

SwissPhosphor Arbeitsgruppe Finanzierung, 2023

Technische Umsetzung der Phosphor- rückgewinnungspflicht in der Schweiz

Technischer Bericht gemäss Stand der Entwicklung Ende Juni 2023

Bericht vom 21. Juli 2023

Impressum

Herausgeber

Plattform SwissPhosphor, Arbeitsgruppe Technik

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und der Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz (KVU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Ivo Fölmli, EBP Schweiz AG, Zürich

Monika Rohner, EBP Schweiz AG, Zürich

Begleitung Arbeitsgruppe Technik

Daniel Rensch (Leiter Arbeitsgruppe Technik, ERZ, Klärwerk Werdhölzli)

Ingo Schoppe (Leiter Arbeitsgruppe Technik, ARA Thunersee)

Claudio Bianculli (ZAB, Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen)

Sibylla Hardmeier (Bundesamt für Umwelt)

Leo Morf (Experte AWEL Kanton Zürich)

Werner Preisig (Abwasserreinigungsanlage Entsorgung Region Zofingen erzo ARA, Oftringen)

Robin Quartier (Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen)

Damian Santschi (Düngemittelverband Agricura)

Stefan Schlumberger (Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung, ZAR)

Friedrich Studer (Abwasserreinigungsanlage Entsorgung Region Zofingen erzo ARA, Oftringen)

Balthasar Thalmann (Leiter Arbeitsgruppe Finanzierung, AWEL Kanton Zürich)

Martin Tschan (Verband der Schweizerischen Zementindustrie cemsuisse)

Kai Udert (Eawag)

Michael Zimmermann (Bundesamt für Landwirtschaft)

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage.....	4
1.1	Organisation SwissPhosphor	4
1.2	Auftrag Arbeitsgruppe Technik.....	4
1.3	Rahmenbedingungen	5
2	Verfahren zur Phosphorrückgewinnung	7
2.1	Ansätze zur Phosphorrückgewinnung	7
2.2	Entwicklungsstand der Verfahren.....	7
3	Umsetzung der Phosphorrückgewinnung in der Schweiz.....	10
3.1	Stand der Umsetzung P4L Emmenspitz	10
3.2	Stand der Umsetzung Phosphor26	14
3.3	Stand der Umsetzung ZAB.....	20
3.4	Stand der schweizweiten Umsetzung	22
3.5	Zuverlässigkeit der Aussagen	25
4	Schlussfolgerungen	26
5	Anhänge	28
5.1	Literatur	28
5.2	Abkürzungsverzeichnis	29
5.3	Pflichtenheft der AG Technik.....	30
5.4	Qualitative Anforderungen Phosphorsäure und Düngemittel.....	31
5.5	Alternative Auslegung der Quantitativen Anforderungen	31
5.6	Kostengrundlagen P4L Emmenspitz	32
5.7	Grundlagen Phosphor26	34
5.8	Grundlagen ZAB.....	39
5.9	Kapazitäten der Schlammverbrennungsanlagen in der Schweiz.....	46

1 Ausgangslage

1.1 Organisation SwissPhosphor

Im Rahmen der vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) initiierten Plattform «SwissPhosphor» sind verschiedene Fragen im Zusammenhang mit der fristgerechten Umsetzung der Phosphorrückgewinnungspflicht in der Schweiz nach Art. 15 und 51 der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) zu klären. Die Erarbeitung der entsprechenden Inhalte findet in vier Arbeitsgruppen (AG) statt (siehe Abbildung 1), welche sich in Abstimmung untereinander mit der Klärung unterschiedlicher Fragen auseinandersetzen.

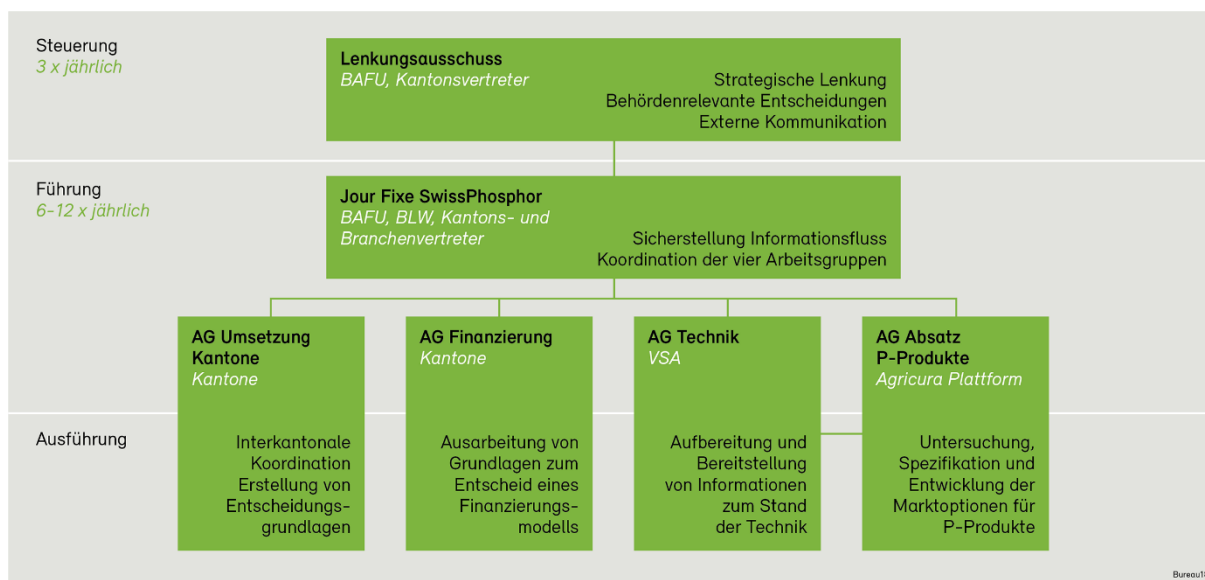


Abbildung 1 Organigramm von SwissPhosphor (AG: Arbeitsgruppen).

1.2 Auftrag Arbeitsgruppe Technik

Die AG Technik hatte den Auftrag, einen Überblick zu laufenden Projekten mit Bezug zur Schweiz zu schaffen und Wissenslücken zu identifizieren bzw. Projekte zu offenen Fragen auszulösen. Dazu sollte eine Publikation ausgearbeitet werden, um (i) ausgewählte Schweizer Verfahren zur Phosphorrückgewinnung und die Entwicklung auf europäischer Ebene zu beschreiben, (ii) Grundlagen für ökonomische Berechnungen ausgewählter Rückgewinnungsverfahren für die AG Finanzierung bereitzustellen und (iii) die Forschung und Entwicklung sowie praktische Umsetzung der Phosphorrückgewinnung zu verfolgen.

Das Pflichtenheft in Anhang 5.3 zeigt die detaillierten Aufgaben der AG Technik. Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Ergebnisse aus der Arbeitsgruppe zusammen.

1.3 Rahmenbedingungen

1.3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA, SR 814.600) setzt den rechtlichen Rahmen zur Umsetzung der Phosphorrückgewinnung. Gemäss VVEA Art. 51 gilt die Rückgewinnungspflicht für Phosphor ab dem 1. Januar 2026. Sie gilt für Abwasser, Klärschlamm bzw. Klärschlammmasche sowie für Tier- und Knochenmehl, welches nicht als Futtermittel verwendet wird (VVEA Art. 15).¹

Die Rückgewinnung muss nach dem Stand der Technik erfolgen (VVEA Art. 12 Abs. 2). Der Stand der Technik ist in VVEA Art. 3 wie folgt definiert:

«der aktuelle Entwicklungsstand von Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der:

- 1. bei vergleichbaren Anlagen oder Tätigkeiten im In- oder Ausland erfolgreich erprobt ist oder bei Versuchen erfolgreich eingesetzt wurde und nach den Regeln der Technik auf andere Anlagen oder Tätigkeiten übertragen werden kann, und*
- 2. für einen mittleren und wirtschaftlich gesunden Betrieb der betreffenden Branche wirtschaftlich tragbar ist.»*

1.3.2 Rahmenbedingung für Verfahrensauswahl

Gemäss Vollzugshilfe «Phosphorreiche Abfälle» [1] soll für den jeweiligen Abfallstrom die gemäss Stand der Technik machbare Phosphor-Rückgewinnungsquote erreicht werden. Die Vollzugshilfe definiert eine Phosphor-Rückgewinnungsquote von mindestens 50% als Stand der Technik (Jahr 2020) für folgende Stoffströme:

- Schlammwasser und Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen
- Klärschlammmasche aus Schlammverbrennungsanlagen
- Tier- und Knochenmehl, das nicht als Futtermittel verwendet wird.

1.3.3 Mengenströme

Der Phosphorgehalt in Klärschlamm sowie Tier- und Knochenmehl beträgt schätzungsweise 6'900 Tonnen. In der Schweiz fielen gemäss AG «Umsetzung Kantone» im Jahr 2021 rund 191'000 t TS² Klärschlamm an. Im gesamten Klärschlamm sind rund 5'700 t Phosphor enthalten [2], was sich mit aktuellen Erhebungen zu den eliminierten Phosphormengen auf Kläranlagen [3] deckt³. Bei Tier- und Knochenmehl wird das Potenzial für die Phosphorrückgewinnung von der AG «Absatz P-Produkte» auf rund jährlich 1'200 Tonnen Phosphor geschätzt (siehe Abbildung 2).

Gemäss Vollzugshilfe «Phosphorreiche Abfälle» [1] soll *«langfristig mindestens so viel Phosphor zurückgewonnen werden, wie zurzeit mit Mineraldünger und chemischen Produkten importiert wird»*. Gemäss den letzten Erhebungen [4] importierte die Schweiz im Jahr 2015 Mineraldünger mit rund 4'200 Tonnen Phosphor (t P), was von der AG «Absatz P-Produkte» für das Jahr 2021 bestätigt wird. Die chemische Industrie importierte im Jahr 2015 Produkte und Chemikalien mit schätzungsweise 1'600 t Phosphor, wobei die Daten der Industrie gemäss der «Studie Phosphorflüsse in der Schweiz 2015» [4] mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Bei aktuell absehbaren Rückgewinnungsquoten von 80-85% (siehe Kapitel 0) dürfte das langfristig angestrebte Ziel gemäss Vollzugshilfe erreichbar sein und die rückgewonnenen Phosphormengen im Bereich der importierten Mengen zu liegen kommen (siehe Abbildung 2).

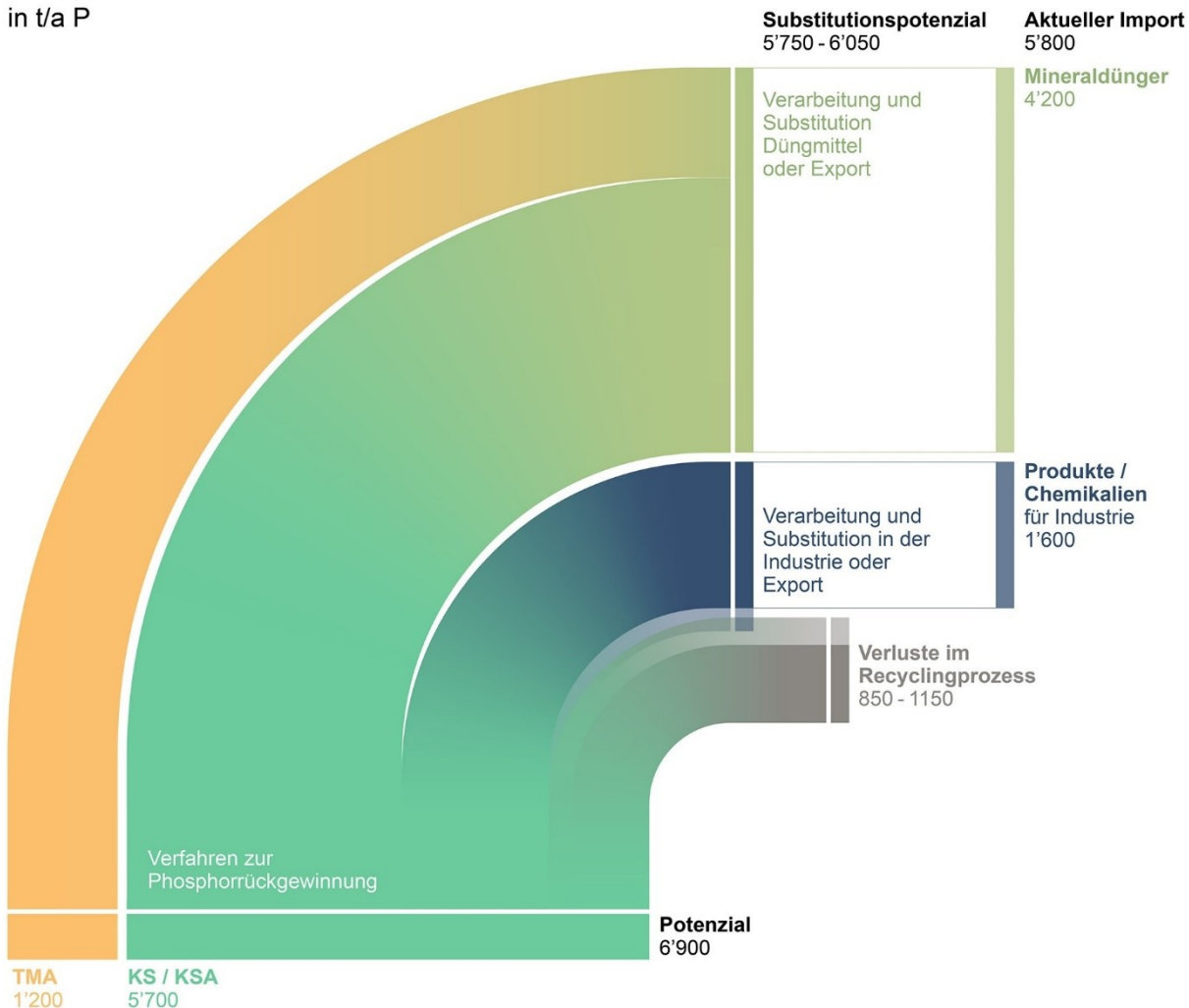
¹ Ausgenommen von der Phosphor-Rückgewinnungspflicht sind neben Tier- und Knochenmehl, welches als Futtermittel verwendet wird, auch Kläranlagen mit weniger als 1'000 Einwohnerwerten (EW), gemäss BAFU-Vollzugshilfe «Phosphorreiche Abfälle» [1].

² TS = Trockensubstanz

³ 5'700 t/a P weichen vom berechneten Potenzial der AG Umsetzung Kantone (6'100 t/a P) ab, stimmen jedoch mit den eliminierten Phosphormengen auf Schweizer Kläranlagen gemäss Kennzahlenerhebung im Jahr 2019 [3] sowie bisherigen Schätzungen [2] überein.

Phosphor Potenzial und Bedarf

in t/a P



*Möglichkeit zur Kreislaufschliessung mit Recycling-P unklar
 Abkürzungen: KS: Klärschlamm, KSA: Klärschlammasche, TMA: Tiermehlasche

Abbildung 2 Phosphorgehalt in Klärschlämmen / -asche sowie Tier- und Knochenmehl (Potenzial für Rückgewinnung), aktuell geschätzte Recyclingverluste und rückgewinnbare Phosphormengen (Substitutionspotenzial) mit Gegenüberstellung zu importierten Phosphormengen in Form von Düngemittel und Produkten für die chemische Industrie.

1.3.4 Qualitative Anforderungen

Gemäss Art. 15 der VVEA müssen Schadstoffe bei der Phosphor-Rückgewinnung nach dem Stand der Technik entfernt werden und im Falle einer Verwendung als Dünger, muss das Produkt die Mindestanforderungen gemäss Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung ([ChemRRV, Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4](#)) erfüllen.

Zudem sind die Anforderungen der Industrie an die Phosphorsäure sowie der Düngemittelbranche an die Phosphordünger zu beachten, damit die Produkte vermarktet werden können (siehe Anhang 5.4). Zurzeit ist der Einsatz von Düngemitteln aus rückgewonnenem Phosphor in der konventionellen Landwirtschaft, jedoch noch nicht in der biologischen Landwirtschaft erlaubt.

2 Verfahren zur Phosphorrückgewinnung

2.1 Ansätze zur Phosphorrückgewinnung

Tier- und Knochenmehl, das nicht als Futtermittel verwendet wird, wird in der Regel verbrannt oder in Zementwerken verwertet. Die Tier- und Knochenmehlasche (TMA) muss nicht aufwändig aufbereitet werden, um Phosphor rückzugewinnen, sondern ist ein geeigneter Ersatz von Rohphosphat für die Düngerproduktion, da der Phosphorgehalt gleichwertig und die Schadstoffgehalte geringer sind als im Rohphosphat [5]. Aus TMA und Phosphorsäure können die zur Düngemittelherstellung genutzten Superphosphate und – je nach Qualität der Phosphorsäure – das in der Schweiz mehrheitlich erforderliche Tripelsuperphosphat (TSP) hergestellt werden.

In der Abwasser- und Klärschlammbehandlung lässt sich Phosphor an verschiedenen Stellen zurückgewinnen wie beispielsweise aus Schlammwasser, entwässertem Klärschlamm, getrocknetem Klärschlamm oder aus Klärschlammmasche. Gegenüber der Tiermehlasche weisen diese Stoffströme jedoch geringere Phosphorkonzentrationen und höhere Schadstoffgehalte auf. Die Verfahren zur Phosphorrückgewinnung sind folglich komplexer. Sie wurden in den letzten Jahren intensiv erforscht, getestet und weiterentwickelt [6]. Die Verfahren lassen sich hinsichtlich ihres Ansatzpunktes in zwei Gruppen unterteilen:

- Die zentralen Verfahren setzen aktuell insbesondere nach der Schlammverbrennung bei der Klärschlammmasche an und sind unabhängig vom Betrieb der Abwasserreinigungsanlagen.
- Bei dezentralen Verfahren wird Phosphor direkt aus den Abwasser- und Klärschlammströmen bei den Abwasserreinigungsanlagen zurückgewonnen.

In der Schweiz muss Klärschlamm, seit dem Verbot der direkten Ausbringung in der Landwirtschaft im Jahr 2006, verbrannt werden. Die Kläranlagen lieferten ihren Schlamm seither an Schlammverbrennungsanlagen (SVA), Zementwerke (ZW) oder Kehrrechtverbrennungsanlagen (KVA) [7]. In den Schlammverbrennungsanlagen entsteht Klärschlammmasche, welche sich für die Rückgewinnung eignet. Die Zementindustrie verwertet getrockneten Klärschlamm energetisch als Brennstoff. Die verbleibende Asche wird im Zementklinker eingebunden. In Kehrrechtverbrennungsanlagen wird der Klärschlamm energetisch verwertet. Eine anschliessende Phosphorrückgewinnung aus KVA-Schlacke oder dem Zementklinker ist technisch nicht möglich. In Zukunft muss der Phosphor somit vor der Verbrennung des Klärschlammes in Zementwerken und Kehrrechtverbrennungsanlagen rückgewonnen oder der Klärschlamm stattdessen in einer Schlammverbrennungsanlage verbrannt werden.

Dezentrale Ansätze werden unter anderem aufgrund der tiefen Rückgewinnungsquote voraussichtlich keine relevante Rolle bei der Phosphorrückgewinnung spielen.

2.2 Entwicklungsstand der Verfahren

Das Spektrum für die Schweiz denkbarer Verfahren mit ausreichendem Entwicklungsgrad hat sich in den letzten Jahren stark eingegrenzt und wurde in der Studie «Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung» gemäss Stand 2019 mit punktuellen Ergänzungen aus dem Jahr 2021 beurteilt [6].



Abbildung 3 Spektrum der für die Schweiz denkbaren Verfahren gemäss [6]; CleanMAP ist neu Ash2Phos, REALphos ist neu Ascheleaching.

Seither hat sich die Auswahl weiter auf Verfahren reduziert, welche Phosphor aus Klärschlammmasche rückgewinnen: Die Verfahren Pyrophos auf der ARA Altenrhein und EuPhoRe am erzo Standort in Oftringen [6] wurden u.a. aufgrund zu hoher Schadstoffgehalte im Produkt nicht weiterverfolgt. Zudem waren die Eigenschaften der Produkte für den Einsatz als Düngemittel ungünstig und die Absatzfähigkeit wurde als ungenügend beurteilt.

Zurzeit gibt es keine erfolgreichen dezentralen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung auf Kläranlagen, welche einen Rückgewinnungsgrad von mindestens 50% [1] erreichen. Bestenfalls dürften Kläranlagen mit einer gut funktionierenden biologischen Phosphorelimination den erforderlichen Rückgewinnungsgrad erreichen. Gemäss AG «Umsetzung Kantone» gibt es dennoch vereinzelt Überlegungen, weitere Versuche zur dezentralen Phosphorrückgewinnung durchzuführen.

In Tabelle 1 sind die am weitesten fortgeschrittenen und vereinzelt bereits als Grossanlage vorhandene Verfahren aufgelistet. Sämtliche Verfahren halten die Anforderungen an den minimalen Rückgewinnungsgrad von 50% ein.

Tabelle 1 Übersicht über sieben Verfahren zur nasschemischen Extraktion von P aus der Klärschlammasche

Verfahren	Entwickler	Entwicklungsstand
Ash2Phos	EasyMining (Schweden)	Projektierung grosstechnische Anlage, Inbetriebsetzung 2026, Standort Schkopau (DE)
PHOS4green	Seraplant (Deutschland)	Grosstechnische Inbetriebsetzung Juni 2021, Standort Haldensleben (DE)
TetraPhos	Remondis (Deutschland)	Seit Anfang 2021 in Inbetriebsetzung, Klärwerk Hamburg (DE)
EcoPhos	Prayon (Belgien) (ursprünglich EcoPhos)	Pilotanlage in Bulgarien und Dünkirchen (FR)
Phos4Life	Técnicas Reunidas (Spanien)	Vorprojekt grosstechnische Anlage im April 2023 abgeschlossen, Machbarkeit bestätigt, Inbetriebsetzung 2029, Standort Zuchwil SO
Ascheleaching	Erzo, REAL, Holcim (Schweiz)	Machbarkeit für grosstechnische Anlage ohne Ionenaustausch bestätigt, Machbarkeit für Anlage mit Ionenaustausch in Abklärung, Inbetriebsetzung 2027 Standort Oftringen AG
ZAB	ZAB (Schweiz)	Bauprojekt grosstechnische Anlage in Arbeit, Inbetriebsetzung 2026, Standort Bazenhaid SG

Eine grosstechnische Anlage mit dem Verfahren Ash2Phos (früher: CleanMAP [6]) von der schwedischen Firma EasyMining soll in Schkopau DE mit einer Kapazität von 30'000 Tonnen Klärschlammasche bis im Jahr 2026 in Betrieb gehen. Die Firma «Phosphorrückgewinnung Schkopau GmbH» wurde als Joint-Venture von GELSENWASSER und EasyMining für den Bau und Betrieb der neuen Anlage gegründet. Das Verfahren wurde mit dem Ziel der Kreislaufschliessung entwickelt, d.h. Abfallprodukte zu minimieren, bzw. verwertbare Nebenprodukte zu generieren. Das Verfahren setzt nach Beigabe von Salzsäure und Abtrennung ungelöster Reststoffe auf die Fällung von Calciumphosphat. Daraus kann in einem zusätzlichen Schritt durch die Zugabe einer Stickstoffquelle Monoammonium- oder Diammoniumphosphat hergestellt werden, welche die Anforderungen in der Schweiz erfüllen können. Es kommt aus technischer Sicht deshalb auch für den Einsatz in der Schweiz in Frage.

Das PHOS4green-Verfahren von der Firma Seraplant stellt aus Klärschlammasche unter Beigabe von Mineralsäuren (u.a. Phosphorsäure) ein P38-Dünger her und weist Ähnlichkeiten zum ZAB-Verfahren auf (siehe Abbildung 3). Es beinhaltet jedoch keinen Prozessschritt zur Abreicherung von Schwermetallen. Folglich könnten die Anforderungen an mineralische Recyclingdünger gemäss ChemRRV Anhang 2.6 nur mit Verdünnung mit Tier- und Knochenmehlasche eingehalten werden. Die Verdünnung von Schwermetallen ist allerdings problematisch und Tier- und Knochenmehlasche oder vergleichbare Co-Substrate sind nicht in ausreichenden Mengen für eine gesamtschweizerische Umsetzung vorhanden. Seraplant ging im Juni 2021 in Haldensleben DE grosstechnisch in Betrieb. Nach einem Betriebsjahr meldete Seraplant GmbH im Sommer 2022 aufgrund hoher Gaspreise Insolvenz an und entliess anschliessend sämtliche Mitarbeitenden. Zurzeit ist offen, ob die Wiederaufnahme des Betriebs finanziert werden kann.

TetraPhos von der deutschen Firma Remondis wurde in Hamburg grosstechnisch umgesetzt. Das Verfahren setzt bei Klärschlammasche an, um mittels nasschemischer Extraktion und Ionentauscher nach mehreren Reinigungsschritten technische Phosphorsäure zu gewinnen [6]. Bei der Verfahrensentwicklung wurde weniger Wert auf die Verwertung der Nebenprodukte gelegt als bei anderen Verfahren. Die letzten verfügbaren Informationen zum Projektstand sind vom Abschluss des Baus Ende 2020 und der geplanten Inbetriebsetzung ab Anfang 2021. Da Remondis die Anlagen selbst baut und betreibt, ist der Zugang zu Daten über das Verfahren für Vergleichszwecke nicht gewährleistet.

Das Verfahren EcoPhos von der Firma Prayon weist Ähnlichkeiten zu TetraPhos auf. Im Verfahren wird Klärschlammasche mit Phosphorsäure gelöst, Feststoffe abfiltriert und Schwermetalle über selektive Ionentauscher entfernt [6]. Das Verfahren wurde ursprünglich von EcoPhos entwickelt und nach dem Konkurs von EcoPhos im Jahr 2020 durch Prayon übernommen. Als Produkt wird eine technische Phosphorsäure gewonnen, welche die Anforderungen in der Schweiz erfüllen kann. Aus technischer Sicht ist der Einsatz in der Schweiz denkbar. Es wurden bereits Pilotprojekte durchgeführt. Über geplante grosstechnische Anlagen liegen keine Informationen vor.

Die drei Verfahren Phos4Life, Ascheleaching und das ZAB-Verfahren werden zurzeit in der Schweiz projektiert und sind im nachfolgenden Kapitel erläutert.

3 Umsetzung der Phosphorrückgewinnung in der Schweiz

3.1 Stand der Umsetzung P4L Emmenspitz

3.1.1 Kurzbeschreibung Verfahren und Projekt

Phos4Life wurde von der Stiftung ZAR gemeinsam mit der spanischen Firma Técnicas Reunidas entwickelt. Über eine Laugung der Klärschlammasche mit Schwefelsäure und einer Reinigung mittels Lösungsmittel-Extraktion wird mit dem Verfahren qualitative hochwertige technische Phosphorsäure (siehe Anhang 5.4) hergestellt. In zusätzlichen Prozessschritten ist zudem die Rückgewinnung von Eisen in Form von Eisenchloridlösung möglich. Das Verfahren ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

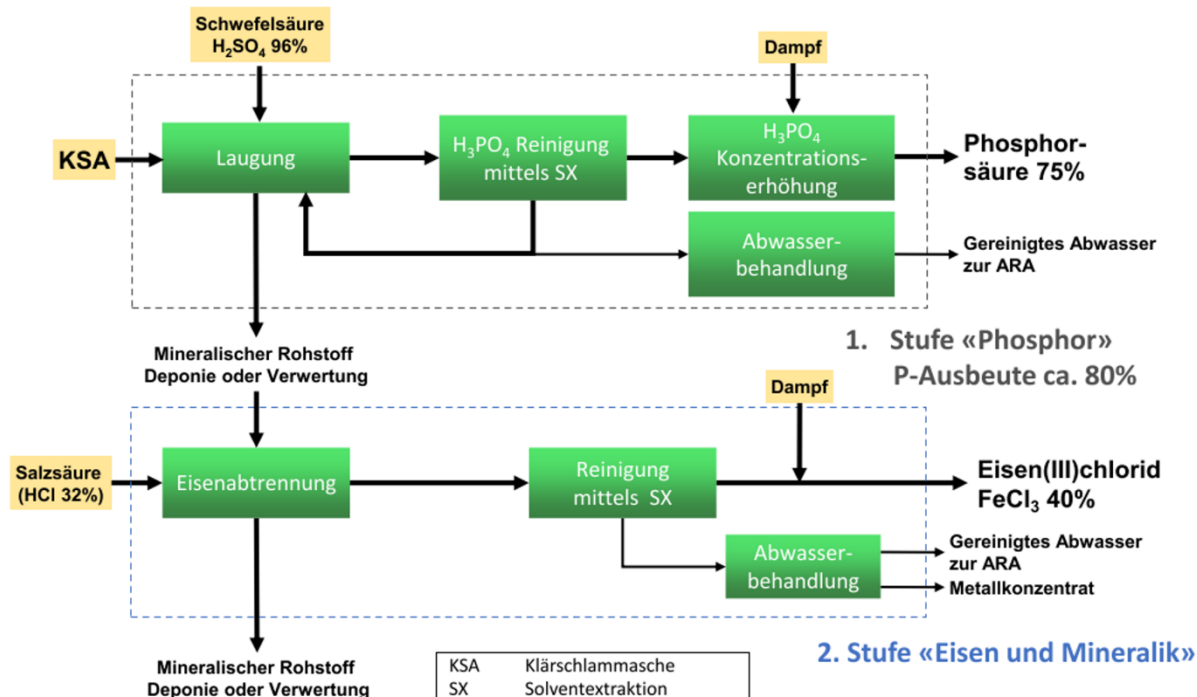


Abbildung 4 Prinzipschema Phos4Life-Verfahren inkl. optionaler Eisenrückgewinnung (Quelle: [8]).

Im Rahmen des Projekts P4L Emmenspitz ist am Standort der KEBAG und des Zweckverbands der Abwasserregion Solothurn-Emme (ZASE) in Zuchwil SO eine grosstechnische Anlage mit dem Verfahren Phos4Life in Planung. Am Projekt beteiligte Partner sind ZAR, acr (TI), ERZ (ZH), Epura (VD), erzo (AG), REAL (LU), saidef (FR), SIG (GE), und ZASE (SO).

Das Vorprojekt des Projekts P4L Emmenspitz wurde im Frühjahr 2023 abgeschlossen und ist seit 27. April 2023 öffentlich ([ZAR-Homepage](#)) [8]. Die Anlage wird auf eine jährliche Verarbeitung von 40'000 t Klärschlammasche (ca. 3'600 t Phosphor) ausgelegt. Mit dem im Vorprojekt angegebenen Rückgewinnungsgrad von über 80% können rund 2'900 t Phosphor rückgewonnen werden. Auf die Rückgewinnung von Eisen wird am Standort in Zuchwil verzichtet, da der nötige Platz fehlt und zusätzliche ungedeckte Kosten entstehen. Die Massen- und Energiebilanz ist in Abbildung 5 abgebildet.

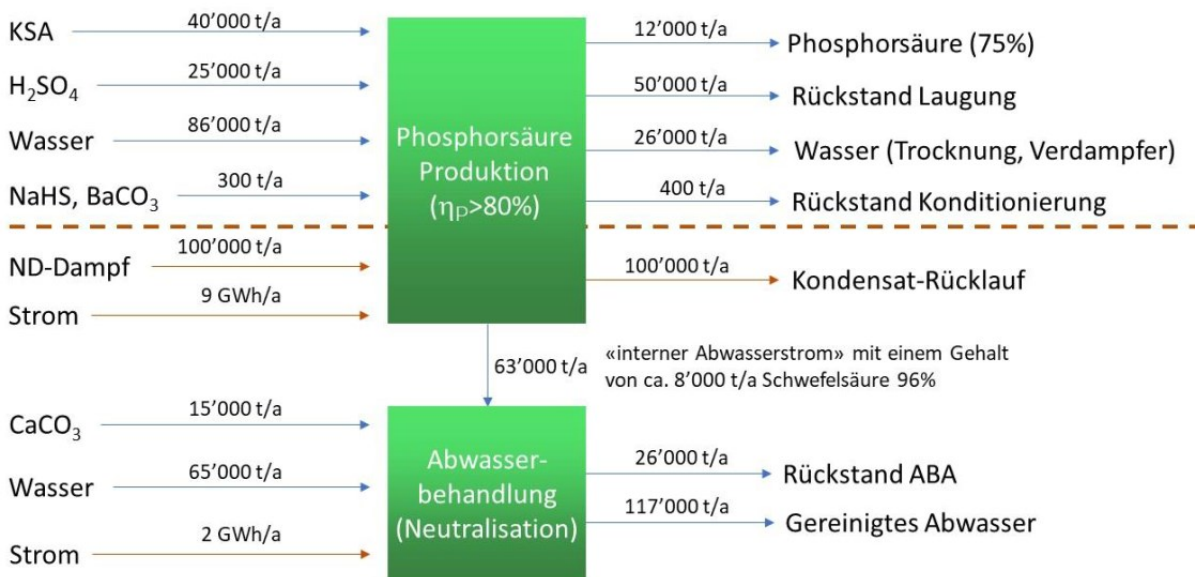


Abbildung 5 Massen- und Energiebilanz für die Hauptströme der Phosphorrückgewinnung sowie für die Abwasserbehandlung zur Neutralisation von Schwefelsäure-haltigem Abwasser (Quelle: [8]).

Das Areal der KEBAG und des ZASE bietet in Bezug auf die Energieversorgung (Wärme, Elektrizität von der KVA), die Erschliessung mit der Bahn sowie der Abwasserentsorgung vorteilhafte Voraussetzungen und Synergiepotenzial für die Umsetzung von Phos4Life. Der Neubau der KVA (Projekt KEBAG Enova) schafft den erforderlichen Platz und Synergiepotenzial wie z.B. bei der Wärmeversorgung. Zudem könnten durch die allfällige Realisierung des Projekts SwissZinc auf dem gleichen Areal weitere Synergien beim Personalaufwand und der Verwertung von bis zu 40% der Schwefelsäure entstehen. Der Umsetzungsentscheid des Projekts SwissZinc steht noch aus.

Das Produkt ist eine handelsübliche technische Phosphorsäure (75 Gew.-%). Folgende Tabelle zeigt die chemische Zusammensetzung der verwendeten Klärschlammasche und der Phosphorsäure im Vergleich zur Budenheim Phosphorsäure, als Beispiel einer marktüblichen technischen Phosphorsäure.

Tabelle 2 Chemische Zusammensetzung der KSA, der Phosphorsäure aus Phos4Life und der Budenheim Phosphorsäure

Element	KSA	P4L-Phosphorsäure, 75%	Budenheim Phosphorsäure, technical pure, 75-85%
P-Gehalt [%]	9.0	23	23 - 27
Aluminium [mg/kg]	38'000	< 220	Keine Angaben
Arsen [mg/kg]	15	< 1	< 1
Blei [mg/kg]	100	< 2	< 1
Cadmium [mg/kg]	5	< 0.5	< 1
Chrom [mg/kg]	200	< 1	< 1
Eisen	170'000	< 3	< 5
Kupfer [mg/kg]	750	< 1	< 1
Nickel [mg/kg]	160	< 1	< 1
Sulfat [mg/kg]	12'000	<150	< 200
Zink [mg/kg]	1'900	<5	Keine Angaben

Die jährlich rund 12'000 t technische Phosphorsäure können problemlos in der Schweiz und europaweit direkt in der chemisch-/technischen Industrie vermarktet werden, wobei der direkte Absatz

in der Schweiz auf rund 25% der hergestellten Menge begrenzt ist. Die technische Phosphorsäure lässt sich auch für die Herstellung schadstoffarmer Düngemittel wie TSP46 in der Schweiz verwenden.

3.1.2 Investitions- und Betriebskosten

Die Investitionskosten für den Bau von P4L Emmenspitz liegen gemäss Kostenvoranschlag auf Stufe Vorprojekt bei CHF 155 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis 2020) mit einer Genauigkeit von +/-30%. Die Betriebskosten werden auf CHF 24.1 Mio. pro Jahr (exkl. MwSt., Preisbasis 2020) mit einer Genauigkeit von +/-15% geschätzt. Eine detailliertere Aufstellung der Investitions- und Betriebskosten befindet sich in Anhang 5.6.

Die Jahreskosten (Kapital- und Betriebskosten) sowie die erwarteten Einnahmen und Einsparungen sind in

Tabelle 3 zusammen mit den spezifischen Kosten pro Tonne Klärschlammasche dargestellt.

Tabelle 3 Jahreskosten (Kapital- und Betriebskosten) vom Projekt P4L Emmenspitz und Gegenüberstellung mit Einnahmen zur Berechnung der ungedeckten Jahreskosten; exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit Kapitalkosten +/-30%, Genauigkeit Betriebskosten +/-15%

		Gesamt	Spezifisch pro t KSA*
Kapitalkosten	CHF/a	7'600'000	190
Betriebskosten	CHF/a	24'130'000	600
Jahreskosten, total	CHF/a	31'730'000	790
Einnahmen	CHF/a	8'400'000	210
Kosteneinsparungen	CHF/a	3'600'000	90
Jahreskosten, ungedeckt P4L	CHF/a	23'330'000	580
Mehrkosten KSA-Verwertung mit P-U	CHF/a	19'730'000	490

*40'000 t/a KSA

Die gesamten Jahreskosten für die Umsetzung von P4L Emmenspitz belaufen sich auf CHF 31.7 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit +/-15% bis +/-30%) bzw. auf CHF 23.3 Mio. nach Abzug der geschätzten Einnahmen von rund CHF 8.4 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert). Der Kostenschätzung liegt eine Anlagenkapazität von rund 40'000 t Klärschlammasche zugrunde.

Die Betriebskosten machen mit rund 75% den massgebenden Teil der gesamten Jahreskosten aus. Der Anteil der Kapitalkosten beträgt lediglich rund 25%. Die Einnahmen betragen rund CHF 8.4 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert) aus dem Verkauf der Phosphorsäure bei einem Verkaufspreis von 700 CHF/t P-Säure. Zusätzlich ergeben sich Einsparungen von rund CHF 3.6 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert), da die heutigen Deponiekosten für die Klärschlammasche wegfallen werden. Für die involvierten Parteien lassen sich daraus – ohne Berücksichtigung der Kostengenauigkeit – folgende Kosten ableiten:

- P4L Emmenspitz muss jährlich ca. CHF 23.3 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit +/-15% bis +/-30%) einnehmen und somit eine Abnahmegebühr von 580 CHF/t KSA verlangen, um die Phosphorrückgewinnung finanzieren zu können (darin eingerechnet sind die Deponierungskosten für alle Rückstände)
- Verursacherseitig ist bei der geplanten Abnahme und Verwertung von Klärschlammasche durch P4L Emmenspitz mit Mehrkosten von 490 CHF/t KSA (jährlich ca. CHF 19.7 Mio., exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit +/-15% bis +/-30%) zu rechnen, da die heutigen Deponierungskosten von 90 CHF/t KSA (bzw. jährlich ca. CHF 3.6 Mio. exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert) wegfallen werden.

Zur Ermittlung der Zuverlässigkeit der Kostenangaben wurde im Vorprojekt eine Sensitivitätsanalyse erarbeitet (siehe Anhang 5.6). Diese zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit von P4L Emmenspitz stark mit dem Verkaufspreis der Phosphorsäure sowie den Entsorgungskosten für schwefelsäurehaltiges Abwasser schwankt. Die Synergien bei der Entsorgung von schwefelsäurehaltigem Abwasser mit dem Projekt SwissZinc bergen deutliches Einsparpotenzial, sind jedoch nicht berücksichtigt, da der Umsetzungsentscheid noch nicht gefällt wurde. Allerdings zeigt die Sensitivitätsanalyse in Anhang 5.6 nicht auf, wie stark sich Unterschiede bei der Auslastung (unter der Kapazität von 40'000 t/a KSA) auf die Kosten auswirken. Bei einer Auslastung unterhalb der geplanten Kapazität wäre mit Mehrkosten zu rechnen, zumindest für die nicht oder bedingt skalierbaren Kosten (Kapitalkosten, Personalkosten).

3.1.3 Terminliche Umsetzung

Der Zeitpunkt für den Bau der P4L-Anlage ist abhängig von anderen Projekten (Um- und Rückbauten) auf dem Areal der KEBAG in Zuchwil SO. Das vorgesehene Baufeld für die P4L-Anlage ist noch nicht verfügbar. Zuerst wird die neue KVA KEBAG Enova gebaut und voraussichtlich Mitte 2025 in Betrieb gehen. Die Ausserbetriebnahme und der Rückbau der heutigen KVA wird bis Ende 2026 dauern. Anschliessend ist der Bau der Werkstatt für die neue KVA bis Mitte 2027 geplant. Der Baustart der P4L-Anlage ist entsprechend für Mitte 2027 vorgesehen und die Inbetriebnahme wird voraussichtlich im Jahr 2030 erfolgen. Das Projekt SwissZinc zur Rückgewinnung von Zink aus Hydroxidschlamm könnte im Falle einer Umsetzung zeitlich leicht vorverschoben geplant und bis 2028 realisiert werden.

- 1) Bestehende KVA KEBAG
- 2) ZASE (Kläranlage)
- 3) Neubau KEBAG Enova (2020-2025)
- 4) SwissZinc (2023 - 2028)
- 5) Phos4life (2024 – 2030)

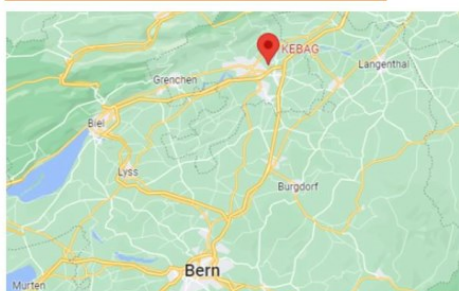


Abbildung 6 Übersicht über die geplanten Projekte auf dem Areal der KEBAG und des ZASE (Quelle: [8]).

Das Projekt P4L Emmenspitz kann somit die gesetzte Frist für die Phosphorrückgewinnung ab dem 1. Januar 2026 gemäss VVEA Art. 15 nicht einhalten.

3.1.4 Beurteilung und offene Fragen

Die vorhandenen Projektierungsunterlagen von P4L Emmenspitz [8] gehen auf wesentliche Projektrisiken ein. Die grössten technischen Risiken bestehen in Bezug auf die Verwertung der Rückstände aus dem Phos4Life-Verfahren, da deren Zusammensetzung noch nicht abschliessend klar ist und die rechtlichen Rahmenbedingungen nach VVEA Anhang 4 eine Verwertung aktuell nicht zulassen [8]. In der Kostenschätzung wird gemäss P4L Emmenspitz davon ausgegangen, dass sämtliche Rückstände deponiert werden müssen. Offene Fragen und Optimierungspotenzial bestehen in Bezug auf die genauen Mengen, Zusammensetzung und den Entsorgungsweg für die Rückstände. Auf dem aktuellen Stand der Verfahrensentwicklungen sind weitere Optimierungen sowie die Nutzung von Synergien (z.B. SwissZinc) möglich. Die Risiken in Bezug auf den Standort und die Umweltverträglichkeit werden durch P4L Emmenspitz als gering beurteilt. Die Entwicklung anderer Verfahren zur Phosphorrückgewinnung wird weiter beobachtet. Allerdings sind derzeit gemäss P4L Emmenspitz keine alternativen Verfahren mit Vorteilen gegenüber Phos4Life absehbar.

Die Absatzrisiken für die technische Phosphorsäure werden als gering eingeschätzt [8] und die bisherigen Versuche bestätigen, dass die erforderliche Produktqualität durch das Phos4Life-Verfahren zuverlässig erreicht werden kann. Insgesamt wird des Projekts P4L Emmenspitz als bewilligungsfähig beurteilt und die technische Machbarkeit bestätigt. Die wirtschaftlichen Risiken durch die Finanzierung, Teuerung bzw. Zinsentwicklung werden gemäss Vorprojekt als nicht aktiv beeinflussbar beurteilt [8].

Eine grosse Herausforderung stellt gemäss P4L Emmenspitz die Vorfinanzierung der Investitionskosten von rund CHF 155 Mio. (+/-30%) dar. Eine Trägerschaft mit verbindlichen Regelungen für die Lieferung/Abnahme relevanter Mengen Klärschlammasche besteht noch nicht. Die Sicherstellung einer hohen Auslastung der Anlage dürfte die Chancen auf die erfolgreiche Vorfinanzierung erhöhen. Die beiden Projektpartner REAL und erzo ARA verfolgen jedoch parallel das Projekt Phosphor26 mit Holcim (siehe Kapitel 3.2). Abhängig vom Entscheid, ob REAL und erzo ARA ihre Klärschlammasche an P4L Emmenspitz liefern oder nicht, steht Klärschlammasche mit schätzungsweise rund 800 t/a Phosphor weniger zur Verfügung. Demgegenüber ist in einigen Kantonen noch offen, wo die Phosphorrückgewinnung erfolgen soll, was wiederum die Chance bietet allfällige Auslastungslücken zu schliessen (vgl. AG "Umsetzung Kantone").

Der Bau der P4L-Anlage wird nicht vor Mitte 2027 starten. Dadurch besteht ein gewisser Spielraum, um die Vorfinanzierung zu klären, den Umsetzungsentscheid für SwissZinc abzuwarten, die Trägerschaft zu organisieren sowie Abnahmeverträge zu schliessen.

3.2 Stand der Umsetzung Phosphor26

3.2.1 Kurzbeschreibung Verfahren und Projekt

Das Ascheleaching-Verfahren von Recycling, Entsorgung, Abwasser Luzern (REAL) setzt auf die Herstellung einer Dünger-Phosphorsäure, welche durch die Laugung der Klärschlammasche mit Schwefelsäure und einer Reinigung mittels Fällung, Filtration und Ionentausch als zusätzliche Schwermetallsenke produziert wird. Zur Reduktion der Transportmenge ist eine Eindampfung der Phosphorsäure mittels zwei- oder dreistufigem Fallfilmverdampfer möglich. Erzo ARA hat in Bezug auf das Patent REALphos von REAL «Freedom to operate» erhalten (01.05.2023). Das Verfahren ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt (ohne Fallfilmverdampfer).

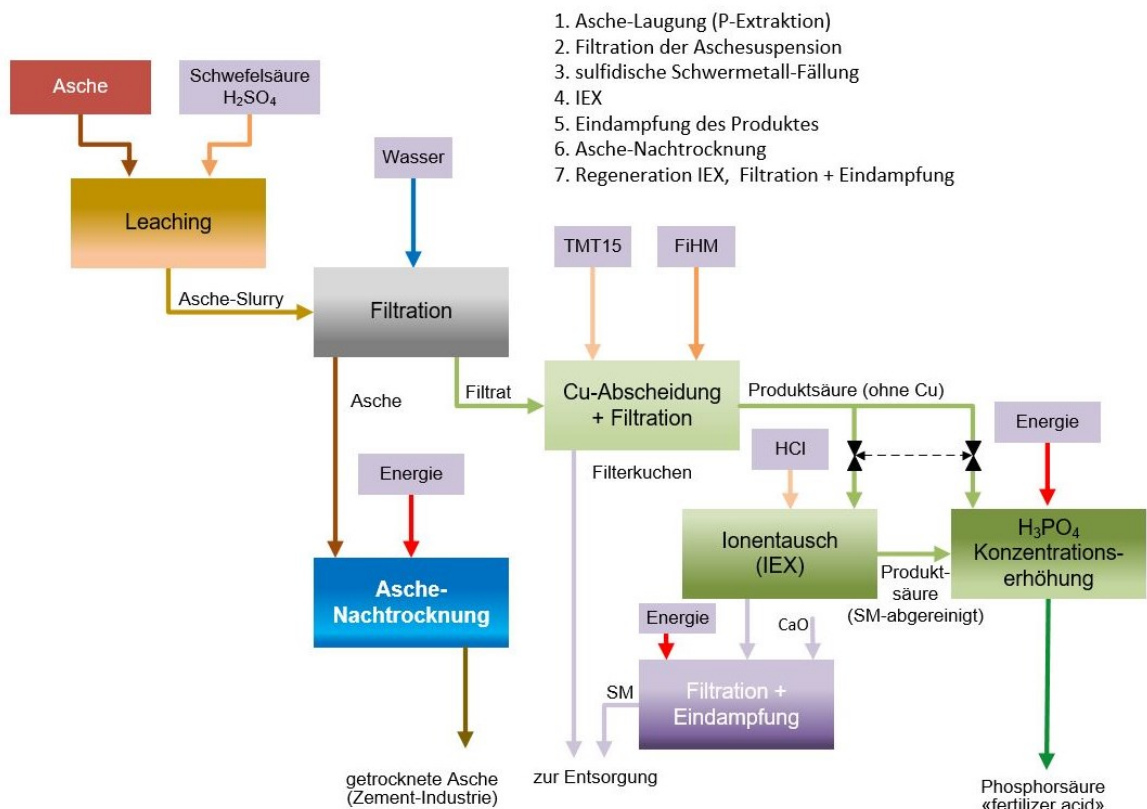


Abbildung 7 Prinzipschema des Ascheleaching-Verfahrens: Filtration mittels Vakuumbandfilter in Schritt 2 bzw. Kerzenfilter in Schritt 3 sowie ein nachgeschalteter Ionenaustausch als zusätzliche Schwermetallsenke (Quelle: erzo ARA Juni 2023).

Im Rahmen des Projekts Phosphor26 ist am Standort der Entsorgung Region Zofingen (erzo) in Oftringen AG in Partnerschaft mit Holcim eine Klärschlamm-trocknung sowie eine grosstechnische Anlage mit dem Ascheleaching-Verfahren in Planung. Am Projekt beteiligte Partner sind erzo ARA (AG), REAL (LU), und Holcim.

Der AG Technik liegen für das Ascheleaching-Verfahren ohne Ionenaustausch ein vertiefter Projektbeschreibung mit Mengenangaben sowie Präsentationen mit weiteren Angaben wie dem Terminplan und der Wirtschaftlichkeit vor (siehe Anhang 5.7). Die Anlage wird auf eine jährliche Verarbeitung von rund 20'000 t Klärschlamm-Asche (ca. 1'500 t/a P) ausgelegt (siehe Anhang 5.7), damit die rund 1'300 t Phosphor in Form von Dünger-Phosphorsäure für die Weiterverarbeitung durch ZAB in Bazenheid (siehe Kapitel 3.3) rückgewonnen werden können. Der Rückgewinnungsgrad wird gemäss Pilotversuchen (ohne Ionenaustausch) mit 85% angegeben. Die Massen- und Energiebilanz für die Phosphorrückgewinnung ist in Abbildung 8 abgebildet.

Zum Ascheleaching-Verfahren mit Ionenaustausch liegen keine Angaben vor. Es wird ab Juli 2023 pilotiert. Durch die Erweiterung des Verfahrens mit dem Ionenaustausch ist mit einer geringeren Rückgewinnungsquote zu rechnen.

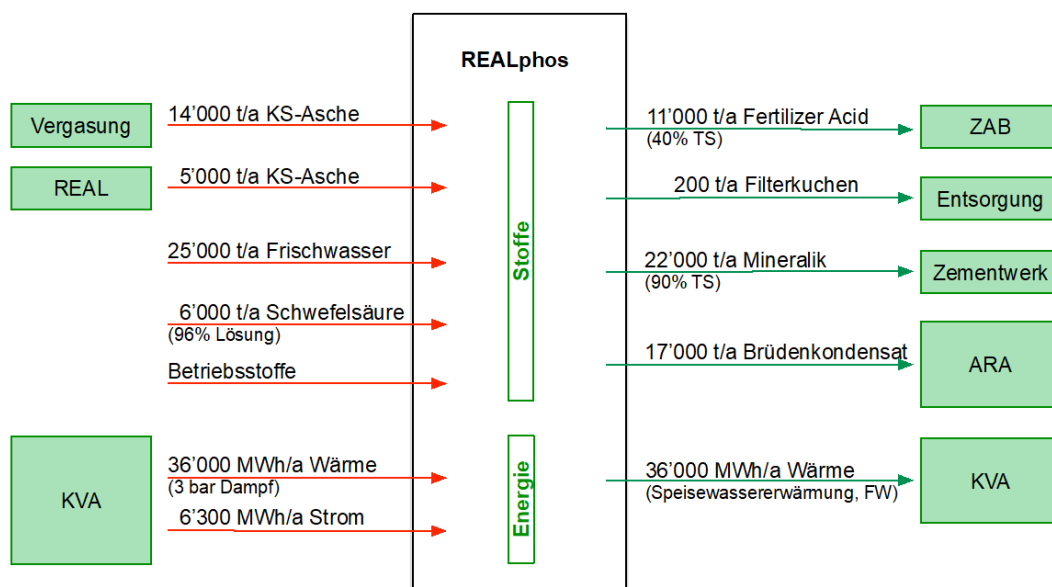
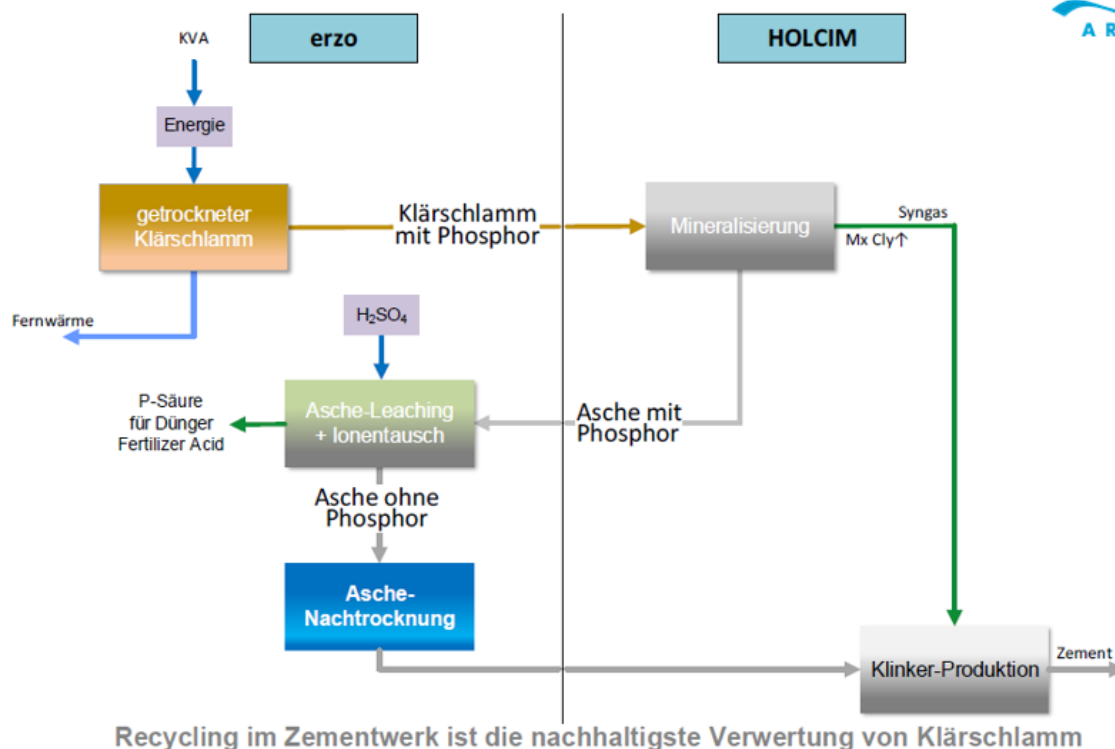


Abbildung 8 Massen- und Energiebilanz für die Hauptströme des Ascheleaching-Verfahrens ohne Ionenaustausch (ursprünglich REALphos, Quelle: erzo, Stand Mai 2022).

Das Areal der erzo ARA in Oftringen bietet in Bezug auf die Energieversorgung (Wärme, Elektrizität von der KVA) und die Abwasserentsorgung vorteilhafte Voraussetzungen für die Umsetzung des Ascheleaching-Verfahrens. In Zusammenarbeit mit Holcim ist eine Mineralisierung des getrockneten Klärschlammes geplant, um Synthesegas herzustellen, welches als klimafreundlicher Brennstoff in der Klinker-Produktion genutzt werden kann (siehe Abbildung 9). Die bei der Mineralisierung entstehende Klärschlammmasche steht für die Phosphorrückgewinnung zur Verfügung. Ausserdem besteht Synergiepotenzial bei der Verwertung der Rückstände (Mineralik) aus der Phosphorrückgewinnung in der Klinker-Produktion von Holcim. Die Stoffströme für die Klärschlamm-trocknung, Mineralisierung, Phosphorrückgewinnung und Mineralikverwertung ist in Abbildung 10 abgebildet.

Blockdiagramm KS-Trocknung, Mineralisierung und Ascheleaching



Recycling im Zementwerk ist die nachhaltigste Verwertung von Klärschlamm

Abbildung 9 Prinzip-Schema Klärschlamm-trocknung, Mineralisierung, Phosphorrückgewinnung (Ascheleaching) und Mineralikverwertung (Quelle: erzo ARA, Juni 2023).

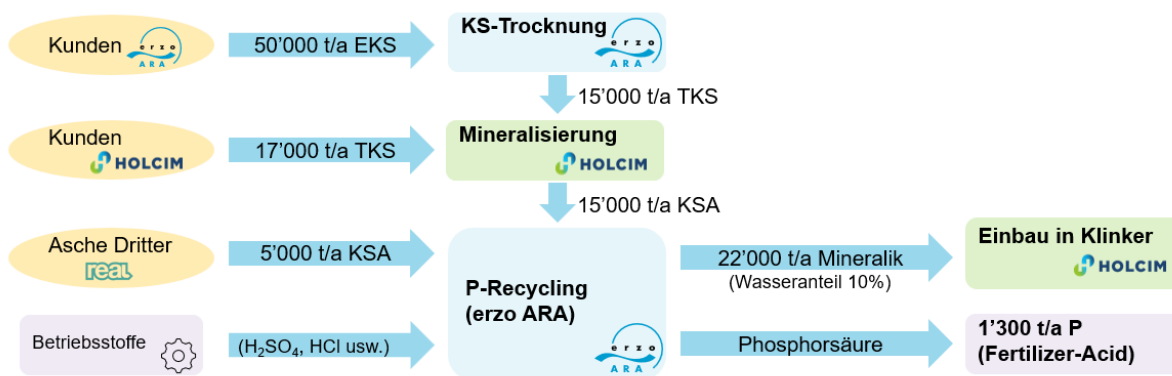


Abbildung 10 Stoffströme für die Phosphorrückgewinnung inkl. Klärschlamm-Mineralisierung (Quelle: erzo ARA, Juni 2023).

Das Produkt ist eine Dünger-Phosphorsäure (siehe «fertilizer/merchant grade phosphoric acid» in Anhang 5.4). Die jährliche Menge Dünger-Phosphorsäure mit rund 1'300 t Phosphor sind für die Weiterverarbeitung zu Phosphordünger P38/P30 durch ZAB vorgesehen. Grundsätzlich kann die Dünger-Phosphorsäure jedoch auch am Markt für die Weiterverarbeitung zu Düngemittel verkauft werden. Die Laboranalysen der verwendeten Klärschlammasche und der produzierten Phosphorsäure aus den Pilotversuchen zeigen, dass die Grenzwerte gemäss ChemRRV, Anhang 2.6⁴ eingehalten werden können (Tabelle 11 in Anhang 5.7). Allerdings sind die Kupfer- und Zink-Konzentrationen über den Branchenanforderungen der Düngemittelindustrie in der Schweiz (vgl. Tabelle 6, Anhang 5.4). Die geplanten Pilotversuche des Verfahrens mit Ionenaustausch sollen aufzeigen, ob die Herstellung einer

⁴ Grenzwerte beziehen sich auf das fertige Düngerprodukt

qualitativ besseren Düngerphosphorsäure grosstechnisch machbar und finanziell tragbar ist und die produzierte Phosphorsäure auch für die Herstellung von TSP46 geeignet ist.

3.2.2 Investitions- und Betriebskosten

Die Investitionskosten für die Umsetzung von Phosphor26 (inkl. Klärschlamm-trocknung, exkl. Mineralisierung) liegen gemäss Abschätzungen bei CHF 60 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis 2020) mit einer Genauigkeit von +/-20% (siehe Anhang 5.7). Davon entfallen rund CHF 20 Mio. auf die Klärschlamm-trocknung sowie CHF 40 Mio. auf den Bau der Phosphorrückgewinnung (Ascheleaching ohne Ionenaustausch). Die Betriebskosten des Ascheleaching-Verfahrens (ohne Ionenaustausch und exkl. Klärschlamm-trocknung) werden insgesamt auf CHF 6 Mio. pro Jahr (exkl. MwSt., Preisbasis 2020) mit einer mittleren Genauigkeit von +/- 10-15% geschätzt. Es ist nicht angegeben, ob die Betriebskosten der Klärschlamm-trocknung berücksichtigt sind. Die verfügbaren Grundlagen zu den Investitions- und Betriebskosten befinden sich in Anhang 5.7.

Auf diesen Grundlagen sind die Jahreskosten (Kapital- und Betriebskosten) sowie die erwarteten Einnahmen und Einsparungen in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammen mit den spezifischen Kosten pro Tonne Klärschlammasche dargestellt.

Tabelle 4 Jahreskosten (Kapital- und Betriebskosten) vom Projekt Phosphor26 (Ascheleaching ohne Ionenaustausch) und Gegenüberstellung mit Einnahmen zur Berechnung der ungedeckten Jahreskosten; exkl. MwSt. Preisbasis 2020, Genauigkeit Kapitalkosten +/-20%, Genauigkeit Betriebskosten +/-10%-15%

		Gesamt	Spezifisch pro t KSA*
Kapitalkosten	CHF/a	4'500'000	225
Betriebskosten	CHF/a	6'000'000	300
Jahreskosten, total	CHF/a	10'500'000	525
Einnahmen	CHF/a	2'300'000	115
Kosteneinsparungen	CHF/a	1'640'000	80
Jahreskosten, ungedeckt Phosphor26	CHF/a	8'200'000	410
Mehrkosten KSA-Verwertung mit P- \bar{O}	CHF/a	6'560'000	330

*20'000 t/a KSA

Die gesamten Jahreskosten für die Umsetzung von Phosphor26 werden auf CHF 10.5 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit +/-10% bis +/-20%) bzw. auf CHF 8.2 Mio. nach Abzug der Einnahmen von rund CHF 2.3 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert) geschätzt. Der Kostenschätzung liegt eine Anlagenkapazität von rund 20'000 t Klärschlammasche zugrunde.

Die Betriebskosten machen mit rund 57% mehr als die Hälfte der gesamten Jahreskosten aus. Der Anteil der Kapitalkosten beträgt rund 43%. Die Einnahmen betragen rund CHF 2.3 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert) aus dem Verkauf der Phosphorsäure bei einem geschätzten Verkaufspreis von 280 CHF/t Dünger-Phosphorsäure (50 Gew.-%). Folglich muss Phosphor26 jährlich ca. CHF 8.2 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert) einnehmen und somit eine Abnahmegebühr von 410 CHF/t KSA verlangen, um die Phosphorrückgewinnung inkl. Klärschlamm-trocknung finanzieren zu können. Es wird davon ausgegangen, dass ein erheblicher Teil der Rückstände an die Zementindustrie abgegeben werden kann und nicht auf Deponien entsorgt werden muss. Zusätzlich werden Einsparungen von rund CHF 1.6 Mio. erwartet, da die heutigen Deponiekosten von ca. 70 - 90 CHF/t für die Klärschlammasche wegfallen werden.

Es liegt keine Sensitivätsbetrachtung vor. Weitere Kostengrundlagen zum Projekt Phosphor26 werden im Rahmen der Pilotversuche für das Ascheleaching-Verfahren mit Ionenaustausch sowie im Verlauf der Projektierung erarbeitet.

3.2.3 Terminliche Umsetzung

Im Rahmen des Projekts Phosphor26 soll die Klärschlamm-trocknung bis Ende 2025 realisiert werden. Für die Umsetzung der Phosphorrückgewinnung wird zunächst im Rahmen einer Ausschreibung ein Planungsbüro ausgewählt, welches voraussichtlich im Frühjahr 2024 mit der Vorprojektierung starten wird (siehe Abbildung 11). Der Baustart ist abhängig vom Investitionsentscheid und die Inbetriebnahme ist rund 3.5 Jahre nach dem Investitionsentscheid geplant.

Realisierung Ascheleaching (erzo) + Mineralisierung (HOLCIM)

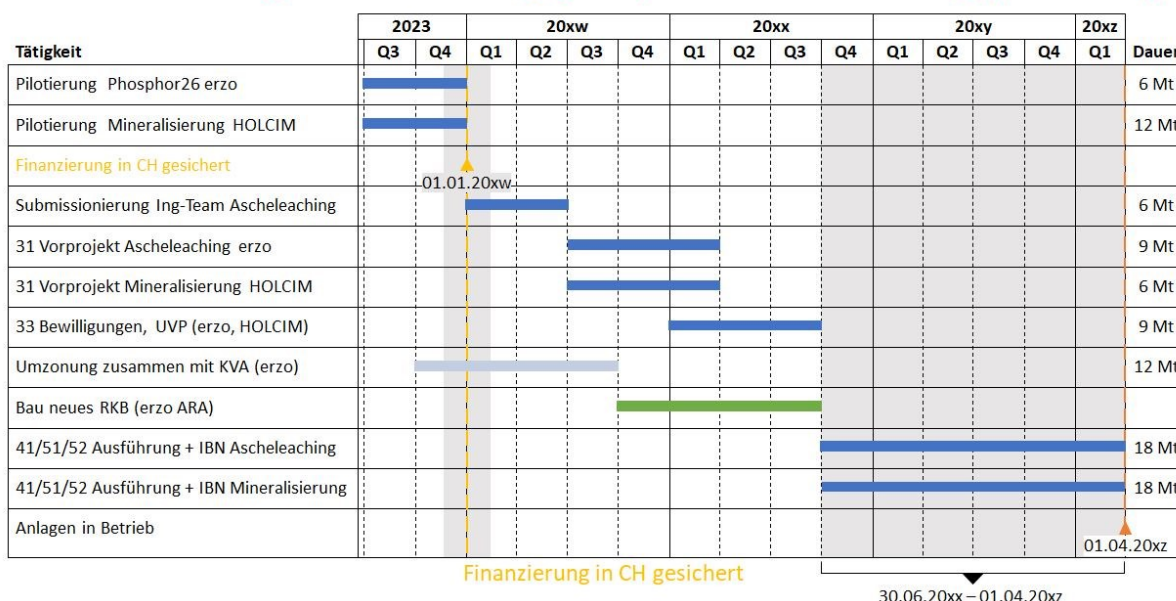


Abbildung 11 Terminplan zur Umsetzung von Ascheleaching im Rahmen des Projekts Phosphor26 und der Mineralisierung durch Holcim (Quelle: erzo ARA).

Das Projekt Phosphor26 kann somit die gesetzte Frist für die Phosphorrückgewinnung ab dem 1. Januar 2026 gemäss VVEA Art. 15 nicht einhalten.

3.2.4 Beurteilung und offene Fragen

Es liegt keine Risikobeurteilung oder Angaben zur Bewilligungsfähigkeit des Projekts vor, da die Projektierung noch weniger weit fortgeschritten ist als bei den Projekten P4L Emmenspitz und ZAB. Die folgende Einschätzung zu den Risiken, Chancen und offenen Fragen basiert auf den aktuell verfügbaren Informationen:

- Das Ascheleaching-Verfahren kann ausschliesslich mit Klärschlammasche aus der Schlammverbrennung erfolgen und ist nicht auf die Mineralisierung durch Holcim angewiesen. Die entsprechenden Risiken werden durch erzo ARA als gering beurteilt.
- Die Systemgrenzen zwischen der Phosphorrückgewinnung, der Klärschlamm-trocknung sowie der Mineralisierung sind in Bezug auf die Kosten, Mengen- und Energiebilanzen noch nicht abschliessend definiert und quantifiziert. In der Kostenschätzung wird gemäss erzo ARA davon ausgegangen, dass ein grosser Teil der Rückstände an die Zementindustrie (Holcim) abgegeben werden kann. Allerdings bestehen auch in Bezug auf die genauen Mengen und die Zusammensetzung für die Rückstände noch offene Fragen und Optimierungspotenzial.
- Die Dünger-Phosphorsäure hält gemäss Versuchsergebnissen die Anforderungen gemäss ChemRRV Anhang 2.6 ein. Die Branchenstandards in der Schweiz erfüllen sie zurzeit jedoch nicht, wodurch die aus Dünger-Phosphorsäure hergestellten Dünger in der Schweiz nicht von den Düngerehändler der Agricura abgenommen wird. Eine Eigenvermarktung wäre theoretisch möglich. Alternativ müsste der Dünger exportiert werden.

Die geplanten Pilotversuche des Ascheleaching-Verfahrens mit Ionenaustausch dienen dazu offene Fragen zu klären und die Chancen und Risiken von Phosphor26 besser beurteilen zu können. Unter anderem plant erzo ARA die Systemgrenzen zu präzisieren und anhand der Ergebnisse der Pilotversuche die Kostenschätzung zu detaillieren sowie die Absatzrisiken weiter einzugrenzen und aufzuzeigen, ob die Herstellung einer qualitativ besseren Düngerphosphorsäure grosstechnisch machbar und finanziell tragbar ist, und ob die produzierte Phosphorsäure für die Herstellung von TSP46 geeignet ist.

3.3 Stand der Umsetzung ZAB

3.3.1 Kurzbeschreibung Verfahren und Projekt

Der Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid (ZAB) plant am Standort in Bazenheid SG das ZAB-Verfahren grosstechnisch zu realisieren. Das Verfahren verwendet Klärschlammasche und Dünger-Phosphorsäure (siehe «fertilizer/merchant grade phosphoric acid» in Anhang 5.4), um mittels Säureaufschluss sowie einer Schwermetall-Abreicherung ein P38- oder P30-Dünger herzustellen. Ausserdem besteht in den Anlagen des ZAB die Möglichkeit aus technischer Phosphorsäure (z.B. von Phos4Life) sowie Tier- und Knochenmehlasche hochwertiges Tripelsuperphosphat (TSP46) herzustellen, welches direkt in der Schweiz als Dünger verkauft und eingesetzt bzw. zu einem Mehrnährstoffdünger weiterverarbeitet werden kann. Die Verfahren sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

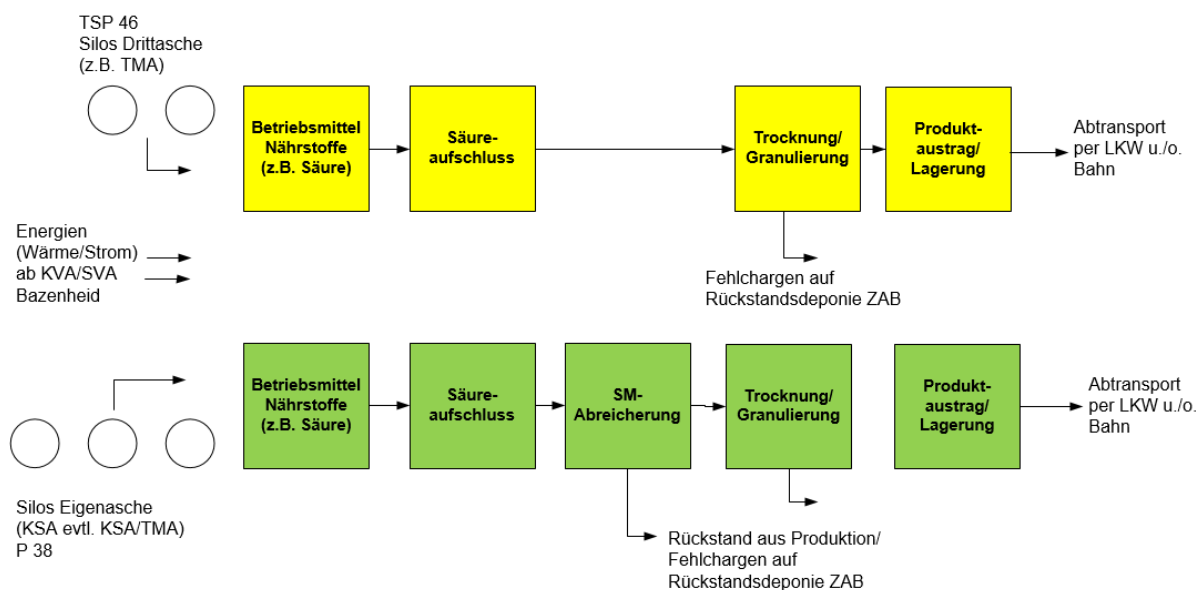


Abbildung 12 Schema ZAB-Verfahren zur Herstellung von P38- oder P30-Dünger und / oder TSP46 (Quelle: Projektbeschreibung vom Juni 2023).

Am Projekt beteiligte Partner sind die Klärschlamm-Interessengemeinschaft Ost (KIGO) mit dem Abwasserverband Altenrhein (AVA), der Landi Aachtal (Obstverwertung Oberaach TG, OGO) und dem ZAB sowie die TMF Extraktionswerk AG. Als Trägerschaft ist die Gründung einer Aktiengesellschaft «P-AG Bazenheid» geplant.

Das Areal in Bazenheid bietet in Bezug auf die Energieversorgung (Wärme, Elektrizität von der KVA/SVA), die Erschliessung mit der Bahn, die vorhandene Infrastruktur und Fachpersonal vorteilhafte Voraussetzungen und Synergiepotenzial für die Umsetzung des ZAB-Verfahrens.

Der AG Technik liegen ein Projektbeschreibung und Projektpräsentationen mit Mengenangaben, einem Terminplan und Angaben zur Wirtschaftlichkeit vor.⁵ Eine Massen- und Energiebilanz für die

⁵ das Vorprojekt liegt der AG Technik nicht vor

Phosphorrückgewinnung und -verarbeitung ist nicht verfügbar, lehnt sich jedoch an die effektiven Betriebsdaten der Anlage in Haldensleben an. ZAB plant die Verarbeitung von ca. 10'000 - 11'000 t Klärschlammasche mit rund 700 t Phosphor auf (vgl. Anhang 5.8). Eine Verarbeitung von grösseren Mengen Klärschlammasche ist gemäss ZAB möglich, um P38-Dünger mit bis zu 2'300 t Phosphor herstellen zu können (vgl. Angaben der AG «Absatz P-Produkte» in Anhang 5.8.2).

Der Rückgewinnungsgrad wird in den vorhandenen Informationen nicht angegeben. Abgeleitet aus verschiedenen Angaben von ZAB wird er jedoch auf ca. 75% - 80% geschätzt.

Das Produkt ist ein P38- oder P30-Dünger, welcher durch die Verarbeitung der Klärschlammasche mit Dünger-Phosphorsäure (ca. 8'000 Tonnen Dünger-Phosphorsäure 50 Gew-% von erzo ARA) hergestellt wird. Als Dünger-Phosphorsäure kann diejenige von erzo ARA eingesetzt werden. Gemäss Angaben zum Projekt ZAB (vgl. Anhang 5.8) ist die Herstellung von 15'000 t P38-Dünger vorgesehen. Die chemische Zusammensetzung des hergestellten Düngers liegt nicht vor. Gemäss dem Verfahrensentwickler können die Anforderungen gemäss ChemRRV Anhang 2.6 eingehalten werden. Der Vertrieb dieser Produkte ist zurzeit auf dem internationalen Markt vorgesehen.

Grundsätzlich kommt neben Klärschlammasche auch Tier- und Knochenmehlasche für die Produktion von P38-/P30-Dünger in Frage. Die Anlage kann optional Tier- und Knochenmehlasche mit rund 250 t Phosphor mitverarbeiten. Die Verwertung von Tier- und Knochenmehlasche ist ohne Anpassungen am Verfahrenskonzept möglich. Momentan verbietet die EU-Gesetzgebung jedoch die Nutzung von Düngemittel aus Tier- und Knochenmehlasche. Die geplante Anlage kann ausserdem aus technischer Phosphorsäure (z.B. von Phos4Life) und Tier- und Knochenmehlasche TSP46 herstellen. Es bestehen die erforderlichen Kapazitäten für eine jährliche Produktion von bis zu 13'000 t TSP46.

3.3.2 Investitions- und Betriebskosten

Die Investitionskosten für die Umsetzung des ZAB-Verfahrens liegen gemäss Abschätzungen bei CHF 20 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis 2020) mit einer Genauigkeit von +/-20% (siehe Anhang 5.8). Die Betriebskosten werden insgesamt auf CHF 6.47 Mio. pro Jahr (exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit nicht spezifiziert) veranschlagt. Die verfügbaren Grundlagen zu den Investitions- und Betriebskosten befinden sich in Anhang 5.8.

Die Jahreskosten (Kapital- und Betriebskosten) sowie die erwarteten Einnahmen und Einsparungen sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammen mit den spezifischen Kosten pro Tonne Klärschlammasche dargestellt.

Tabelle 5 Jahreskosten (Kapital- und Betriebskosten) vom Projekt ZAB und Gegenüberstellung mit Einnahmen zur Berechnung der ungedeckten Jahreskosten; exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit Kapitalkosten +/-20%, Genauigkeit Betriebskosten nicht spezifiziert

		Gesamt	Spezifisch pro t KSA*
Kapitalkosten	CHF/a	2'000'000	190
Betriebskosten	CHF/a	6'470'000	615
Jahreskosten, total	CHF/a	8'470'000	805
Einnahmen	CHF/a	5'250'000	500
Kosteneinsparungen	CHF/a	k/A	k/A
Jahreskosten, ungedeckt ZAB	CHF/a	3'220'000	305
Mehrkosten KSA-Verwertung mit P-Ü	CHF/a	k/A	k/A

*10'500 t/a KSA

Die gesamten Jahreskosten für die Umsetzung des ZAB-Verfahrens werden auf CHF 8.47 Mio. bzw. auf CHF 3.22 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit nicht spezifiziert) nach Abzug der

geschätzten Einnahmen von rund CHF 5.25 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert). Der Kostenschätzung liegt eine Anlagenkapazität von rund 10'500 t Klärschlammasche zugrunde.

Die Betriebskosten machen mit rund 75% den massgebenden Teil der gesamten Jahreskosten aus. Der Anteil der Kapitalkosten beträgt rund 25%. Die Einnahmen betragen rund CHF 5.25 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis und -genauigkeit nicht spezifiziert) aus dem Verkauf des P38-Düngers bei einem Verkaufspreis von 350 CHF/t Dünger. Folglich muss ZAB jährlich ca. CHF 3.22 Mio. (exkl. MwSt., Preisbasis 2020, Genauigkeit nicht spezifiziert) einnehmen und somit eine Abnahmegebühr von 305 CHF/t KSA verlangen, um die Phosphorrückgewinnung finanzieren zu können (darin eingerechnet sind die Deponierungskosten für alle Rückstände). Zusätzlich erwartet ZAB Einsparungen, da die heutigen Deponiekosten für die Klärschlammasche wegfallen werden. Zu den heutigen Deponiekosten der Klärschlammasche liegen keine Informationen vor.

Es liegt keine Sensitivätsbetrachtung zu den Kosten vor. Die Kosten wurden aus der grosstechnischen Düngerproduktionsanlage in Haldensleben (Seraplant) abgeleitet und mit den Kosten für die Abreicherung von Schwermetallen ergänzt.

3.3.3 Terminliche Umsetzung

Das Verfahren von ZAB in Bazenheid kann gut auf dem bestehenden Areal integriert und entsprechend zeitnah realisiert werden. Der Baustart ist im Frühjahr 2025 und die Inbetriebnahme ist für Sommer 2026 vorgesehen.

Das Projekt kann somit die gesetzte Frist für die Phosphorrückgewinnung ab dem 1. Januar 2026 gemäss VVEA Art. 15 nicht einhalten.

3.3.4 Beurteilung und offene Fragen

Es liegt keine Risikobeurteilung oder Angaben zur Bewilligungsfähigkeit des Projekts vor. Die folgende Einschätzung zu den Risiken basiert auf den aktuell verfügbaren Informationen:

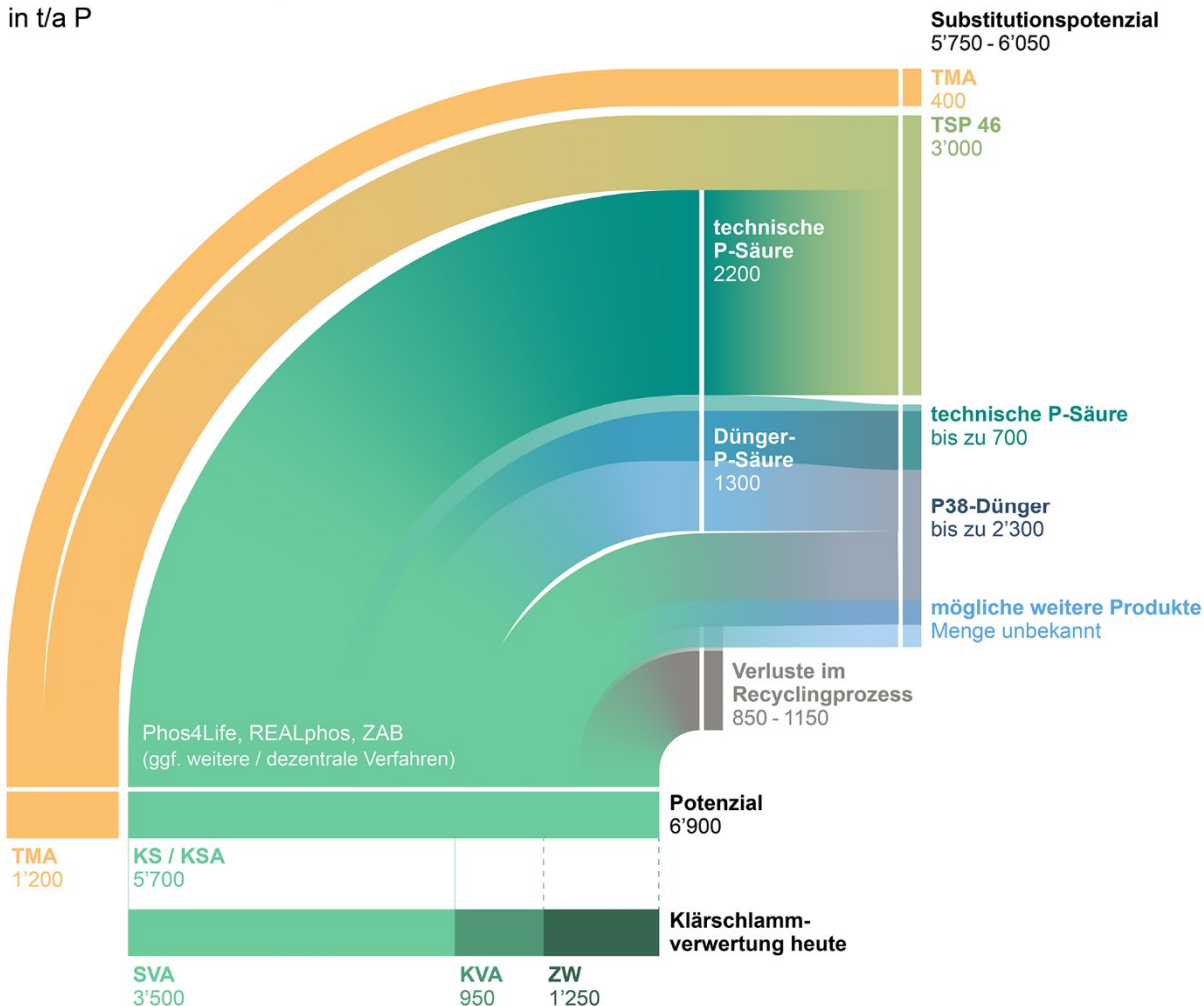
- Der P38-Dünger hält gemäss Aussagen die Anforderungen gemäss ChemRRV Anhang 2.6 ein. Die Branchenstandards in der Schweiz erfüllen sie jedoch nicht, wodurch die aus Dünger-Phosphorsäure hergestellten Dünger nicht über die Schweizer Düngemittelbranche vertrieben werden können, und direkt verkauft (Eigenvertrieb) oder exportiert werden müssten.
- In der Kostenschätzung wird gemäss ZAB davon ausgegangen, dass sämtliche Rückstände deponiert werden müssen. Offene Fragen und Optimierungspotenzial bestehen in Bezug auf die genauen Mengen, Zusammensetzung und den Entsorgungsweg für die Rückstände.

3.4 Stand der schweizweiten Umsetzung

Die drei geplanten Projekte P4L Emmenspitz, Phosphor26 und ZAB sind aufgrund ihrer Kapazitäten in der Lage den Phosphor aus grossen Mengen Klärschlammasche rückzugewinnen. Allerdings sind die drei Projekte nicht in der Lage das gesamte Potenzial an Phosphor in Klärschlamm auszuschöpfen: Einerseits gibt es in den Projekten Überschneidungen wie die Beteiligung von erzo ARA und REAL sowohl an P4L Emmenspitz als auch Phosphor26 und andererseits ist in einigen Kantonen noch offen, wie die Phosphorrückgewinnung erfolgen soll (vgl. Bericht AG "Umsetzung Kantone").

Die Abbildung 13 bietet einen Überblick über eine mögliche Variante der Umsetzung der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm sowie Tier- und Knochenmehlasche in der Schweiz. Die Mengenangaben basieren auf den Kapazitäten, Schnittstellen und Möglichkeiten der drei grössten in der Schweiz geplanten Projekte sowie den Überlegungen zur Kreislaufschliessung (AG «Absatz P-Produkte») und berücksichtigen die zahlreichen verbleibenden Unsicherheiten. Es sind aber auch andere Umsetzungsvarianten denkbar: Beispielsweise könnte die technische Phosphorsäure an die chemische Industrie verkauft werden, statt für die Produktion von TSP46 eingesetzt zu werden.

Stand der Umsetzung Schweiz
in t/a P



Abkürzungen: KS: Klärschlamm, KSA: Klärschlamm-asche, KVA: Kehrriechverbrennungsanlage, P38: Phosphordünger P38, TSP 46: Tripelsuperphosphat, SVA: Schlammverbrennungsanlage, TMA: Tiermehlasche, ZW: Zementwerk

Abbildung 13 Einordnung der drei grössten Projekte (P4L Emmenspitz, Phosphor26 und ZAB) und Lücken bei der flächendeckenden Umsetzung der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm / -asche und Tier- und Knochenmehl.

Es wird davon ausgegangen, dass Phosphor aus dem überwiegenden Teil des Klärschlamm bzw. der Klärschlamm-asche rückgewonnen werden muss, da gemäss BAFU-Vollzugshilfe «Phosphorreiche Abfälle» lediglich Kläranlagen mit weniger als 1'000 Einwohnerwerten (EW) von der Rückgewinnungspflicht ausgenommen sind [1]. Alternative Auslegungen in Bezug auf die quantitativen Anforderungen an die Rückgewinnungspflicht wurden aus diversen Gründen verworfen (siehe Anhang 5.5).

3.4.1 Potenzial

Das gesamte Rückgewinnungspotenzial beträgt ca. 6'900 t/a Phosphor, wovon ca. 1'200 t/a Phosphor in Form von Tier- und Knochenmehl zur Verfügung steht und rund 5'700 t/a Phosphor im Klärschlamm ist. Von den 5'700 t/a Phosphor liegen gemäss AG «Umsetzung Kantone» zurzeit nur 61% (3'500 t/a P) in Form von Klärschlamm-asche vor, da 22% (1'250 t/a P) getrocknet und in Zementwerken als Ersatzbrennstoff genutzt werden und 17% (950 t/a P) in KVA verbrannt werden.

Der Phosphor aus dem Abwassersektor dürfte gemäss aktuellen Entwicklungen überwiegend aus Klärschlamm-asche rückgewonnen werden. Daraus ergibt sich voraussichtlich eine Umlagerung der Klärschlammströme weg von der Kehrriechverbrennung hin zu Schlammverbrennungsanlagen. Die Kapazitäten der SVA für die zusätzlichen Klärschlamm-mengen werden gemäss aktuellen Auskünften der SVA-Betreiber voraussichtlich über das Jahr 2030 hinaus vorhanden sein (siehe Anhang 5.9). Falls getrockneter Klärschlamm weiterhin in Zementwerken als Brennstoff genutzt werden soll,

müssen Massnahmen zur Phosphorrückgewinnung umgesetzt werden. Eine Möglichkeit ist die Mineralisierung von getrocknetem Klärschlamm, um Synthesegas und Klärschlammasche herzustellen: Synthesegas wird als Brennstoff in der Klinker-Produktion genutzt und die Klärschlammasche steht für die Phosphorrückgewinnung zur Verfügung. Das gesamte Potenzial von 5'700 t/a Phosphor aus dem Abwassersektor wird erst nutzbar sein, wenn der Klärschlamm nicht mehr direkt in Kehrichtverbrennungsanlagen und Zementwerken verbrannt wird.

Der Phosphor in Tier- und Knochenmehlasche wird – sofern die rechtlichen Rahmenbedingungen in der Schweiz und EU geschaffen sind – vollständig als Düngemittel oder für die Düngemittelproduktion eingesetzt werden können.

3.4.2 Verfahren

Die drei Projekte P4L Emmenspitz, Phosphor26 und ZAB sind aktuell mit einer Rückgewinnungskapazität von ca. 4'300 bis 5'200 t/a Phosphor aus Klärschlammasche geplant. Mit einer Rückgewinnungsquote von 80% - 85% könnten durch diese drei Projekte bis zu 3'400 bis 4'400 t/a Phosphor aus Klärschlammasche rückgewonnen und mit den rund 1'200 t/a Phosphor in der Tier- und Knochenmehlasche in den Phosphorkreislauf rückgeführt werden. Abschliessende Kapazitätsangaben liegen für diese drei Projekte zurzeit nicht vor, da die Zusammenarbeit noch nicht verbindlich geregelt ist, z.B. durch Abnahmeverträge. Es ist folglich offen, welche Anlagen zur Phosphorrückgewinnung schlussendlich in welcher Grösse umgesetzt werden.

Andere Akteure, welche sich bisher nicht an den oben genannten Projekten beteiligen, haben gemäss AG «Umsetzung Kantone» die Absicht weitere Möglichkeiten zur Phosphorrückgewinnung zu prüfen. Zudem verfolgen einzelne Kläranlagen eine dezentrale Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser der Kläranlage. Den dazu erforderlichen Rückgewinnungsgrad von mindestens 50% [1] kann jedoch bestenfalls von Kläranlagen mit einer gut funktionierenden biologischen Phosphorelimination erreicht werden. Die so rückgewonnenen Phosphormengen werden für die gesamte Schweiz von untergeordneter Bedeutung sein.

3.4.3 Produkte

Die aus rückgewonnenem Phosphor hergestellten Hauptprodukte sind Phosphorsäure unterschiedlicher Qualität (P4L Emmenspitz, Phosphor26) sowie P38-, P30-Dünger oder TSP46 (ZAB). Für die Substitution von importierten Mineraldüngern gibt es mehrere Möglichkeiten:

Auf der Anlage des ZAB in Bazenheid ist nach der Schwermetall-Abreicherung der Klärschlammasche die Weiterverarbeitung mit einer "Dünger-Phosphorsäure" (z.B. Ascheleaching) zu Phosphordünger mit 30% oder 38% Phosphat (P38-/P30-Dünger) vorgesehen. P38-/30-Dünger hält die Branchenanforderungen für Düngemittel in der Schweiz nicht ein und müsste zurzeit exportiert werden. Grundsätzlich kommt TMA auch für die Produktion von P38-/P30-Dünger in Frage, allerdings erst nachdem entsprechende Dünger in der EU zugelassen sind.

Die Herstellung von Tripelsuperphosphat (TSP46) aus technischer Phosphorsäure und TMA ist verhältnismässig einfach möglich und könnte in der geplanten Anlage in Bazenheid (ZAB) erfolgen. Die AG «Absatz P-Produkte» geht davon aus, dass Tripelsuperphosphat (TSP) mit einer Phosphormenge von ca. 3'000 t/a in der Schweizer Düngemittelproduktion genutzt werden könnten. Dafür wären rund 800 t/a Phosphor in Form von TMA und 2'200 t/a Phosphor in Form von technischer Phosphorsäure erforderlich.

Mit technischer Phosphorsäure könnte auch der Bedarf der Schweizer Industrie von geschätzten 500 t/a Phosphor [5] gedeckt werden. Weitere Substitutionsmöglichkeiten von Produkten und Chemikalien für die Industrie sind zurzeit nicht bekannt.

Welche Mengen der jeweiligen Produkte zukünftig hergestellt werden, hängt von den tatsächlich umgesetzten Anlagenkapazitäten bzw. Verfahren ab und ist noch offen (vgl. Überschneidungen in Abbildung 13). Falls gewisse Akteure neue Projekte anstossen und erfolgreich umsetzen, sind auch weitere Produkte denkbar (vgl. Abbildung 13).

3.4.4 Verluste

Die Verluste bei der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm werden basierend auf einem Rückgewinnungsgrad von 80% - 85% auf 850 - 1'150 t/a Phosphor geschätzt. Entsprechend lassen sich voraussichtlich bis zu 6'000 t/a Phosphor aus dem Abwassersektor und aus Tier- und Knochenmehl rückgewinnen.

3.5 Zuverlässigkeit der Aussagen

Sämtliche Aussagen basieren auf den zur Verfügung stehenden Unterlagen und widerspiegeln den aktuellen Projektstand. Die technischen und wirtschaftlichen Angaben zu den Verfahren basieren auf Angaben der Verfahrensentwickler und können nicht durch unabhängige Daten oder Erfahrungswerte plausibilisiert werden. Sämtliche Aussagen sind bei sich ändernden Rahmenbedingungen (siehe Kapitel 1.3) zu überprüfen.

4 Schlussfolgerungen

Die Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwassersektor und aus dem Tier- und Knochenmehl stellt eine Chance zur Kreislaufschiessung dar. Die Schweiz wie auch Europa sind abhängig von Phosphorimporten zur Düngerproduktion und die Kreislaufschiessung stärkt die Versorgungssicherheit. Die Phosphorrückgewinnung bringt zudem auch Vorteile für die Umwelt: Wirtschaftlich nutzbare Phosphor-Vorkommen sind endlich und der Abbau von Rohphosphat mit einer erheblichen Umweltbelastung verbunden. Die Schwermetallbelastung von Rohphosphat ist zudem höher als in Tier- und Knochenmehl.

Die drei am weitesten fortgeschrittenen Projekte für die Rückgewinnung von Phosphor in der Schweiz sind P4L Emmenspitz, Phosphor 26 und ZAB. Der Terminplan in Abbildung 14 zeigt, dass die zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Tier- und Knochenmehlasche nicht innerhalb der Frist vom 1. Januar 2026 machbar ist.

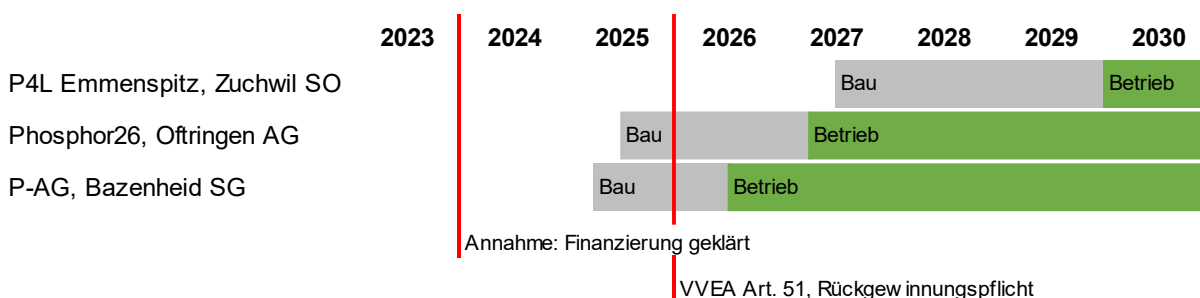


Abbildung 14 Grobterminplan gemäss aktuellem Projektierungsstand unter der Annahme, dass Finanzierung zeitnah geklärt werden kann.

Für die Einhaltung des Terminplans muss insbesondere die Investitionssicherheit gegeben sein. Eine grosse Herausforderung stellt die Vorfinanzierung der Investitionskosten dar. Diese kann nur sichergestellt werden, wenn die nötigen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Dazu gehören die Gründung einer Trägerschaft, verbindliche Liefer- und Abnahmevereinbarungen, welche die Finanzierung der ungedeckten Jahreskosten sicherstellen, ein flexibel bzw. sicher absatzfähiges Produkt sowie eine solide Projektierung nach SIA mit der Beurteilung aller relevanten Projektrisiken. Ab dem Investitions- und Umsetzungsentscheid muss mit einer Projektdauer rund 3-5 Jahren gerechnet werden, bis die Anlagen zur Phosphorrückgewinnung den Betrieb aufnehmen können.

Die Phosphorrückgewinnung wird verfahrenstechnisch als machbar beurteilt. Der Fokus liegt auf der Rückgewinnung aus Klärschlammasche, wodurch hohe Rückgewinnungsquoten von über 80% erreicht werden können. Die Verwertung des Phosphors in Tier- und Knochenmehlasche ist aufgrund des geringen Schadstoffgehalts und der Eignung als Phosphatquelle technisch problemlos möglich. Der Phosphor in Tier- und Knochenmehlasche kann vollständig verwertet werden, sobald die erforderlichen gesetzlichen Rahmenbedingungen dies zulassen. In der Schweiz können somit voraussichtlich Phosphormengen rückgewonnen werden, welche den importierten Mengen Phosphor in Mineraldünger für die Landwirtschaft und in Produkten und Chemikalien für die Industrie entsprechen oder sie übertreffen.

Die Qualität der rückgewonnenen Produkte ist entscheidend für die Absatzfähigkeit in der Schweiz oder im Ausland. Die technische Phosphorsäure aus dem Phos4Life-Verfahren bietet sehr flexible Absatzmöglichkeiten und bietet sich an für die Kreislaufschiessung in der Schweiz. Die Phosphorrückgewinnung mit dem Phos4Life-Verfahren ist allerdings auch aufwändiger und mit höheren Kosten verbunden. Demgegenüber ist die Phosphorrückgewinnung zur Herstellung von Dünger-Phosphorsäure und P38-/P30-Dünger weniger aufwändig und günstiger. Die Dünger-Phosphorsäure von erzo ARA und der P38-/P30-Dünger von ZAB erfüllt zwar die Anforderungen gemäss ChemRRV Anhang 2.6, jedoch nicht die Branchenstandards für Düngemittel in der Schweiz. Der Dünger könnte daher nicht über die Düngemittelindustrie in der Schweiz vertrieben werden, sondern müsste direkt verkauft (Eigenvertrieb) oder exportiert werden. Inwiefern die weitere

Entwicklung der Verfahren die Einhaltung der Branchenstandards beeinflusst, ist zurzeit eine offene Frage.

Die Phosphorrückgewinnung aus Tier- und Knochenmehlasche (TMA) ist wirtschaftlich tragbar⁶, da TMA aufgrund des tiefen Schadstoffgehalts als Rohphosphat-Ersatz direkt für die Düngemittelproduktion eingesetzt werden kann. Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm bzw. Klärschlammmasche ist deutlich teurer: Die Aufwände für Entwicklung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Phosphorrückgewinnung werden die Erlöse aus dem Verkauf des rückgewonnenen Phosphors bei den aktuellen Marktpreisen überschreiten. Die technische Umsetzung muss deshalb hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit optimiert sein, um die ungedeckten Kosten zu minimieren. Zudem setzt die wirtschaftliche Tragbarkeit der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser- und Klärschlammstoffströmen die Finanzierung der ungedeckten Kosten voraus. Diese belaufen sich auf geschätzte 300 - 580 CHF pro Tonne Klärschlammmasche und Jahr (exkl. MwSt. und Teuerung, Kostengenauigkeit undefiniert) und sind unter anderem stark von den Absatzpreisen sowie den Kosten für die Prozess-Chemikalien abhängig.

Für die Finanzierung der ungedeckten Jahreskosten nach der Inbetriebsetzung der Anlagen zur Phosphorrückgewinnung muss eine Abnahmegebühr auf die Klärschlammmasche verrechnet werden. Eine Finanzierung dieser Kosten über die Abwassergebühren wird gemäss AG Finanzierung als machbar beurteilt und vom Rechtsdienst des BAFU gestützt. Trotz bestehender Unsicherheiten bei den Kosten und Einnahmen wird die Umsetzung auch aus wirtschaftlicher Sicht als machbar beurteilt. Zudem sind auf dem aktuellen Stand der Verfahrensentwicklungen weitere Optimierungen sowie die Nutzung von Synergien möglich.

Auf dem heutigen Stand der Technik wird die Umsetzung der Phosphorrückgewinnungspflicht in der Schweiz als machbar beurteilt. Die drei Projekte P4L Emmenspitz, Phosphor26 und ZAB sind bereits konkret in Planung mit vergleichsweise hohen Kapazitäten, bieten jedoch noch keine flächendeckende Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. Klärschlammmasche in der Schweiz und werden nicht bis am 1. Januar 2026 in Betrieb sein. Weitere Projekte werden deshalb voraussichtlich nötig sein. Die erfolgreiche Umsetzung der einzelnen Projekte hängt stark von organisatorischen, finanziellen und regulatorischen Herausforderungen ab, welche projektspezifisch gelöst werden müssen.

6 vgl. Stand der Technik, VVEA Art. 3

5 Anhänge

5.1 Literatur

- [1] Bundesamt für Umwelt BAFU: Phosphorreiche Abfälle. Ein Modul der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA). Bundesamt für Umwelt. 2022
- [2] Aqua & Gas Nr. 1: SwissPhosphor - Gemeinsam Schritt für Schritt hin zum Phosphorrecycling in der Schweiz. Fachbericht S. 48-53. 2021
- [3] VSA/SVKI: Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung. 2023
- [4] BAFU (Hrsg.): Phosphorflüsse in der Schweiz 2015: Stand, Entwicklungen und Treiber. November 2017
- [5] Runder Tisch Phosphorrückgewinnung Olten: Zusammenfassender Bericht des «Runden Tisches Phosphorrückgewinnung Olten». 12 November 2022
- [6] EBP Schweiz AG: Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung. Bewertung von Technologien für die Schweiz bezogen auf den Entwicklungsstand April 2019 (mit punktuellen Ergänzungen aus dem Jahr 2021). Dezember 2021
- [7] VBSA: Klärschlammbehandlung in der Schweiz im Hinblick auf die Rückgewinnung von Phosphor / Erhebung der Daten 2017 im Auftrag des Bundesamts für Umwelt. 19. August 2019
- [8] ZAR: Prozessentwicklung und Prüfung der Machbarkeit des Phos4Life-Verfahrens am Standort Emmenspitz - Statusbericht. 27. April 2023

5.2 Abkürzungsverzeichnis

acr	Azienda Cantonale dei Rifiuti
AG	Arbeitsgruppe
ARA	Abwasserreinigungsanlage
AVA	Abwasserverband Altenrhein
BAFU	Bundesamt für Umwelt
Epura	Gestion et traitement des eaux usées et des boues d'épuration (Lausanne)
ERZ	Entsorgung + Recycling - Stadt Zürich
erzo ARA	Abwasserreinigungsanlage Entsorgung Region Zofingen
EW	Einwohnerwerte
KS	Klärschlamm
KSA	Klärschlammasche
KVA	thermische Kehrlichtverwertungsanlage
LANDI	LANDI Achtal Genossenschaft Amriswil
P38	Phosphatdünger mit Gehalt von 38 Gew.-% Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)
REAL	Recycling, Entsorgung, Abwasser Luzern
SAIDEF	Société Anonyme pour l'Incinération des Déchets du canton de Fribourg
SIG	Services Industriels de Genève
SVA	(Mono-)Schlammverbrennungsanlage
TA	Trocknungsanlage
TMA	Tier- und Knochenmehlasche
TMF	TMF Extraktionswerk AG Bazenheid
TS	Trockensubstanz
TSP46	Tripelsuperphosphat: Calciumdihydrogenphosphathaltiger Dünger mit Mindestgehalt von umgerechnet 46 Gew.-% Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen
ZAB	Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid
ZASE	Zweckverband der Abwasserregion Solothurn-Emme
ZW	Zementwerk

5.3 Pflichtenheft der AG Technik

- Aufgaben:**
- Überblick zu laufenden Projekten mit Bezug zur Schweiz. Identifizieren von Wissenslücken und Auslösen von Projekten zu offenen Fragen.
 - Erarbeitung einer Publikation (Website oder Bericht):
 - Beschreibung ausgewählter Schweizer Verfahren zur P-Rückgewinnung und der Entwicklung auf europäischer Ebene
 - Bereitstellung von Grundlagen zur ökonomischen Berechnung ausgewählter Rückgewinnungsverfahren für die AG Finanzierung
 - Verfolgung der Forschung und Entwicklung sowie der praktischen Umsetzung
 - Kontinuierliche technische Beratung der anderen AGn
 - Teilnahme der Leitung oder Stellvertretende Leitung an den JF SwissPhosphor Sitzungen
 - Pflege des Dokumentenmanagementsystems durch ein Mitglied der AG

Reportingaufgaben + interne Kommunikation:

1 x Jährlich: Zusammenstellung der Informationen zu den **ausgewählten** Verfahren (Rückgewinnung bis zum marktfähigen Produkt). Die Zusammenstellung soll einmal Jährlich publiziert / aktualisiert werden und wird vorgängig am JF vorgestellt und anschliessend dem LA zur Genehmigung der Publikation vorgelegt.

3 x Jährlich: Unterstützung der AG *Umsetzung der Kantone* bei der Vorbereitung der Inhalte für den Jour Fixe vom:

- 23.03.22
- 29.06.22

Milestones:

Q1 2022:	1. Konstituierung der AG
Q2 2022:	1. Festlegung der technischen Prozessschritte der Wertschöpfungsketten (P-reiche Abfälle bis hin zum Endprodukt). 2. Merkblatt zu den Anforderungen an die Verfahren zu P-Rückgewinnung (z.B. Wieviel P muss zurückgewonnen werden?).
Beginn Q4 2022	3. Darstellung möglicher Gesamtsysteme zur P-Rückgewinnung in der Schweiz. Aufzeigen der groben technisch und wirtschaftlich Rahmenbedingungen und deren Grenzen. Die Ergebnisse werden der AG Umsetzung Kantone zur Verfügung gestellt
Ende Q4 2022	4. Erste Publikation (Website oder Bericht) zu den Verfahren (s. Aufgaben)

Externe Kommunikation: Jährlich wird ein Überblick zu den verschiedenen Verfahren veröffentlicht, welche in der Schweiz umgesetzt werden sollen: Beschreibung und Validierung der Verfahren (Rückgewinnung bis zum marktfähigen Produkt). Die Veröffentlichung wird vorgängig dem JF vorgestellt und vom LA genehmigt.

Abgrenzung + Schnittstellen: Austausch mit allen AG. Enge Zusammenarbeit mit der AG Umsetzung Kantone. Weitere Definitionen bei Bedarf.

Budget Budgetangelegenheiten bedürfen des Entscheids des Lenkungsausschusses.

5.4 Qualitative Anforderungen Phosphorsäure und Düngemittel

Die Anforderungen an Phosphorsäure und Branchenanforderungen (Agricura) and Düngemittel in der Schweiz gemäss AG «Absatz P-Produkte» sind wie folgt:

Tabelle 6 Anforderungen der Industrie an eine Phosphorsäure sowie Branchenanforderungen (Agricura-Plattform) an Düngemittel in der konventionellen Landwirtschaft in der Schweiz (Quelle: Arbeitsgruppe Absatz P-Produkte, SwissPhosphor)

	Anforderungen Industrie an 85 Gew-% P-Säure mit 27 Gew-% P (ppm)	Anforderungen an Düngemittel (g/t P)
Aluminium		15'000
Arsen	1.5	100
Blei	10	500
Cadmium	1	25
Chlorid	10	
Chrom		1'000
Eisen	5	15'000
Fluor	10	
Kupfer	1	600
Nickel	2	500
Quecksilber		2
Sulfat	350	
Vanadium		2'000
Zink		1'000

In der nachfolgenden Tabelle sind unterschiedliche Qualitäten der Phosphorsäure dargestellt:

Tabelle 7 Kategorisierung Phosphorsäure nach Qualität gemäss R. Gilmor, 2014 (vgl. AG «Absatz P-Produkte»)

TABLE 2.3

Phosphoric Acid Group Categorization

Acid Group	Concentration	Impurity Level (ppm)	
Filter acid	28% P ₂ O ₅	5,000–25,000	
Fertilizer/merchant acid*	42%–54% P ₂ O ₅	10,000–50,000	
PWA feed acid**	54%–59% P ₂ O ₅	5,000–25,000	
Raffinate acid	25%–45% P ₂ O ₅	20,000–50,000	
Technical acid	50%–61.6% P ₂ O ₅	500–5,000	
Food acid	61.6% P ₂ O ₅	0.5–250	
Cola/pharma acid	61.6% P ₂ O ₅	0.5–100	
Semi (LCD) acid	61.6% P ₂ O ₅	0.1–1	*MGA = merchant grade phosphoric acid
Semi (semi) acid	61.6% P ₂ O ₅	0.01–0.1	**PWA = purified wet process acid

Quelle: Phosphoric Acid, R. Gilmour, 2014

5.5 Alternative Auslegung der Quantitativen Anforderungen

Alternative Auslegungen der VVEA zur Umsetzung der Rückgewinnungspflicht von Phosphor wurden aus diversen Gründen verworfen. Unter anderem wurde der sogenannte Frachtansatz verworfen, welcher vorsah, ausschliesslich so viel Phosphor zurückzugewinnen, wie zur Deckung des Schweizer Bedarfs an Düngemittel und eines Teils der chemischen Industrie erforderlich wären [5]. Der

Frachtansatz wurde unter anderem aus folgenden Gründen nicht weiterverfolgt: Die VVEA definiert eine Rückgewinnungspflicht von Phosphor aus den Abwasser- / Klärschlammströmen und aus Tier- und Knochenmehl (exkl. Futtermittel) gemäss Stand der Technik. Eine Teilrückgewinnung zur Deckung des Schweizer Bedarfs läuft darauf hinaus, dass Ausnahmen auf Teilmengen von Abwasser / Klärschlamm bzw. Tier- und Knochenmehl gewährt werden. Solche Ausnahmen stehen im Widerspruch zur Idee der Kreislaufschliessung und bringen technisch keine Vorteile gegenüber einer flächendeckenden Phosphorrückgewinnung. Zudem steht der Vollzug vor schwer lösbaren Herausforderungen, wie die Definition der Stoffströme, aus denen Phosphor nicht rückgewonnen werden muss, sowie die verursachergerechte Finanzierung.

5.6 Kostengrundlagen P4L Emmenspitz

Die folgenden Angaben zur Wirtschaftlichkeit des Projekts P4L Emmenspitz stammen aus dem Vorprojekt [8].

Tabelle 8 Investitionskosten (exkl. MwSt., Preisbasis 2020); Genauigkeit +/-30%

BKP	Bezeichnung	Kosten [CHF]
0	Grundstück (u.a. Entschädigung für Bestandesbauten)	7'000'000
1	Vorbereitungsarbeiten	11'000'000
2	Gebäude	23'000'000
3	Betriebseinrichtungen / Verfahren inkl. Nebenanlagen	67'000'000
4	Umgebung	5'000'000
5	Baunebenkosten	15'000'000
6	Unvorhergesehenes	25'000'000
9	Ausstattung	2'000'000
	Summe	155'000'000

Die Baunebenkosten (BKP 5) sind abhängig von Umsetzungsentscheid für das Projekt SwissZinc, aufgrund des Synergiepotenzials beim gemeinsamen Betrieb der Anlagen.

Tabelle 9 Kapitalkostenberechnung basierend auf angenommener Lebensdauer / Amortisationsdauer

Bezeichnung	Investition [Mio. CHF]	Amortisation [a]	Kapitalkosten [CHF]
Phosphor-Prozess (Phosphorrückgewinnung)	35.6	25	1'820'000
Abwasserbehandlung	5.5	25	280'000
Nebenanlagen	17.9	25	920'000
EMSRL	7.7	15	600'000
Gebäude	48	33	2'000'000
Baunebenkosten	15	33	630'000
Reserve	25.5	25	1'310'000
	155		7'600'000

Tabelle 10 Betriebskosten (exkl. MwSt., Preisbasis 2020), Genauigkeit +/- 15%

Betriebsmittel	Kosten [CHF/t KSA]	Kosten [CHF/a]
Betriebsmittel Phosphorrückgewinnung		
Schwefelsäure	63	2'520'000
Dampf	30	1'200'000
Strom	18	735'000
Restliche Betriebsmittel und Energie	42	1'715'000
Summe Betriebsmittel Phosphorrückgewinnung	153	6'135'000
Betriebsmittel Abwasserbehandlung	57	2'290'000
Rückstände Phosphorrückgewinnung inkl. Transporte	100	4'044'000
Rückstände Abwasserbehandlung inkl. Transporte	52	2'100'000
Wartung / Unterhalt	56	2'237'000
Personal	59	2'340'000
Bahnlogistik und Transporte	10	440'000
Baurechtszins	0.2	10'000
Versicherungen (0.5% Investment)	16	620'000
Unvorhergesehenes und Reserve	100	3'930'000
Summe OPEX	603	24'130'000

Für den Strompreis wurden 80 CHF/MWh und für die Dampfkosten 12 CHF/t ND-Dampf genommen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Sensitivität des Preises gegenüber verschiedenen Einflussfaktoren.

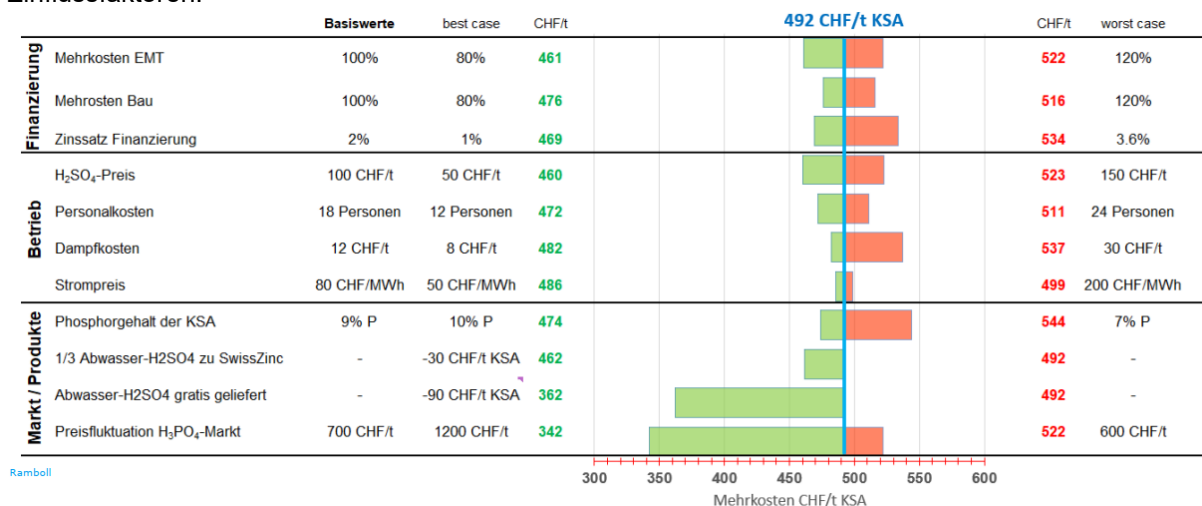


Abbildung 15 Sensitivitätsanalyse (Quelle: Vorprojekt, Ramboll).

5.7 Grundlagen Phosphor26

5.7.1 Wirtschaftlichkeit

Die folgenden Angaben zur Wirtschaftlichkeit des Projekts Phosphor26 liegen vor:

CAPEX / OPEX

(ohne IEX)

Aufwendungen	Betrag in CHF
Kapitalkosten (20 Jahre, 4% Zins, 60 mio)	4'500'000
Instandhaltung (3% der Investitionssumme)	1'800'000
Miete Infrastruktur / Areal	0
Energien: Dampf / Strom (ab KVA)	1'900'000
Personal: Schicht- / Unterhaltspersonal, Leitung	400'000
Betriebs- und Nährstoffe	1'200'000
Monitoring / Qualitätssicherung	100'000
UVG (10% OPEX)	600'000
Total Aufwand	10'500'000

1 / 10.07.2023 / Titel der Präsentation



5.7.2 Terminplan

Der Terminplan des Projekts Phosphor26 ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

Realisierung Ascheleaching (erzo) + Mineralisierung (HOLCIM)

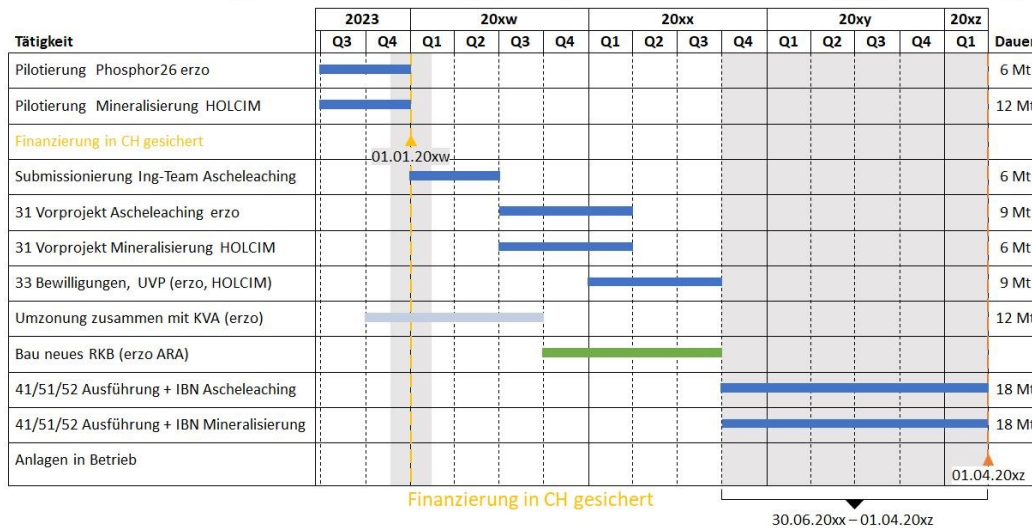


Abbildung 16 Terminplan zur Umsetzung vom Ascheleaching (Quelle: erzo ARA Juni 2023).

Terminplan KS-Trocknung (v2.1)

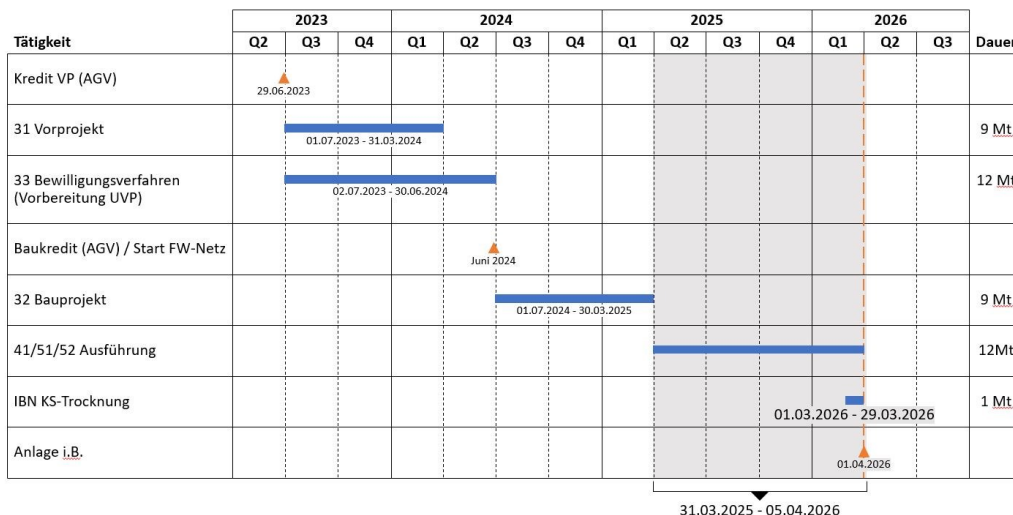


Abbildung 17 Terminplan zur Umsetzung der KS-Trocknung (Quelle: erzo ARA, Juni 2023).

5.7.3 Projektbeschreibung vom Juni 2023

Die durch das Ascheleaching realisierte P-Rückgewinnung produziert aus der Klärschlammasche der Region Zofingen, der Zementindustrie und der 5000 t/a Klärschlammasche von REAL (Emmen, LU) 1'300 t Phosphor in Form von Fertilizer-Acid zur Weiterverwendung in der Düngerproduktion bei ZAB (Bazenheid, SG).

Die als Reststoff anfallenden Mineralik werden als Rohstoffersatz im HOLCIM-Zementwerk eingesetzt.

Die Inputmenge KSA wird durch das Absatzmaximum von 1'300 t reinem Phosphor in Form von Fertilizer-Acid an Bazenheid bestimmt. Dementsprechend können ohne weitere Absatzmöglichkeiten 20'000 t KSA verarbeitet werden. Zu den 5'000 t KS-Asche von REAL können 15'000 t KSA von anderen Lieferanten verarbeitet werden.

Die P-Rückgewinnung läuft im Dauerbetrieb (etwa 8'000 h/a) zusammen mit der externen energieliefernden Anlage (KVA). Während der Revision wird der Betrieb eingestellt.

Für die Aschelaugung werden pro Tonne KSA etwa zwei Tonnen 15%-ige Schwefelsäure eingesetzt. Für die Verdünnung von Schwefelsäure und für die Nachwaschung der Asche etwa 1.3t Frischwasser pro t KSA bzw. 25'000 t/a benötigt.

In einem ersten Schritt wird die KSA gelaugt. Die Laugung des Phosphors geschieht mithilfe von schwach konzentrierter Schwefelsäure. Dabei gehen die in der KSA enthaltenen Phosphatsalze in Lösung. Die resultierende, saure Lösung besteht aus einem Anteil Phosphorsäure H₃PO₄ und diversen, Reststoffen aus der KSA.

Die Schwermetalle werden in diesem Schritt nur geringfügig aus der Asche herausgelöst. Im nächsten Schritt wird die phosphorhaltige Flüssigkeit mittels Filtration von den unlöslichen Ascheteilen getrennt. Die phosphorarme Asche (P-abgereicherte Mineralik) wird zur weiteren Verwertung wie z.B. Rohstoffersatz in der Zementindustrie weiterverwendet.

Pro Jahr fallen am Ende der Vakuumbandfilter etwa 36'000 t/a Mineralik bei 50% TS an. Um die erheblichen Transport- und Entsorgungskosten zu HOLCIM etwas abzufedern, soll die Mineralik auf mindestens 70% TS getrocknet werden. Dazu wird Abwärme aus der KVA verwendet.

Das phosphorsäurehaltige Filtrat wird in einem Fällungsbehälter überführt und in diesem mit einem Fällungsmittel behandelt (zum Beispiel ein sulfidisches Mittel, wie TMT15). Bei der Sulfid-Fällung ist es möglich, Kupfer auch im tieferen pH-Bereich auszufällen und somit von der Flüssigphase zu trennen. Dabei nutzt man die tiefe Löslichkeit der Sulfid-Anionen in Kombination mit Schwermetallkationen, welche schwerlösliche Sulfide bilden. Diese können folglich aus dem Säurestrom entfernt und separat entsorgt werden. Die mit TMT15 angereicherte Flüssigkeitsmischung wird anschliessend zu einer Kerzenfilteranlage geführt. Der Filtrations-Reststoff aus dem Kerzenfilter

wird zur weiteren Behandlung in eine chemische Abwasserreinigungsanlage bzw. direkt der Entsorgung übergeben.

Die aus dem Kerzenfilter abfiltrierte Phosphorsäure wird als Filtrat in einen Lagertank befördert.

Um die Transportmenge des Fertilizer-Acid zu reduzieren, wird die Säure aufkonzentriert. Da sie bei hohen Konzentrationen dickflüssig (honigartig) wird, wird sie mittels zweistufigem Fallverdampfer auf etwa 40% TS eingedampft. Als Endprodukt entsteht Fertilizer-Acid.

Das Projekt wurde beim BAFU in Bern Ende Mai 2023 vorgestellt und Mitte Juni 2023 wurde das Projekt von den Experten der KOKO UT (Expertenkommission der Umwelttechnologieförderung) als förderungswürdig deklariert. Im Rahmen des eingereichten UTF arbeitet erzo ARA mit der FHNW und MionTec für die Pilotierung des Verfahrens zusammen (siehe Abbildung 18). Ein LCA (Life Cycle Assessment) wird im Rahmen einer Masterarbeit mit der Universität Zürich erstellt. Eine wissenschaftliche Begleitung des Projekts findet durch die Universität Stuttgart statt.



Abbildung 18 Überblick der Zusammenarbeit im Projekt Phosphor26. Zusammen mit der FHNW wird eine Pilotierung mit Ascheleaching und Ionentausch durchgeführt. Im Bereich Ionentausch liefert die Fa. MionTec zusätzliche Erkenntnisse. Ein LCA in Form einer Masterarbeit mit der UZH und eine wissenschaftliche Begleitung der Universität Stuttgart runden das Projekt ab.

5.7.4 Prinzipschema und Erläuterungen

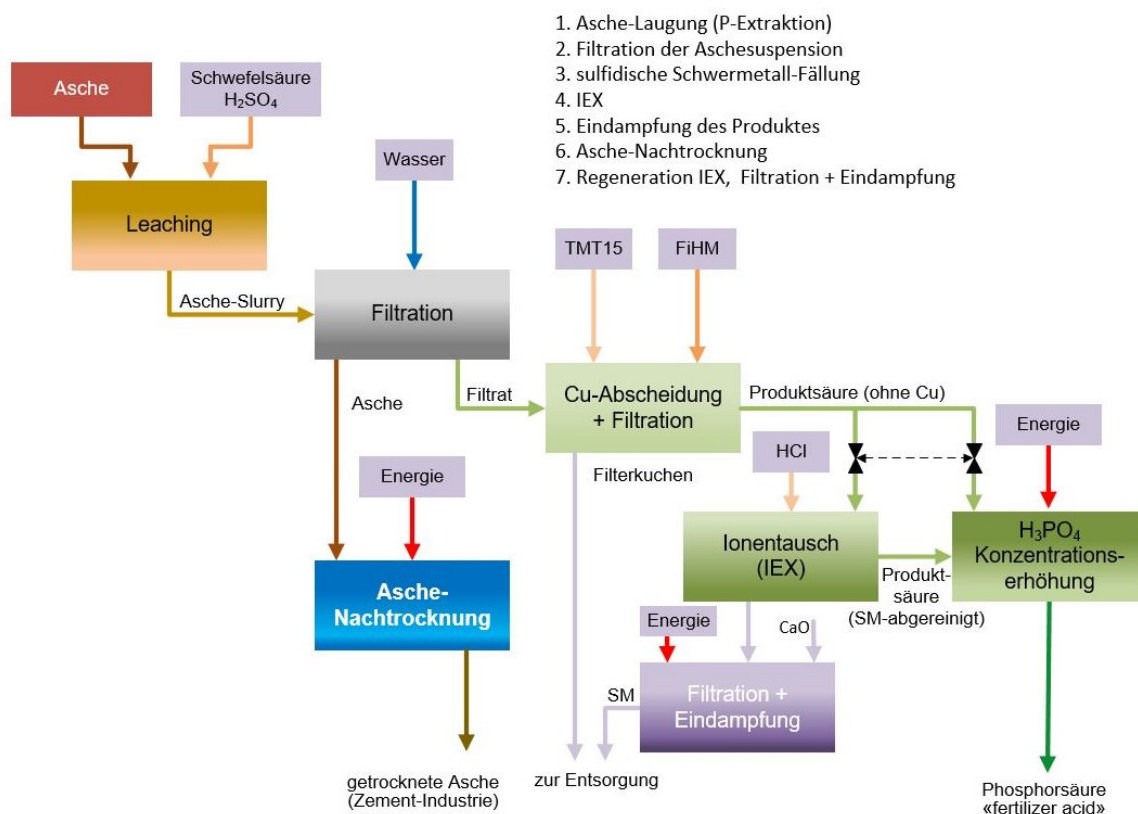


Abbildung 19 Prozessschema vom Projekt Phosphor26: REAL-Verfahren.


Das Ascheleaching-Verfahren (ohne Ionenaustausch) wurde bereits von REAL Abwasser in Emmen pilotiert. Einige Vorteile des Ascheleaching-Verfahrens sind:

- Gutmütiges Verfahren mit hoher Reproduzierbarkeit
- Die Phosphatsalze werden vor Ort herausgelöst, gereinigt, aufkonzentriert und entsprechend mit kleiner Masse transportiert.
- Das Ascheleaching-Verfahren ist – ist aufgrund seiner Einfachheit – gut automatisierbar (Betrieb ohne Beobachtung)
- Ascheleaching ist eine technisch risikoarme und wirtschaftlich interessante Methode zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen

5.7.5 Patent: Ascheleaching (REAL)

Verfahrensschema und Mengenflüsse

Beim Ascheleaching-Verfahren wird Phosphor aus Klärschlammasche (KSA) mit Säure extrahiert (sogenanntes Laugen bzw. «Leaching»). Ascheleaching besteht aus denselben Verfahrenskomponenten wie die bei KVA häufig eingesetzte Flugaschenwäsche. REAL hat mit Datum 17.12.2020 das Verfahren patentieren lassen:

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG	
<p>(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum Internationales Büro</p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum 17. Dezember 2020 (17.12.2020)</p>	 <p>(10) Internationale Veröffentlichungsnummer WO 2020/249410 A1</p>
WIPO PCT	
<p>(51) Internationale Patentklassifikation: <i>B01D 11/02</i> (2006.01) <i>C02F 11/00</i> (2006.01) <i>C02F 1/26</i> (2006.01) <i>C05F 7/00</i> (2006.01)</p> <p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/065063</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 29. Mai 2020 (29.05.2020)</p> <p>(25) Einreichungssprache: Deutsch</p> <p>(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch</p> <p>(30) Angaben zur Priorität: 803/19 13. Juni 2019 (13.06.2019) CH</p> <p>(71) Anmelder: REAL ENTSORGUNG RECYCLING ABWASSER LUZERN [CH/CH]; Reusseggstrasse 15, 6020 Emmenbrücke (CH).</p>	<p>(72) Erfinder: PREISIG, Werner, Hofmättelweg 1, 6055 Alpnach-Dorf (CH).</p> <p>(74) Anwalt: LUCHS, WILLI DIPL.-ING.; LUCHS & PARTNER AG, Patentanwälte, Schulhausstrasse 12, 8002 Zürich (CH).</p> <p>(81) Bestimmungsstaaten (<i>soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart</i>): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.</p>
<p>(54) Title: METHOD FOR PROCESSING SEWAGE-SLUDGE ASH</p> <p>(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM VERARBEITEN VON KLÄRSCHLAMM-ASCHE</p>	

Zum Ascheleaching-Verfahren gehören die folgenden Schritte:

1. Asche-Laugung
2. Filtration mittels Vakuumbandfilter
3. Sulfidische Schwermetall-Fällung inkl. Filtration mit einem Kerzenfilter
4. Eindampfung der produzierten Phosphorsäure
5. Nachtrocknung der gewaschenen Asche

5.7.6 Chemische Zusammensetzung Klärschlammasche und Produktsäure

Tabelle 11 Chemische Zusammensetzung der Klärschlammasche und Produktsäure gemäss Pilotversuch (Angaben in g/h = Frachtdurchsatz der Pilotanlage)

	Rohasche	Filtrate	nach der Sulfidfällung	GW MinRec	Ausbeute, Wiederfindung	Unterschreitung GW	✓ / / !!
	mg/kg P	mg/kg P	mg/kg P	mg/kg P	%	%	
Versuch vom 25.06.2020 (SM-Konzentrationen in der Rohasche mit Aschemonitoring-Werte SVA vom 15.07.20 ergänzt)							
MinRec-Metalle							
Quecksilber	< 2.4*	<<		2	k.A.	k.A.	k.A.
Cadmium	71	16		25	23%	-36%	✓
Arsen	44	<<		100	k.A.	ja	✓
Blei	1'222	3		500	0%	-99%	✓
Nickel	633	180		500	28%	-64%	✓
Chrom	903	240		1'000	27%	-76%	✓
Kupfer	7'311	4'873		3'000	67%	>>	!!!
Zink	21'438	4'944		10'000	23%	-51%	✓
sulfidische Fällung vom Kupfer (Versuche im Labor der Fa. AIK Technik AG, 21.12.2020)							
Kupfer		5'211	1'718	3'000	33%	-43%	✓
	Rohasche	Produktsäure		RGG-MinRec	RGG-REALphos		
	g/h	g/h		%	%		
Phosphor	5400	4610		50%	85%		✓

5.8 Grundlagen ZAB

5.8.1 Projektbeschreibung vom Juni 2023



Projekt Rückgewinnung und Veredelung von Phosphor am Standort des ZAB in Bazenheid



Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage	3
2.	Produkte	4
3.	P-AG Anlagen Bazenheid	5
3.1	Mengen der P-AG Betriebe	5
3.2	Schematisches Anlagekonzept	6
3.3	Betriebliche Eckdaten	8
3.3.1	Produktion P38	8
3.3.2	Produktion TSP 46	8
3.4	Finanzielle Eckdaten	9
3.4.1	Finanzielle Eckdaten für Produktion P38	9
3.4.2	Finanzielle Eckdaten für Produktion TSP 46	11
3.5	Ungedeckte Kosten	11
4.	Kombinationen im Rahmen der P-Rückgewinnung in der Schweiz	12
5.	Realisierungszeitachse P-AG Anlage Bazenheid	12
6.	Visualisierung	13

30.06.2023

Seite 2 von 13



1. Ausgangslage

Die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (SR 814.600, Abfallverordnung VVEA) schreibt im Artikel 15 "Phosphorreiche Abfälle" Folgendes vor:

- Aus kommunalem Abwasser, aus Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen oder aus der Asche aus der thermischen Behandlung von solchem Klärschlamm ist Phosphor zurückzugewinnen und stofflich zu verwerten.
- In Tier- und Knochenmehl enthaltener Phosphor ist stofflich zu verwerten, soweit das Tier- und Knochenmehl nicht als Futtermittel verwendet wird.
- Bei der Rückgewinnung von Phosphor aus Abfällen sind die in diesen Abfällen enthaltenen Schadstoffen nach dem Stand der Technik zu entfernen. Wird der zurückgewonnene Phosphor für die Herstellung eines Düngers verwendet, so müssen zudem die Anforderungen im Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4 der ChemRRV (SR 814.81) erfüllt sein.

Die Vorgaben der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung betreffen die mineralischen Recyclingdünger mit zurückgewonnenem Phosphor und werden generell auch Min-Rec-Qualitätsvorgaben bezeichnet.

In der Ostschweiz wird eine substantielle Menge des anfallenden Klärschlammes durch die Interessengemeinschaft Ostschweiz (KIGO) bewirtschaftet beziehungsweise thermisch behandelt. Die KIGO ist ein Anlageverbund zusammengesetzt aus den Betrieben:

- Abwasserverband Altenrhein (AVA)
- LANDI Achtal Genossenschaft Amriswil (LANDI)
- Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid (ZAB)

Der AVA und die LANDI betreiben je eine Klärschlamm-trocknungsanlage, der ZAB betreibt eine Schlammverbrennungsanlage. In der Wirbelschichtverbrennung des ZAB ist es möglich entwässerte, teilgetrocknete und getrocknete Klärschlämme zu mineralisieren. Gleichzeitig können auch andere phosphorhaltige Abfälle, beispielsweise Tiermehl, mit verbrannt werden.

In Bazenheid verarbeitet das TMF Extraktionswerk AG tierische Nebenprodukte der Kategorien K1, K2 und K3 zu Tiermehl und Tierfett.

30.06.2023

Seite 3 von 13



Vor diesem Hintergrund haben die vier Organisationen AVA, LANDI, ZAB und TMF entschieden die Pflicht zur Rückgewinnung und Veredelung des Phosphors gemeinsam anzugehen. Vorgesehen ist der Bau und der Betrieb einer Phosphor-Veredelungsanlage am Standort Bazenhaid mit dem Ziel Phosphordünger zu produzieren. Zu diesem Zweck soll eine neue Aktiengesellschaft gegründet werden. Der Arbeitstitel dieser Aktiengesellschaft lautet "P-AG Bazenhaid".

2. Produkte

Im Zusammenhang mit der Thematik der Phosphorrückgewinnung hat der ZAB in den letzten Jahren, in Zusammenarbeit mit einem deutschen Partner, den Schwerpunkt auf die Produktion von Phosphordünger gelegt. Als "Rohphosphate" diente dabei jeweils

- nur Klärschlammasche
- nur Tiermehlasche
- Gemisch aus Klärschlamm- und Tiermehlasche

In Labor- und Pilotanlagen sind in einer primären Phase die Rezepturen für Einnährstoffdünger (zum Beispiel P30 oder P38 Dünger) beziehungsweise Mehrnährstoffdünger (zum Beispiel NPK 15.15.15 oder PK 20.30) definiert worden. Gestützt auf diese Erkenntnisse hat anschliessend die Firma Seraplant GmbH in Haldensleben Deutschland eine industrielle Produktionsanlage mit einer Jahresproduktionskapazität von 60'000 Tonnen Produktmasse in Betrieb genommen. In dieser Anlage wird, ausgehend von nur Klärschlammasche, ein P38-Dünger produziert.

In Anbetracht der Tatsache, dass die schweizerischen Min-Rec-Qualitätsanforderung für Phosphordüngerprodukte strenger sind als die europäischen Qualitätsvorschriften, hat der ZAB die verfahrenstechnischen Vorgaben mit einer Schwermetallabreicherung ergänzt. Damit wird sichergestellt, dass die Min-Rec-Vorgaben und vorsorglich auch der künftige EU-Qualitätsstandard erfüllt werden können.

30.06.2023

Seite 4 von 13



3. P-AG Anlage Bazenhaid

3.1 Mengen der P-AG Betriebe

Das Mengengerüst für die P-AG setzt sich aus den folgenden, phosphorhaltigen Abfällen zusammen:

- AVA:	ca. 6'500	t/a getrockneter Klärschlamm	($\hat{=}$ ca. 200 - 280 t Phosphor pro Jahr) *
- LANDI:	ca. 6'500	t/a getrockneter Klärschlamm	($\hat{=}$ ca. 200 - 280 t Phosphor pro Jahr) *
- ZAB:	ca. 35'000	t/a entwässerter Klärschlamm	($\hat{=}$ ca. 300 - 280 t Phosphor pro Jahr) *
- TMF:	ca. 7'000	t/a Tiermehl	($\hat{=}$ ca. 250 - 280 t Phosphor pro Jahr) *

Die TMF produziert jährlich effektiv rund 10'000 Tonnen Tiermehl. Da die TMF sich alternative Entsorgungsmöglichkeiten für das Tiermehl offenlassen möchte, wird im Rahmen der weiteren Überlegungen der P-AG die Teilmenge von 7'000 Tonnen mitberücksichtigt. Gleichzeitig ist zu vermerken, dass Stand heute Düngerprodukte mit Tiermehlbestandteile im Europäischen Düngemarkt (noch) nicht zugelassen sind.

* Der Schwankungsbereich bildet den unterschiedlichen Phosphatanteil (P_2O_5 -Anteil), der in den Aschen ermittelt worden ist (in der Klärschlammasche zwischen 15 – 20 %);

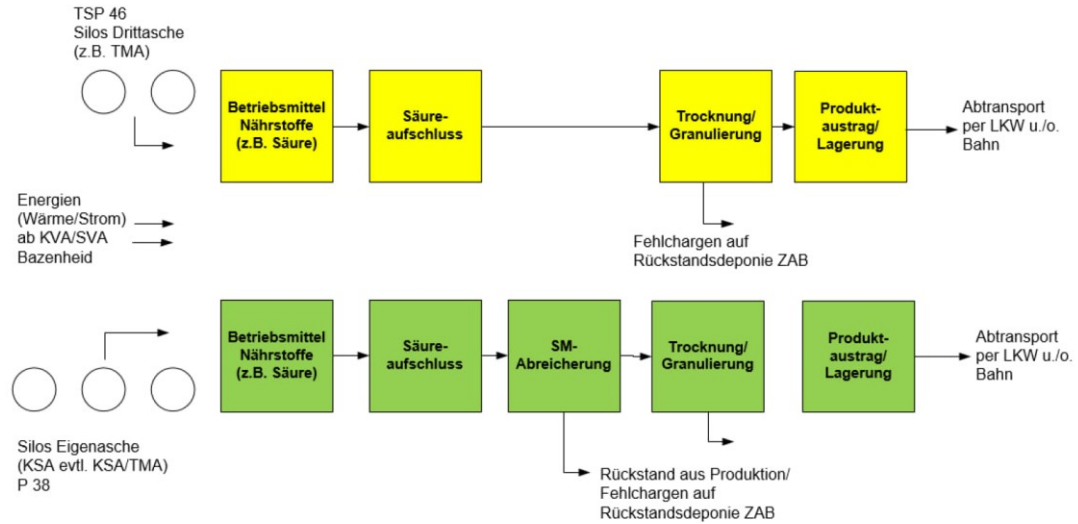
Die weiteren Berechnungen werden mit den tieferen Werten durchgeführt, sprich konservative Annahme.

30.06.2023

Seite 5 von 13



3.2 Schematisches Anlagekonzept



30.06.2023

Seite 6 von 13



- Kommentar zum Anlagekonzept / zur Produktion

Das definierte Anlagekonzept sieht folgende Prozessschritte vor:

- Lagerung der Klärschlammasche aus der Schlammverbrennungsanlage/aus der Wirbelschichtlinie Bazenheid in Aschesilos
- Förderung der Klärschlammasche und der Säure in Suspensionsbehälter (Säureaufschluss)
- Abreicherung der Schwermetalle
- Granulierung/Trocknung des Produkts
- Austrag und Lagerung des Produkts
- Abtransport des Produkts per LKW und/oder per Bahn (Bahnanschluss in Bazenheid bestehend)

Aus der schwermetallabgereicherten Klärschlammasche (der ZAB hat im Bereich Schwermetallabreicherung dreissig Jahre Betriebserfahrung) und der Säure (Qualitätsstandard erzo-Säure) wird ein P38- oder ein P30-Dünger produziert. Dieser Dünger hält die aktuellen Min-Rec-Qualitätsvorschriften beziehungsweise die künftigen EU-Qualitätsvorschriften ein. Sollte künftig in Europa auch die Mitverwertung von Tiermehlasche in der Phosphordüngerproduktion zugelassen sein, kann diese Asche im gewählten Anlagekonzept ohne zusätzlichen Aufwand integriert werden. Der P38-Dünger soll durch einen Vertriebspartner im Europäischen Raum vermarktet werden.

Mit dem definierten Anlagekonzept ist es optional möglich auch ein TSP 46 zu produzieren. Die Verfahrensprozesskette ist grundsätzlich gleich, wobei keine Schwermetallabreicherung notwendig ist. Für die Produktion des TSP 46 stehen zusätzliche Silos für die getrennte Lagerung dieser Drittasche zur Verfügung. Beispielweise könnte die Asche aus der Tiermehlverbrennung in Lyss mitverwertet werden, welche zusammen mit Phos4life-Säure zu TSP 46 verarbeitet werden kann. Dieses Produkt soll im Rahmen einer Kooperation für die schweizerische Düngerindustrie im Lohnauftrag produziert werden.

30.06.2023

Seite 7 von 13



3.3 Betriebliche Eckdaten

3.3.1 Produktion P38

- ca. 35'000 t/a entwässerter Klärschlamm ZAB (\pm 300 t P)
- ca. 6'500 t/a getrockneter Klärschlamm Landi Oberaach (\pm 200 t P)
- ca. 6'500 t/a getrockneter Klärschlamm AV Altenrhein (\pm 200 t P)
- Klärschlammasche ca. 10'000 – 11'000 t/a
- 50%ige P-Säure Qualitätsstandard erzoPhos ca. 8'000 t/a
- Produktmengen P38: ca. 15'000 t/a

Option: künftige, mögliche Mitverwertung von Tiermehlasche (ca. 1'500 t/a \pm 250 t Phosphor pro Jahr aus TMF Bazenheim)

3.3.2 Produktion TSP 46

Wie bereits erwähnt könnte in Bazenheim auch die Produktion des TSP 46 im Lohnauftrag für die schweizerische Düngerindustrie erfolgen. Als «Rohphosphat» kann Tiermehlasche verwendet werden. In Lyss fallen jährlich rund 4'500 Tonnen Tiermehlasche an. Für den Säureaufschluss ist vorgesehen 75%-P-Säure mit Phos4life-Qualitätsstandard einzusetzen. Gemäss der vordefinierten Rezeptur der Düngerindustrie können mit der Tiermehlasche aus Lyss und der Phos4life-Säure rund 13'000 Tonnen TSP 46 pro Jahr produziert werden.

30.06.2023

Seite 8 von 13



3.4 Finanzielle Eckdaten

3.4.1 Finanzielle Eckdaten für Produktion P38

Aufwendungen

→ Kapitalkosten (15 Jahre Abschreibung / 3 % Zins / Investition Fr. 20 Mio. +/- 20 %)	= ca. Fr.	2'000'000.00
→ Instandhaltung: ca. 3 % der Investitionssumme	= ca. Fr.	720'000.00
→ Miete Infrastruktur Areal	= ca. Fr.	50'000.00
→ Energien: Dampf / Strom (ab KVA/SVA Bazenheim)	= ca. Fr.	1'700'000.00
→ Personal: Schicht- / Unterhaltspersonal, Leitung	= ca. Fr.	1'400'000.00
→ Betriebs- und Nährstoffe (u.a. Säure) *	= ca. Fr.	2'300'000.00
→ Monitoring / Qualitätsüberwachung usw.	= ca. Fr.	100'000.00
→ Entsorgung Fehlchargen / Rückstände aus Produktion	= ca. Fr.	<u>200'000.00</u>
Total Aufwand	= ca. Fr.	8'470'000.00
Total Aufwand pro <u>kg</u> Phosphor in der Klärschlammasche (700'000 kg)	= ca. Fr.	12.—

Erträge

→ Düngerverkauf (15'000 t à 350.- Fr./t Waage Bazenheim, ohne Abtransport)	= ca. Fr.	5'250'000.00
Total Ertrag pro <u>kg</u> Phosphor in der Klärschlammasche	= ca. Fr.	7.50

* ca. 8'000 Tonnen 50% erzo-Säure à Fr. 280.- pro Tonne

30.06.2023

Seite 9 von 13



Ungedeckte Kosten	ca. Fr.	3'220'000.00
→ bezogen auf Tonne entwässerter Klärschlamm (85'000 t/a)	= ca. Fr.	38.- t eKS
→ bezogen auf <u>kg</u> Phosphor in der Klärschlammmasche (700'000 kg)	= ca. Fr.	4.6 kg P

Kommentar zu den finanziellen Eckdaten

Die ermittelten Aufwendungen sind abgeleitet aus der Düngerproduktionsanlage in Haldensleben ergänzt mit den Aufwendungen der Schwermetallabreicherung. Dazu folgende Bemerkungen:

- Die aktuelle Kostenschätzung geht von einem Investitionsvolumen von 20 Mio. CHF aus. Die Kostengenauigkeit beträgt +/- 20 %. Die Anlage soll ab Inbetriebnahme über 15 Jahre abgeschrieben werden. Die Verzinsung des Kapitals wird mit 3 % angenommen.
- Die notwendigen Energien (Wärme/Strom) werden ab den Thermischen Anlagen Bazenheid (KVA/SVA) zu Marktpreisen bezogen.
- Die P-AG Produktionsanlage soll im 3-Schicht-Betrieb während 7'500 bis 8'000 Stunden pro Jahr betrieben werden. Die übrige Zeit steht für Anlagerevisionen zur Verfügung. Gesamthaft sind 12 Schichtmitarbeiter (4 Schichten à 3 Mann) eingerechnet. Die Schichtmitarbeiter betreuen die Produktion und sind auch für den Umschlag und die Logistik verantwortlich. Nebst dem Schichtpersonal sind in den Personalaufwendungen anteilmässig auch Unterhaltsaufwendungen und leitendes Personal eingerechnet.
- Bei den Betriebs- und Nährstoffen sind insbesondere die Säuremengen eingerechnet (Basis erzo-Säure).
- Für allfällige Fehlchargen und für die Rückstände aus der Produktion sind die erforderlichen Entsorgungskosten eingerechnet. Die Entsorgung dieser Rückstände erfolgt in der ZAB-eigenen Deponie.

In der Summe ergeben sich jährliche Aufwendungen von rund 8.5 Mio. CHF. Dies für eine Produktmenge von rund 15'000 Tonnen P38 Dünger.

Demgegenüber stehen geschätzte Erträge ab Standort Bazenheid (somit ohne Transport) von CHF 350.- pro Tonne Produkt zur Verfügung. Geplant ist den Verkaufspreis an einen Phosphor- und einem Energieindex zu koppeln.

30.06.2023

Seite 10 von 13



3.4.2 Finanzielle Eckdaten für Produktion TSP 46

Wie bereits erwähnt, erfolgt eine allfällige Produktion von TSP 46 in Bazenheid im Lohnauftrag der Düngerindustrie. Dies würde bedeuten, dass für das «Rohphosphat» Tiermehlasche und für die Phos4life-Säure in der Produktkalkulation der entsprechenden Marktpreise eingesetzt werden müssten.

Der finanzielle Nutzen einer Produktionsanlage in Bazenheid, die sowohl P38 und TSP 46 produziert, besteht darin, dass die Produktionsfixkosten auf eine grössere Produktmasse umgelegt werden könnten.

3.5 Ungedeckte Kosten

Für die Produktion von rund 15'000 Tonnen P38-Dünger in Bazenheid fallen jährliche ungedeckte Kosten von rund 3.2 Mio. CHF an. Dieser Betrag verteilt auf die eingerechneten rund 85'000 Tonnen entwässerter Klärschlamm entspricht rund 38 CHF/t entwässerter Klärschlamm.

Umgerechnet auf die verarbeiteten rund 700 t Phosphor (in der Klärschlammmasche) ergibt dies ungedeckte Kosten von rund 4.6 CHF/kg Phosphor.

Die Finanzierung dieser ungedeckten Kosten kann durch einen nationalen Entsorgungsbeitrag oder durch Erhöhung der Abwassergebühren der Kläranlagen, die am P-AG Projekt angeschlossen sind, erfolgen.

30.06.2023

Seite 11 von 13



4. Kombinationen im Rahmen der P-Rückgewinnung in der Schweiz

Im Rahmen der Phosphorrückgewinnung in der Schweiz bestehen folgende Kombinationsmöglichkeiten:

- Klärschlammasche ZAB/AVA/OGO plus Marktsäure für Produktion P38 ab Beginn Betrieb P-AG-Anlage Bazenheid.
- Klärschlammasche ZAB/AVA/OGO plus erzoPhos-Säure für Produktion P38 ab Beginn Betrieb erzoPhos-Anlage.
- Strategische Option: Ergänzung für Produktion TSP 46, ist abhängig von einem Vertrag Tiermehlindustrie/Düngerindustrie/ P-AG Bazenheid. Diese Option könnte umgesetzt werden, sobald die P-AG Anlage in Bazenheid in Betrieb geht. Am Anfang würde zur Tiermehlasche eine P-Marktsäure eingesetzt. Sobald Phos4life-Säure verfügbar wäre, könnte diese Säure an Stelle einer Marktsäure eingesetzt werden.

5. Realisierungszeitachse P-AG Anlage Bazenheid

Die Realisierungszeitachse für das Projekt in Bazenheid sieht wie folgt aus:

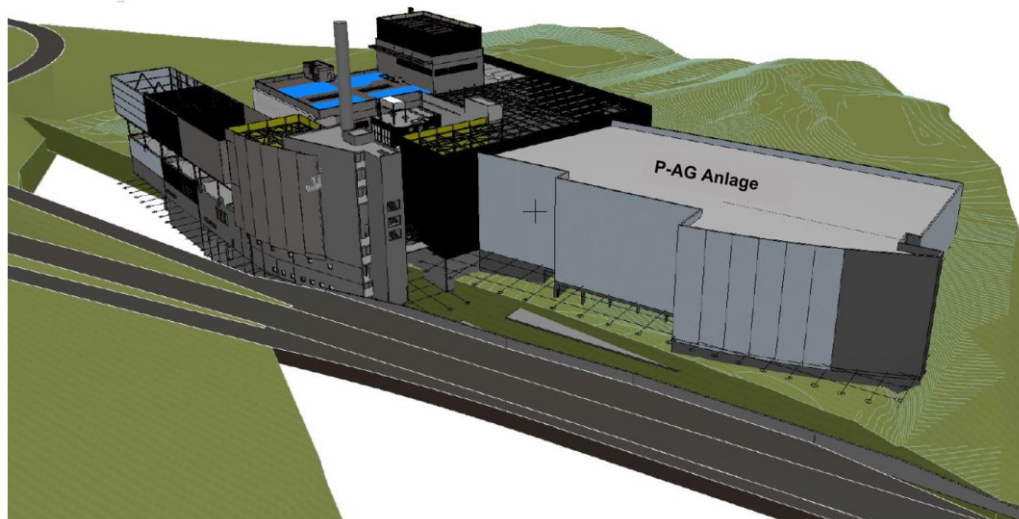
- Ausarbeitung Bauprojekt ist gemäss Beschluss VR ZAB gestartet worden.
- Anpassung Zonenplan erfolgt parallel zur Ausarbeitung des Bauprojekts inklusive UVB und Kostenvoranschlag bis im Winter 2023/2024.
- Einreichung Baueingabe im Frühjahr 2024.
- Auflage Projekt bis und mit Vorliegen Baubewilligung Frühling bis Herbst 2024.
- Bau bis und mit Inbetriebnahme: Frühling 2025 bis Sommer 2026.

30.06.2023

Seite 12 von 13



6. Visualisierung



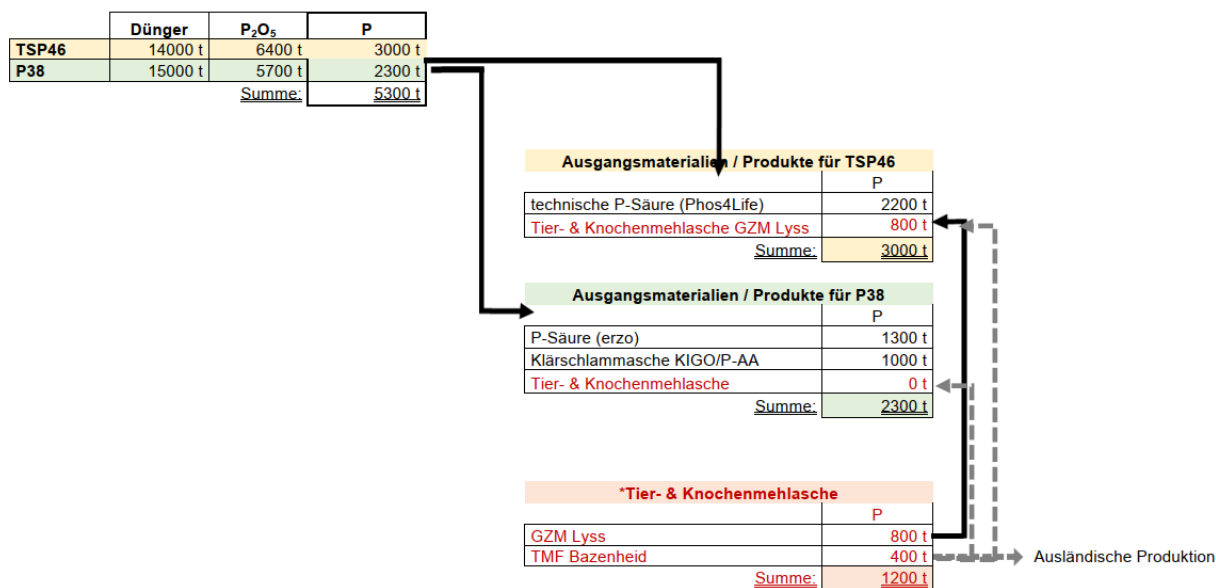
30.06.2023

Seite 13 von 13

5.8.2 Mengenangaben AG Absatz P-Produkte

AG Absatz P-Produkte SwissPhosphor

Anhang 2



Stand des Dokuments: 14. April 2023

6

5.9 Kapazitäten der Schlammverbrennungsanlagen in der Schweiz

Tabelle 12 Auslastung, aktuelle und zukünftige Kapazitäten der Schlammverbrennungsanlagen in der Schweiz

Schlammverbrennungsanlage SVA	Klärschlammmenge		Kapazität der Anlage	
	[t/a TS KS]		[t/a TS KS]	
	2021	2022	Aktuell	ab 2030
ERZ, Zürich ZH	27'000	27'600	28'800	28'800
ProRheno, Basel BS	20'700	18'100	26'000	30'000
REAL, Luzern LU	11'200	11'400	11'000	11'000
Epura S.A., Lausanne VD	8'900	6'900	11'000	13'000
ZAB, Bazenheid SG	k.A. (Umbau)*		11'000	11'000
SAIDEF S.A., Posieux FR	10'200	9'900	14'000	14'000
ERZO, Oftringen AG	9'300	8'400	9'500	-
ARA Rhein, Pratteln BL	k.A. (vertraulich)		k.A. (vertraulich)	
Lonza, Visp VS	4'800	4'100	k.A.	k.A.
Model (RENI), Niedergösgen SO	3'800	3'600	5'300	unklar
CIMO, Monthey VS	3'200	3'000	6'000	8500**
Enevi, Uvrier VS	800	900	1'000	
(geplant), Genf GE	-	-	-	15'200
(geplant), acr TI	-	-	-	5200***
Total SVA	99'900	93'900	123'600	136'700

* Auslastung vor Umbau (2020): ca. 10'000 t/a TS KS

** ungefähre Angabe: Definitive Kapazität gemäss kt. Abfallbewirtschaftungsplan 2023

*** ungefähre Angabe: Planung nicht abgeschlossen, Umsetzungsentscheid nicht gefällt (abhängig von P4L Emmenspitz)