b>	KSA
<b>Minstdurchsatz [t/a]</b>	<i>Technisch 5 kt KSA/a , Finanziell und technisch: 10 kt KSA/a</i>
<b>Produkt(e):</b>	Primärprodukt ist Phosphorsäure, allerhand Möglichkeiten zur Fertigung von Folgeprodukten (Dünger, Tierfutter)

---

## Kurzbeschreibung:

### Verfahren

Konventionell werden Dünger und Tierfutter aus phosphathaltigen Rohstoffen freigemacht – die Phosphate müssen in einer für Pflanzen oder Tiere verfügbaren Form vorhanden sein - durch Reaktion mit Schwefelsäure. Grosser Nachteil hier ist aber, dass Schwefelsäure auch Schwermetalle und z.B. Radium und Uranium löst und in dem kommerziellen Endprodukt und in Beiprodukte bringt. Der Ecophos-Prozess ist entwickelt worden um hochreine Produkte und Beiprodukte zu produzieren aus Rohstoffe von relativ schlechter Qualität wie Erz mit relativ vielen Schwermetallen und Radioaktivität und natürlich aus Klärschlammaschen (relativ viel Al, Fe, Si, Zn, Pb).

Die Ecophos-Philosophie ist zugleich einfach und effektiv. Lösen der Rohstoffe, so dass (durch Reaktion mit Phosphorsäure) vor allem Phosphat freikommt in der Lösung (Module 6 – siehe Bild 1 unten) und damit wird Phosphat von allen unlöslichen Bestandteilen separiert und abfiltriert. Danach, in Module 12 – Ionenaustausch-Einheit, wird die mit Kationen beladen Phosphorsäure gereinigt. Die Kationenaustausch-Einheit wird regeneriert mit Salzsäure. Hiermit wird Ca und Mg, und Fe und Al in separate zurückzugewinnende Ströme getrennt. Die Ca- und Mg-Lösung enthält auch die Schwermetalle, die dann in die CCP-Einheit abgetrennt werden durch kontrollierte pH-Erhöhung. Das Endprodukt kann durch Eindampfung als 20-62%-ige Lösung produziert werden.

Ecophos ist der Meinung dass in Rohstoffe für Dünger/Tierfutter keine Medizinreste, andere ungewünschte organische Bestandteile oder Pathogene anwesend sein dürfen. Darum ist Verbrennung des Klärschlamm ein absolutes Muss.

Ecophos produziert Phosphorsäure von sehr hoher Qualität. Das eröffnet die Möglichkeit, um mit diesem *P-Baustein* sogenannte „*tailormade*“ Dünger zu bauen. Die Düngerindustrie wird von Volumen-basierten Standardprodukten zu Qualität-basierten Spezialprodukten gehen. Dazu braucht man hochreine Bausteine. Daneben bietet das Ecophos Verfahren viele Möglichkeiten zur Produktion von Phosphatprodukten aus Phosphorsäure (Siehe Bild 2)

### Schwermetallentfrachtung

Siehe bei **Verfahren**. Die Schwermetalle werden gelöst in der Phosphorsäure und zusammen mit Ca und Mg abgetrennt durch Ionenaustauscher. Nach Regeneration mit Salzsäure entsteht eine Lösung mit Ca, Mg und Schwermetalle. Durch schrittweise pH-Anpassung werden die Schwermetalle abgetrennt. Es gibt auch die Möglichkeit additionaler Verfahren (z.B. zufügen von Sulfid) um sehr hohe Metallkonzentrationen abzutrennen, z.B. Blei und Arsen.

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

## Produktqualität

Die Phosphorsäure ist mindestens „*technical grade*“. Das heisst, auch einfach anzuwendend als Tierfutter oder Düngemittel.

Im Falle von 62% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> der Gehalt an Schwermetalle ist sehr niedrig:

As < 10 ppm

Cd < 5 ppm

Hg < 0.1 ppm

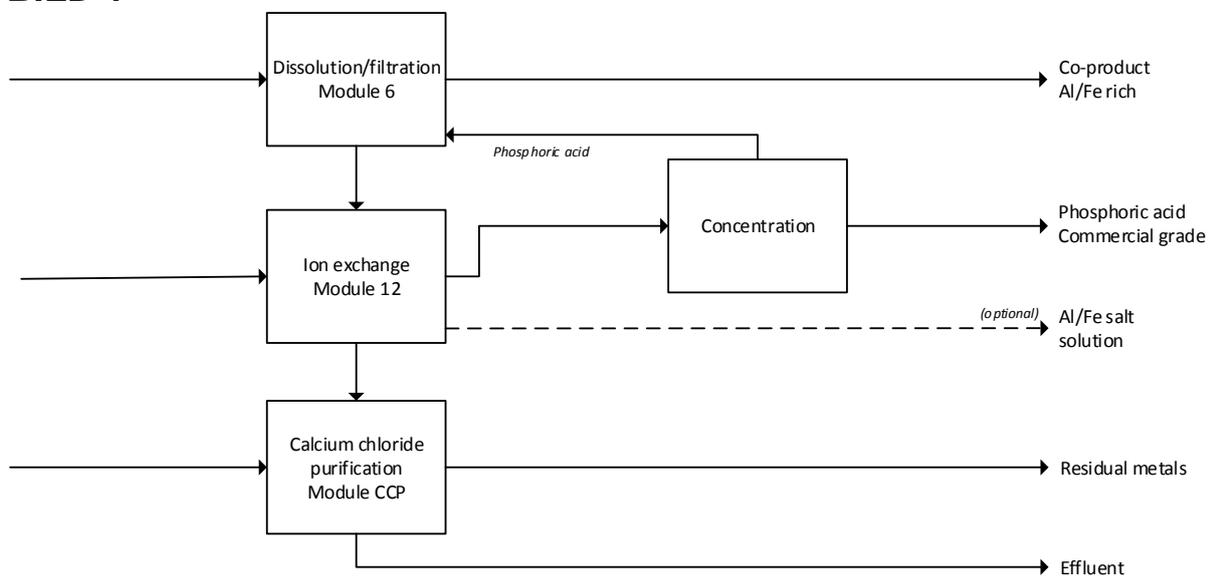
Pb < 10 ppm

Zn < 10 ppm

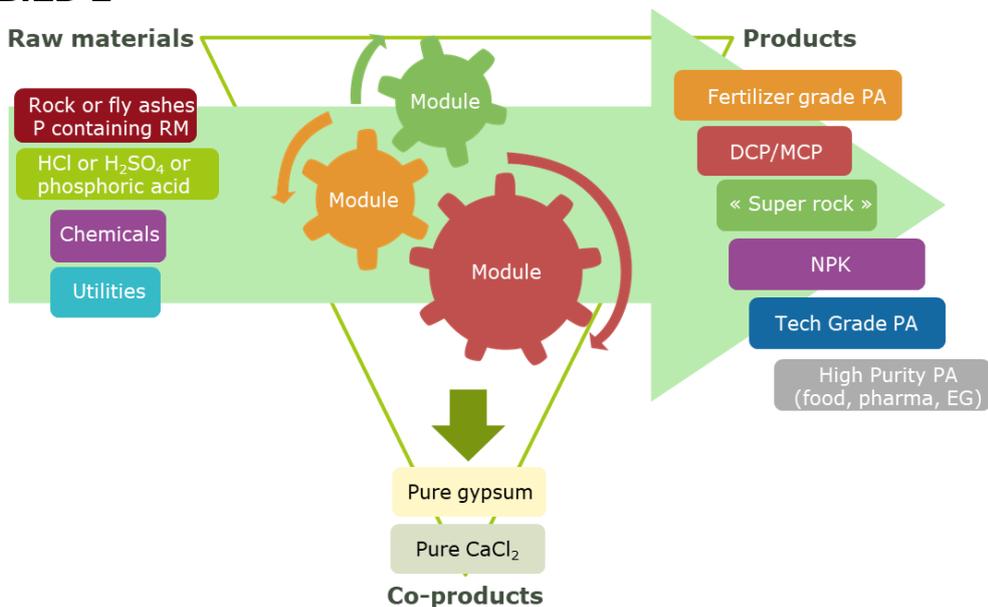
## Entwicklungsstand

Das Verfahren ist heute marktreif und kann industriell angewendet werden.

**BILD 1**



**BILD 2**



# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

## Einladungskriterien zur Berücksichtigung im Rahmen der VTMA

Nr.	Kriterium	Begründung, warum das Auswahlkriterium erfüllt wird
1	<b>Lösungsansatz nutzt die bestehende Klärschlamm-entsorgungsinfrastruktur</b>	<i>Das Ecophos-Verfahren braucht KSA. Präferentiell auch Dampf und Elektrizität am Standort. Die relativ geringen Mengen an Chemikalien werden eingekauft.</i>
2	<b>P-Rückgewinnung mind. 50%</b>	<i>&gt;90%. Oft über 93%, abhängig der Qualität der KSA</i>
	<b>Stoffliche Verwertung der Mineralik gem. VVEA Anhang 4 möglich</b>	<i>Siehe Produktqualität. Auch alle bei Qualität nicht spezifisch genannten Elemente sind innerhalb der gefragten Grenzwerte.</i>
3	<b>P-Gehalt im Produkt in % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<i>20-62%, durch Eindampfung</i>
4	<b>Produktqualität</b>	<i>Phosphorsäure; „technical grade“. Das heisst: dieses Produkt ist eine Handelsware (commodity).</i>
	<b>Marktvolumen CH [t P/a]</b>	<i>Wir schätzen die Nachfrage in der Schweiz (als P) um etwa 10 kt/a</i>
	<b>Marktvolumen EU [t P/a]</b>	<i>3-4 Millionen Tonnen P205. Also ein sehr grosses Marktpotential. Das ist genau der Grund, weshalb Ecophos diese Bausteine für Dünger produziert.</i>
	<b>Anzahl der Abnehmer CH</b>	<i>Wir schätzen die Anzahl der Abnehmer von grösseren Volumen in der Schweiz auf 5-10. Gerne melden wir hier, dass Ecophos selber ein Abnehmer von technischer Phosphorsäure ist. Wir sehen hier also überhaupt kein Marktrisiko. Wir weisen darauf hin, dass Phosphorsäure ein ganz weit akzeptiertes Marktprodukt ist und das die Ecophos-Qualität sogar (viel) höher ist als die konventionell vorhandene Säure.</i>
	<b>Anzahl der Abnehmer EU</b>	<i>Sehr gross! Siehe auch Bemerkungen bei <b>Anzahl der Abnehmer CH</b></i>
5	<b>Entwicklungsstand</b>	<i>Industriell verfügbar</i>
6	<b>Verfügbarkeit</b>	<i>Heute verfügbar. Ecophos hat eine Demo-Anlage (Kapazität 8kt KSA/a) in Bulgarien, um verschiedene Rohstoffe zu testen.</i>

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

---

<b>Name des Verfahrens:</b>	<b><i>Sepholix – SElective PHOspate LIXiviation</i></b>
<b>Anbieter des Verfahrens:</b>	<b><i>Cimo</i></b>
<b>Ausgangsmaterial:</b>	<b><i>KSA – cendres de mono-incinération de boues de STEP</i></b>
<b>Minstdurchsatz [t/a]</b>	<b><i>500 to / an – 2'000 to/an (at the time of the discussions)</i></b>
<b>Produkt(e):</b>	<b><i>Phosphate Tri Calcite (TCP) <math>Ca_3(PO_4)_2</math></i></b>

---

## Kurzbeschreibung:

<b>Verfahren</b>	<p>For years, phosphorus chemistry in Monthey has generated phosphorus flow of liquid waste which is treated in the Wet Air Oxidation plant. In this context, Cimo has already been operating a phosphate recovery unit for several decades.</p> <p>Cimo is also the Waste water treatment plant operator. The sludge are incinerated onsite in a mono incinerator.</p> <p>The Sepholix process consists in :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Acid leaching of the ashes (new installation)</li><li>- Precipitation of heavy metals (new installation)</li><li>- Precipitation of phosphates as TCP in the existing facility.</li></ul> <p>The ongoing research consists in optimising the ashes lixiviation process in order to have the proper flow to enter the existing phosphate recovery unit.</p> <p>Installed capacity permits the treatment of Cimo ashes, and should be capable to absorb up to 2-3'000 to ashes per year (must be validated – depends on P content of ashes)</p> <p>Then, if more capacity is needed, some additional investment would probably be necessary.</p>
<b>Schwermetallentfrachtung</b>	Heavy metals are precipitated with an agent and transformed into sulfides
<b>Produktqualität</b>	TCP : 34% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , mineral fertiliser, mainly for fertilisers industry
<b>Entwicklungsstand</b>	<p>TCP production in Cimo is already active for more than 20 years, ~5'000 to/year of products are sold in Germany and France.</p> <p>2018 will be dedicated to finalise and optimise the process in lab, to develop the pilot test unit, for Cimo ashes and other ashes of partners if some are interested.</p>

---

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

## Einladungskriterien zur Berücksichtigung im Rahmen der VTMA

Nr.	Kriterium	Begründung, warum das Auswahlkriterium erfüllt wird
1	<b>Lösungsansatz nutzt die bestehende Klärschlamm-entsorgungsinfrastruktur</b>	<i>Existing mono incineration plants and existing phosphate production facility in Cimo. Only the tanks for acid lixiviation and metals separation must be built.</i>
2	<b>P-Rückgewinnung mind. 50%</b>	<i>The P recovery efficiency of the tests are 70% minimum</i>
	<b>Stoffliche Verwertung der Mineralik gem. VVEA Anhang 4 möglich</b>	<i>To be checked : must be OK with the residues of lixiviation / metals sulfides probably go to deponie</i>
3	<b>P-Gehalt im Produkt in % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<i>33-34%</i>
4	<b>Produktqualität</b>	<i>TCP : mineral fertilizer REACH registration</i>
	<b>Marktvolumen CH [t P/a]</b>	
	<b>Marktvolumen EU [t P/a]</b>	
	<b>Anzahl der Abnehmer CH</b>	<i>1 potential (tests ongoing)</i>
	<b>Anzahl der Abnehmer EU</b>	<i>2 active (Germany, France) Potential : ~10 (Italy, France, Austria, Belgium)</i>
5	<b>Entwicklungsstand</b>	<i>2018 : end of research / optimisation + pilot unit for Cimo ashes Tests for other partner</i>
6	<b>Verfügbarkeit</b>	<i>2020</i>

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

---

<b>Name des Verfahrens:</b>	<i>ZAB-P-Dünger</i>
<b>Anbieter des Verfahrens:</b>	<i>ZAB zusammen mit einem Lizenzpartner</i>
<b>Ausgangsmaterial:</b>	<i>Ausgangsmaterial ist die Asche aus der Mineralisierung phosphorhaltiger Grundstoffe / Mineralisierung in Wirbelschichtfeuerung</i>
<b>Minstdurchsatz [t/a]</b>	<i>Ausgangsmaterial bis max. 10'000 t/a Asche</i>
<b>Produkt(e):</b>	<i>Tripelsuperphosphat P46 als Einnährstoffdünger / als Mehrnährstoffdünger in Form von NPK und PK</i>

---

## Kurzbeschreibung:

<b>Verfahren</b>	<i>Die mineralisierte Asche wird nasschemisch behandelt, homogenisiert, biologisch aktiviert und anschliessend granuliert.</i>
<b>Schwermetallentfrachtung</b>	<i>Die max. Schwermetallfracht wird durch das bewusst schwermetallarme Inputmaterial und durch Additive bei der Mineralisierung gesteuert</i>
<b>Produktqualität</b>	<i>TSP 46 als Einnährstoffdünger / NPK und PK als Mehrnährstoffdünger</i>
<b>Entwicklungsstand</b>	<i>Technische Marktreife liegt vor</i>

---

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

## Einladungskriterien zur Berücksichtigung im Rahmen der VTMA

Nr.	Kriterium	Begründung, warum das Auswahlkriterium erfüllt wird
1	Lösungsansatz nutzt die bestehende Klärschlamm-entsorgungsinfrastruktur	<i>Die bestehende Infrastruktur (Entwässerungsanlagen in den ARAs und Mineralisierungsanlage in Bazenheim) kann weiter genutzt werden.</i>
2	P-Rückgewinnung mind. 50%	<i>100 %, da das Mineralisat / die Asche vollumfänglich zu Produkt umgesetzt wird</i>
	Stoffliche Verwertung der Mineralik gem. VVEA Anhang 4 möglich	<i>Keine mineralische Restfraktion</i>
3	P-Gehalt im Produkt in % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<i>Kann wie beim TSP 46% erreichen</i>
4	Produktqualität	<i>TSP als Einnährstoffdünger in Granulatform / NPK und PK als Mehrnährstoffdünger formuliert in Granulatform möglich</i>
	Marktvolumen CH [t P/a]	<i>Mindestens 15'000 t/a</i>
	Marktvolumen EU [t P/a]	<i>Mehrere hunderttausend Tonnen</i>
	Anzahl der Abnehmer CH	<i>offen</i>
	Anzahl der Abnehmer EU	<i>offen</i>
5	Entwicklungsstand	<i>Technische Marktreife gegeben</i>
6	Verfügbarkeit	<i>offen</i>

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

---

<b>Name des Verfahrens:</b>	<b>ExtraPhos®</b>
<b>Anbieter des Verfahrens:</b>	<b>Chemische Fabrik Budenheim KG</b>
<b>Ausgangsmaterial:</b>	<i>Klärschlamm</i>
<b>Minstdurchsatz [t/a]</b>	<i>k.A.</i>
<b>Produkt(e):</b>	<i>Calciumphosphat</i>

---

## Kurzbeschreibung:

<b>Verfahren</b>	<i>Das ExtraPhos®-Verfahren setzt bereits im nassen Klärschlamm an. Das Verfahren gewinnt Phosphor aus Klärschlamm, bevor dieser unter hohem Energieeinsatz verbrannt wird. Bei dem von Budenheim patentierten Verfahren sorgt allein Kohlenstoffdioxid für eine Mobilisierung des an die Klärschlammpartikel gebundenen Phosphors. Im Laufe des Prozesses werden so auf umweltfreundliche Art und Weise die im Schlamm enthaltenen nicht erwünschten Stoffe abgetrennt. Weitere Informationen: siehe Anhang</i>
<b>Schwermetallentfrachtung</b>	<i>Siehe Anhang</i>
<b>Produktqualität</b>	<i>Siehe Anhang</i>
<b>Entwicklungsstand</b>	<i>Januar 2018: Pilotierung 2019: Marktreife</i>

---

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

## Einladungskriterien zur Berücksichtigung im Rahmen der VTMA

Nr.	Kriterium	Begründung, warum das Auswahlkriterium erfüllt wird
1	<b>Lösungsansatz nutzt die bestehende Klärschlamm- sorgungsinfrastruktur</b>	Nutzung der vorhandenen Aggregate zur Klärschlammmentwässerung. Die Nutzung weiterer Anlagenkomponenten ist abhängig von der bestehenden Kläranlageninfrastruktur.
2	<b>P-Rückgewinnung mind. 50%</b>	Zielvorgabe von 50% ist abhängig von der Klärschlammbeschaffenheit.
	<b>Stoffliche Verwertung der Mineralik gem. VVEA Anhang 4 möglich</b>	Bei Verwertung in der Zementindustrie (Co-Verbrennung) ist eine 100%ige Nutzung der Mineralik möglich.
3	<b>P-Gehalt im Produkt in % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	>20%
4	<b>Produktqualität</b>	Siehe Anhang
	<b>Marktvolumen CH [t P/a]</b>	Gemäß maximalem Mineraleinsatz
	<b>Marktvolumen EU [t P/a]</b>	s.o.
	<b>Anzahl der Abnehmer CH</b>	Düngemittelherstellung, -handel und -anwender
	<b>Anzahl der Abnehmer EU</b>	s.o.
5	<b>Entwicklungsstand</b>	Pilotierung
6	<b>Verfügbarkeit</b>	Ab 2019 verfügbar.

# **Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Betrieb der ExtraPhos<sup>®</sup>-Pilotanlage und Ausblick in die großtechnische Umsetzung**

## **1 Einleitung**

In Deutschland wurde am 02. Oktober 2017 ein Gesetz zur Rückgewinnung von Phosphor aus kommunalem Abwasser verabschiedet. Die Chemische Fabrik Budenheim KG (nachfolgend: Budenheim) begann bereits 2010 mit der Entwicklung des ExtraPhos<sup>®</sup>-Verfahrens zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm. Nach Laborversuchen und der Erprobung im Technikumsmaßstab wurde im Juni 2017 eine Pilotanlage an der Kläranlage Mainz in Betrieb genommen.

## **2 Phosphor und Klärschlammverwertung**

Phosphor ist Grundbaustein aller Lebewesen. In Menschen, Tieren und Pflanzen ist er elementarer Bestandteil von Knochensubstanz und Erbgut. Weltweit werden pro Jahr über 200 Mio. t Phosphaterz abgebaut. Rund 90% dieser Phosphate fließen in Dünge- und Futtermittel und sichern so unsere Nahrungsgrundlage. Doch die natürlichen Mineralvorkommen sind begrenzt. Im Mai 2014 setzte die Europäische Kommission Phosphor als einen von 20 Stoffen auf die Liste der kritischen Rohstoffe. Auch vor dem Hintergrund der planetaren Belastungsgrenzen der Erde besitzt Phosphor eine wesentliche Bedeutung. Von neun planetaren Grenzen sind vier inzwischen überschritten. Hierzu gehören neben Klimawandel, Biodiversität und Landnutzung auch die biogeochemischen Kreisläufe, insbesondere der Stickstoff- und der Phosphor-Kreislauf.

In Deutschland sind wir bisher zu 100% von Phosphorimporten mineralischen Ursprungs abhängig. Aber auch bei uns findet man Phosphorquellen in sekundären Rohstoffen, wie Klärschlamm oder Gülle. Klärschlamm ist ein nährstoffreiches organisches Abfallprodukt. Mancherorts setzen Bauern Klärschlamm noch zur direkten Düngung auf landwirtschaftlichen Flächen ein. Diese Form der Verwertung soll in Zukunft nur noch stark eingeschränkt möglich sein. Grund sind die im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe, wie Schwermetalle oder Krankheitserreger, die nicht im Boden angereichert werden sollen.

Der Trend geht daher weg von der landwirtschaftlichen Nutzung von Klärschlämmen hin zur Verbrennung. Bei der Verbrennung von Klärschlamm verbleibt als Rest eine Asche, die zwar große Mengen an Phosphor enthält. Dieser lässt sich jedoch nur mit erheblichem Aufwand rückgewinnen.

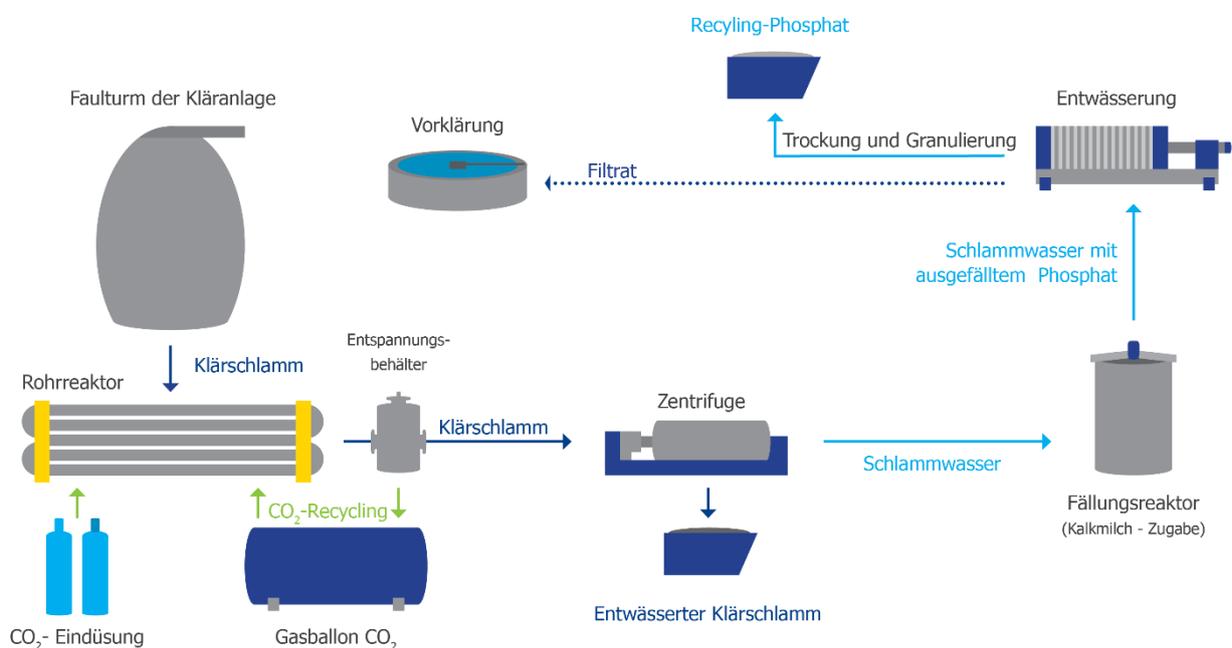
### 3 Das ExtraPhos®-Verfahren

Das ExtraPhos®-Verfahren setzt bereits im nassen Klärschlamm an. Das Verfahren gewinnt Phosphor aus Klärschlamm, bevor dieser unter hohem Energieeinsatz verbrannt wird. Bei dem von Budenheim patentierten Verfahren sorgt allein Kohlenstoffdioxid für eine Mobilisierung des an die Klärschlammpartikel gebundenen Phosphors. Im Laufe des Prozesses werden so auf umweltfreundliche Art und Weise die im Schlamm enthaltenen nicht erwünschten Stoffe abgetrennt.

Das zur Mobilisierung der Phosphate eingesetzte Kohlenstoffdioxid wird im Prozess nicht verbraucht, sondern kann im Kreis geführt werden. ExtraPhos® ist somit klimafreundlich und ressourcenschonend. Darüber hinaus ist das Verfahren je nach Kläranlage mit relativ geringen Investitions- und Betriebskosten realisierbar. Das ExtraPhos®-Verfahren kann somit einen Beitrag leisten, um den Bedarf an Düngemitteln in Deutschland über den endlichen Wertstoff Phosphor zu sichern. Dieses Vorgehen ermöglicht unserem Land zugleich eine größere Unabhängigkeit von Importen und sichert auf lange Sicht unsere Nahrungsmittelversorgung. Das im Prozess gebildete Calciumphosphat kann als Dünger verwendet werden, es könnte möglicherweise sogar in der Biolandwirtschaft eingesetzt werden.

Wird der an Phosphor abgereicherte Klärschlamm als Brenn- und Rohstoff in der Zementproduktion verwertet, so ist eine rückstandsfreie, vollständige Verwertung des Restklärschlammes möglich, was dem „zero waste“-Gedanken entspricht.

Die folgende Abbildung zeigt das Verfahrensschema in der Übersicht.



**Abbildung 1: Verfahrensschema ExtraPhos®**

© Budenheim

Zur Extraktion der Phosphate wird ausschließlich Kohlenstoffdioxid verwendet, welches im Prozess im Kreis geführt wird. Der Prozess lässt sich grob in drei Prozessschritte gliedern. Diese sind Kohlensäure-Zugabe, Fest-/Flüssig-Trennung und Phosphatfällung.

Bei der Kohlensäure-Zugabe wird der Klärschlamm bei einem Druck von ca. 10 bar mit Kohlenstoffdioxid versetzt. Bei dieser Behandlung sinkt der pH-Wert auf einen Wert zwischen 4,5 und 5,5 ab und ein Teil der an die Klärschlammatrix gebundenen Phosphate wird mobilisiert.

Bei der anschließenden Fest-/Flüssig-Trennung werden die Klärschlammteilchen von der flüssigen Phase getrennt. Hierzu werden Klärschlamm-Entwässerungs-Aggregate nach dem Stand der Technik eingesetzt. Der dabei verbleibende, entwässerte Klärschlamm kann der weiteren Verwertung zugeführt werden.

Das Kohlenstoffdioxid, welches zur pH-Wert-Absenkung eingesetzt wird, geht nach der Entspannung in die gasförmige Phase über und wird der Flüssigkeit entzogen. Es wird aufgefangen, verdichtet und kann dem Prozess erneut zugeführt werden. Das Schlammwasser wird dem dritten Prozessschritt, der Phosphatfällung zugeführt. Hierbei werden die gelösten Phosphate als Calciumphosphat ausgefällt. Um den Vorgang der Fällung zu beschleunigen, wird im Fällungsreaktor eine geringe Menge an Kalkmilch zugegeben, wobei ein Großteil des benötigten Calciums bereits im Schlammwasser enthalten ist. Nach Abtrennung, Trocknung und Granulierung können die Calciumphosphate als Düngemittel eingesetzt werden.

#### **4 Aufbau der Pilotanlage**

Die im Juni 2017 in Betrieb genommene Pilotanlage ermöglicht erstmals eine kontinuierliche Verfahrensführung. Die Pilotanlage hat einen Durchsatz von maximal 2 m<sup>3</sup> Faulschlamm pro Stunde und wird zunächst an der Kläranlage Mainz-Mombach getestet. Diese Kläranlage hat eine Anschlussleistung von ca. 400.000 EW (Einwohnerwerten) und betreibt eine simultane chemische Phosphor-Elimination mittels Eisensulfat-Lösung (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>).

Die folgende Abbildung zeigt die Pilotanlage und den benötigten CO<sub>2</sub>-Tank. Insgesamt besteht die Pilotanlage aus zwei 20'-Containern. Container 1 enthält den Rohrreaktor zur kontinuierlichen Versetzung des Klärschlammes mit CO<sub>2</sub> und die anschließende Entspannungseinheit. Container 2 enthält als Entwässerungsaggregat eine Zentrifuge und die Fällungseinheit zur Produktion von Calciumphosphat.



**Abbildung 2: ExtraPhos®-Pilotanlage und CO<sub>2</sub>-Tank an der Kläranlage Mainz-Mombach**

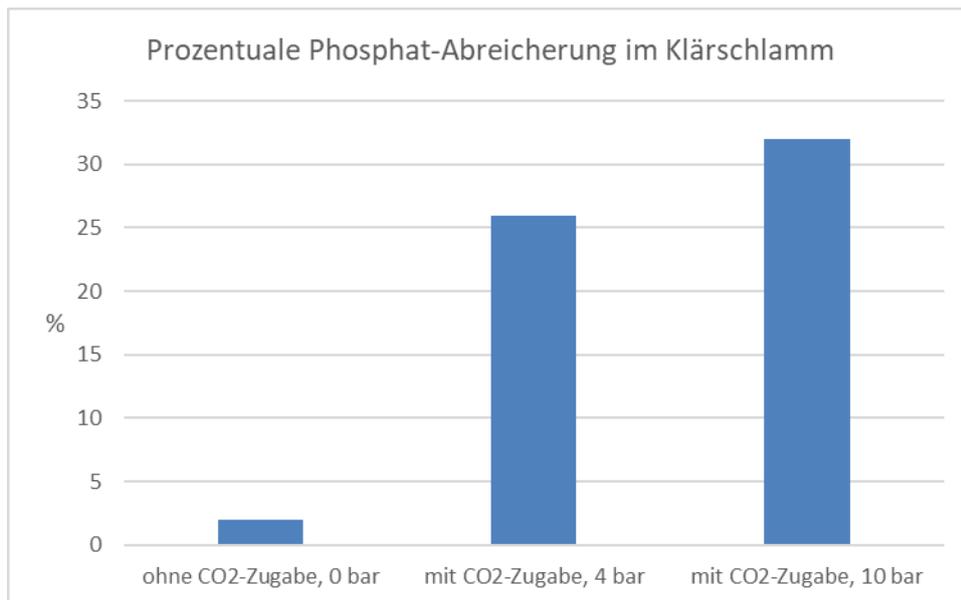
## **5 Erste Ergebnisse des Pilotbetriebes**

Nach der Inbetriebnahme wurden nach und nach alle Baugruppen zugeschaltet. Im August wurden zunächst Werte ohne die Zugabe von Kohlenstoffdioxid ermittelt. Anschließend erfolgte eine schrittweise Anhebung des Druckes im Rohrreaktor bis zu 10 bar.

Während des Pilotbetriebes traten verschiedene Probleme im Anlagenbetrieb auf. Beispielsweise stellte die Druckhaltung im Rohrreaktor zunächst eine Hürde dar. Durch den Einsatz eines mit Druckluft betriebenen Quetschventils konnte der Druck bis 10 bar erhöht und konstant bei diesem Wert gehalten werden.

Ein weiteres Problem stellten Verzopfungen in den Rohrleitungen dar. Im Klärschlamm enthaltene Haare und sonstige Störstoffe verstopften die Rohrleitungen. Um dies zu vermeiden, wurde der Anlage ein Mazerator vorgeschaltet. Dieser zerkleinert alle Bestandteile, wodurch sich Verstopfungen effektiv vermeiden lassen.

Die Phosphor-Abreicherungsrate liegt in Mainz aktuell noch nicht bei den geforderten 50%, bzw. der erforderlichen Abreicherung des Klärschlammes auf einen Phosphor-Gehalt von maximal 2 g P/kg Klärschlamm-Trockenmasse. Die folgende Grafik zeigt die erreichte prozentuale Phosphat-Abreicherung bei verschiedenen Drücken.



**Abbildung 3: Erste Ergebnisse zur prozentualen Phosphat-Abreicherung bei verschiedenen Drücken**

Stellschrauben, um die Ausbeute noch weiter zu erhöhen, sind z.B. eine Verlängerung der Verweilzeit, die Rückführung von bereits behandeltem Klärschlamm und der Einsatz von flüssigem CO<sub>2</sub>. Der Einfluss dieser Maßnahmen soll am nächsten Einsatzort der Pilotanlage getestet werden.

## 6 Ausblick in die Großtechnik

Obwohl die in der Novelle der Klärschlamm-Verordnung geforderten Werte zur Phosphor-Abreicherung bislang nur im Labor- und Technikumsmaßstab erreicht wurden, stehen einige großtechnische Umsetzungen des ExtraPhos<sup>®</sup>-Verfahrens an. Aktuell wird untersucht mit welchen Auswirkungen ein Kläranlagenbetreiber bei Betrieb einer großtechnischen ExtraPhos<sup>®</sup>-Anlage zu rechnen hat. Hierbei wird besonderes Augenmerk auf die Veränderung der Klärschlammzusammensetzung, die Klärschlamm-Trockenmasse nach der Entwässerung und die Zentratzusammensetzung gelegt. Es hat sich bisher bereits gezeigt, dass definitiv mit keiner Verschlechterung des Entwässerungsergebnisses zu rechnen ist.

Da das ExtraPhos<sup>®</sup>-Verfahren an der nassen Klärschlammphase ansetzt, wird direkt an der Kläranlage ein Phosphatdünger erzeugt. Dieser kann in der umliegenden Region als Dünger eingesetzt werden, was Transportkosten reduziert. Der entwässerte, an Phosphat abgereicherte Klärschlamm kann anschließend verschiedenen Verwertungswegen zugeführt werden, z.B. der stofflichen und thermischen Verwertung in der Co-Verbrennung.

Die folgende Abbildung zeigt die einfache Integrierbarkeit des ExtraPhos<sup>®</sup>-Verfahrens in eine bestehende Kläranlage. Hierbei können z.B. Entwässerungsaggregate der Kläranlage weiterhin genutzt werden.

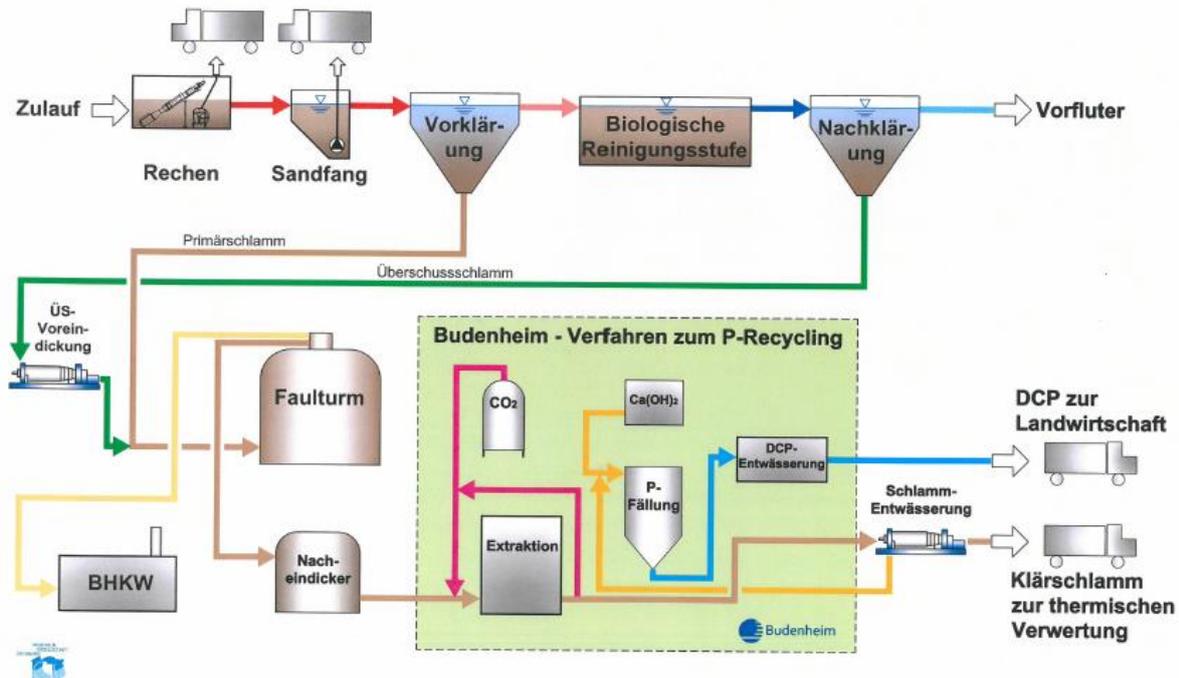


Abbildung 4: Integration einer ExtraPhos<sup>®</sup>-Anlage in den bestehenden Kläranlagenbetrieb

## 7 Charakterisierung des erzeugten Recycling-Produktes

Beim ExtraPhos<sup>®</sup>-Verfahren wird als Produkt Dicalciumphosphat erzeugt. Das gewonnene Phosphat liegt zunächst in Wasser gelöst vor. Mittels klassischer Fällung und Filtration wird das Calciumphosphat separiert, hierbei entsteht eine vergleichsweise dickflüssige Phosphatsuspension. Diese wird im nächsten Prozessschritt getrocknet.

Je nach Zweckbestimmung kann das getrocknete Calciumphosphat weiterverarbeitet werden. Für die Anwendung in der Landwirtschaft ist eine Granulierung möglich, um den Dünger mit den herkömmlichen Methoden auf Felder ausbringen zu können.

Aktuell ist ein Einsatz der rückgewonnenen Phosphate ausschließlich in der Landwirtschaft vorgesehen. Daher wurden umfangreiche Laboruntersuchungen des Recyclingdüngers durchgeführt, was Schwermetallgehalte, Löslichkeit und organische Schadstoffe betrifft. Diese sind in den folgenden Tabellen dargestellt. Neben den im Recycling-Dünger ExtraPhos<sup>®</sup> gemessenen Werten sind außerdem die in der Klärschlammverordnung und Düngemittelverordnung vorgegeben Grenzwerte nach Stand 2015 angegeben. In Tabelle 1 ist zu erkennen, dass das ExtraPhos<sup>®</sup> Recycling-DCP (DCP=Dicalciumphosphat) alle in Düngemittel- und Klärschlammverordnung vorgeschriebenen Grenzwerte bezüglich der Schwermetallgehalte weit unterschreitet.

**Tabelle 1: Schwermetallgehalt in ExtraPhos® im Vergleich zu Klärschlamm und Düngemittelverordnung**

Parameter [mg/kg Schlamm- Trockenmasse]	ExtraPhos® Recycling-DCP <sup>1) 2)</sup> [mg/kg]	Klärschlamm- verordnung ab 2015*	Düngemittel- verordnung ab 2015*
Blei	6,8	900	150
Cadmium	< 0,5	10	1,5
Nickel	13	200	80
Quecksilber	0,1	8	1
Arsen	< 4	-	40
Thallium	< 0,2	-	1
Kupfer	41,1	900	-
Zink	515	2.500	-

\*Zahlen gemäß AbfKlär-Verordnung und DüM-Verordnung

<sup>1)</sup> DCP = Dicalciumphosphat

<sup>2)</sup> Untersuchung durch AGROLAB

Durch die Kontrolle des pH-Wertes bei der Phosphatfällung am Ende des Prozesses, stellt das Verfahren sicher, dass kein Tricalciumphosphat, sondern das erheblich besser lösliche und besser bioverfügbare Dicalciumphosphat ausfällt (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Löslichkeit von ExtraPhos®**

	ExtraPhos® Recycling-DCP <sup>1)</sup> [%]
Phosphor (als P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	21,7
Ammoniumcitratlöslichkeit	60
Wasserlöslichkeit	0,5
Mineralsäurelöslichkeit	92,3
Mineralsäurelöslichkeit für org. Dünger	86,1

<sup>1)</sup> DCP = Dicalciumphosphat

Organische Schadstoffe sind von immer größerer Relevanz, besonders was die landwirtschaftliche Nutzung von Stoffströmen betrifft. Hierzu findet man in Düngemittel- und Klärschlammverordnung bereits einige Grenzwerte. In Tabelle 3 ist zu sehen, dass das ExtraPhos® Recycling-DCP diese Grenzwerte einhält. Organische Schadstoffe verbleiben beim ExtraPhos®-Verfahren in der festen Klärschlammphase und können einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

**Tabelle 3: Organische Schadstoffe in ExtraPhos® im Vergleich zu Klärschlamm- und Düngemittelverordnung**

Parameter [mg/kg Schlamm-Trockenmasse]	ExtraPhos® Recycling-DCP <sup>1) 2)</sup> [mg/kg]	Klärschlamm- verordnung ab 2015*	Düngemittel- verordnung ab 2015*
Σ der Dioxine & dl-PCB dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle	3,3 <sup>3)</sup> + 0,69 <sup>3)</sup>	-	30 <sup>3)</sup>
PFT perfluorierte Tenside	< 0,01	-	0,1
PCB polychlorierte Biphenyle	0,001	0,1	-
AOX adsorbierbare organisch gebundene Halogene	13,2	400	-
B(a)P Benzo(a)pyren	< 0,05	1	-

\*Zahlen gemäß AbfKlär-Verordnung und DüM-Verordnung

<sup>1)</sup> DCP = Dicalciumphosphat

<sup>2)</sup> Untersuchung durch AGROLAB, <sup>3)</sup> Angabe in ng/kg

## 8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen erfolgen, sobald die umfangreichen Versuche an der Pilotanlage abgeschlossen wurden. Bisher durchgeführte Berechnungen zeigen, dass das ExtraPhos®-Verfahren konkurrenzfähig mit anderen Rückgewinnungsverfahren ist. Dabei spielt besonders der geringe Chemikalienverbrauch eine große Rolle. Denn das zur Absenkung des pH-Werts eingesetzte Kohlendioxid wird im Kreislauf geführt und daher nicht verbraucht, sondern wiederverwertet.

Das ExtraPhos®-Verfahren eignet sich für alle Kläranlagen mit oder ohne Schlammfäulung, die Phosphor aus dem Abwasser eliminieren. Aktuell werden aus ca. 91 % der Abwassermenge Phosphor an Kläranlagen eliminiert. Das Verfahren kann unabhängig von der Art der Phosphor-Elimination, biologisch oder chemisch, in den Betrieb von Kläranlagen installiert werden. Es sind daher keine aufwendigen Verfahrensumstellungen seitens der Kläranlage erforderlich.

Zur Entwässerung des Klärschlammes können in der Regel Aggregate verwendet werden, die bereits an den Kläranlagen vorhanden sind. Dies wirkt sich positiv auf die Investitionskosten für das Phosphat-Recycling aus.

Das ExtraPhos®-Verfahren läuft bei Umgebungstemperatur ab. Es ist kein zusätzlicher thermischer Energieeintrag erforderlich.

Die Vorteile dieses neuen Verfahrens liegen auf der Hand: Das Verfahren gilt als klimafreundlich und ressourcenschonend, da das eingesetzte Kohlenstoffdioxid im Kreis geführt wird. Ein thermischer Energieeintrag ist ebenfalls nicht erforderlich. Als Produkt entsteht ein gesundheitlich unbedenklicher Phosphatdünger zur Vermarktung. Das ExtraPhos<sup>®</sup>-Verfahren ist erfolgreich, auch ohne den Einsatz von Mineralsäuren und kann unter geringen Investitions- und Betriebskosten in allen Kläranlagen eingesetzt werden.

## **Literatur**

Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), die zuletzt durch Artikel 74 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist (AbfKlärV)

Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. Mai 2015 (BGBl. I S. 886) geändert worden ist (DüMV)

Wiechmann et. al.: Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Bundesumweltamt, Dessau-Rosslau 2013

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

---

<b>Name des Verfahrens:</b>	<b><i>EuPhoRe®-Verfahren</i></b>
<b>Anbieter des Verfahrens:</b>	<b><i>EuPhoRe GmbH</i></b>
<b>Ausgangsmaterial:</b>	<i>Klärschlamm</i>
<b>Minstdurchsatz [t/a]</b>	<i>Ca. 1.000 t TS/a</i>
<b>Produkt(e):</b>	<i>Phosphathaltige-schwermetallabgereicherte-organikfrei Asche und CO<sub>2</sub>-neutrale Energie</i>

---

## Kurzbeschreibung:

### Verfahren

EuPhoRe hat ein zweifach chemo-thermisch auf Klärschlamm einwirkendes Verfahren entwickelt mit dem nahezu die gesamte Phosphatfracht des Klärschlammes zur landwirtschaftlichen Nutzung erhalten bleibt. In zahlreichen halbtechnischen Versuchen konnte mittels Bilanzierung eine sichere Recyclingquote von über 98 % nachgewiesen werden.

Durch die zweifache thermische Behandlung mit Additivierung ist die vollständig Mineralisierung und Hygienisierung des Klärschlammes gewährleistet. Alle organischen Substanzen inklusive der organischen Schadstoffe werden zerstört und zudem energetisch verwertet. In der Pyrolysezone werden sämtliche relevanten Schwermetalle reduziert und mit den ionisierten Chloriden aus dem Klärschlamm und den Additiven in die entsprechenden Metallchloride überführt. Da ein wesentlicher Teil der Metalle bei Betriebstemperaturen von 700 bis 1.000 °C flüchtig ist, werden Sie so aus dem Produkt gasförmig entfernt. Der gesamte Gasstrom, bestehend aus Rauch- und Pyrolysegasen sowie Brüden, wird über ein Heißgasgebläse in den Brennraum der Kehrlichtverbrennungsanlage überführt, nachverbrannt und der bestehenden Rauchgasreinigung zugeführt.

Bei dieser Betriebsführung entstehen gut pflanzenverfügbare Phosphorverbindungen, welche nicht nur mittels umfangreicher Analysenprogramme sondern auch durch Vegetationsversuche mit den produzierten Produkten bestätigt werden konnten.

Unter den gesetzlichen Bestimmungen der nationalen deutschen Düngemittelverordnung und dem Entwurf der EU-Düngemittelverordnung wäre das Inverkehrbringen des mineralischen trockenen ERZO-Ascheproduktes bereits zum jetzigen Zeitpunkt als Phosphatdünger möglich. Im Sinne der Markterschließung für diesen Phosphatdünger sind bereits zahlreiche Gespräche mit nationalen schweizerischer als auch international tätigen Düngemittelproduzenten und -händlern

## Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

geführt worden. Bei gegebener Rechtssicherheit würden diese die Produkte unmittelbar übernehmen, vertriebsfähig formulieren und eine Umsetzung im Markt realisieren. Darüber hinaus besteht aktuell bereits die Möglichkeit das erzeugte Phosphat in die anliegenden Länder der EU zu exportieren – vorausgesetzt BLW und BAFU finden eine gesetzliche Voraussetzung dafür.

Zu den ökologischen Zielen, dass qualitativ hochwertige Phosphate zurück in den Stoffkreislauf integriert werden und dadurch einen erheblichen Beitrag zur Ressourcen- und Umweltschonung leisten, sind zwingend die ökonomischen Vorteile zu benennen: es entfallen die kompletten Entsorgungs-/Deponierungskosten für Klärschlammasche und es kann für den Markteintritt von einer geringfügigen Erlös des erzeugten Phosphatdüngers ausgegangen werden. Nach der Etablierung der mineralischen Sekundärphosphatdünger und der weiteren Verknappung an gut zugänglichen und qualitativ ausreichenden Rohphosphaten kann zukünftig von einer deutlichen Wertsteigerung ausgegangen werden.

### **Schwermetallentfrachtung**

In der reduktiven Phase wird bereits ein Teil der im Klärschlamm enthaltenen leicht bis mittelflüchtigen Schwermetalle in die Gasphase überführt, wobei sich dieser Prozess während der oxidativen zweiten Stufe, der Kohlenstoff-Nachverbrennung mit den schwerer flüchtigen Metallen fortsetzt. Mittels Zugabe von Additiven zum Rohstoff in Form von Alkali- und/oder Erdalkalisalzen wird die Effizienz des Schwermetallaustrags derart gesteigert, so dass auch nicht düngemittelkonforme Klärschlämme mittels EuPhoRe®-Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung und Nutzung herangezogen werden können.

Die Schwermetalle werden schließlich in der Gasreinigung aus dem Abgasstrom entfernt und bilden den einzigen verbleibenden bisher nicht verwertbaren Rest.

### **Produktqualität**

Das erzeugte Ascheprodukt ist kohlenstoffarm (2 – 6 % Cfix.) und die Schwermetalle sind signifikant abgereichert, so dass diesbezüglich der Düngemittelstatus sichergestellt werden kann. Es enthält nahezu die gesamte Phosphatfracht des Inputmaterials (Phosphatrückgewinnungsquote > 98%) und kann nach Feinvermahlung und Staubbindung direkt in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Voraussetzung dafür ist die Bindung des Staubanteils z.B. mittels Granulation.

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

## Entwicklungsstand

Das Verfahren ist in den vergangenen Jahren in zahlreichen technischen Versuchen für verschiedene phosphathaltige Biomassen erfolgreich getestet worden.

Seit April 2016 sind wiederum zahlreiche großtechnische Versuche auf der industrie-technischen Anlage der erzo durchgeführt worden. Ab November 2017 soll der Betrieb im industriemaßstab bei der erzo durchgeführt werden.

Parallel ist das Verfahren derzeit bei 3 Anlagen in Europa bei der Genehmigungsplanung. Diese Anlagen sollen voraussichtlich 2019-2020 in Betrieb genommen werden. Damit wird aufgezeichnet, dass die Marktreife schon jetzt erreicht wurde.

# Faktenblatt zur verfahrenstechnischen Marktanalyse VTMA 2017/18

## Auswahlkriterien zur Berücksichtigung im Rahmen der VTMA

Nr.	Kriterium	Begründung, warum das Auswahlkriterium erfüllt wird
1	<b>Nutzung bestehender Infrastruktur</b>	Die Verfahrenstechnik kann wirtschaftlich hoch interessant an bestehende KVA, Kohle- oder Ersatzbrennstoff-Kraftwerke gekoppelt werden. Somit kann die Infrastruktur für die Energienutzung, -rückgewinnung, ggf. bestehende Annahmesysteme und die Rauchgasreinigung genutzt werden.
2	<b>P-Rückgewinnung mind. 50%</b>	Das Produkt enthält nahezu die gesamte Phosphatfracht des Inputmaterials (Phosphatrückgewinnungsquote > 98%).
	<b>Stoffliche Verwertung der Mineralik gem. VVEA Anhang 4 möglich</b>	Trifft bei dem EuPhoRe®-Verfahren nicht zu, da die Mineralik als Düngemittel Verwendung findet.
3	<b>P-Gehalt im Produkt &gt;30% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Trifft nicht zu. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalte liegen wie für handelsübliche P-Düngemittel (Beispiel) bei ca. 16% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .
4	<b>Produktqualität</b>	Es ist davon auszugehen, dass das Produkt der zukünftigen MinRec-Qualität (in Vorbereitung) entsprechen wird.
	<b>Marktvolumen CH [t P/a]</b>	erzo: ca. 240 t P pro Jahr entspricht ca. 4,0% des gesamten P-Mineraldüngerimports der Schweiz und ca. 3,2% der in der Schweiz im Klärschlamm anfallenden jährlichen P-Fracht. Weiteres Potential vorhanden.
	<b>Marktvolumen EU [t P/a]</b>	Es laufen zurzeit Anlagenplanungen nach dem EuPhoRe®-Verfahren für die Produktion von ca. 2.600 t P pro Jahr. Weitere Anfragen liegen vor und befinden sich im Projekt-Status.
	<b>Anzahl der Abnehmer CH</b>	ca. 3
	<b>Anzahl der Abnehmer EU</b>	ca. 12
5	<b>Entwicklungsstand</b>	Marktreife erreicht
6	<b>Verfügbarkeit</b>	> 8.000 h/a

