Prozessentwicklung und Prüfung der Machbarkeit des Phos4life-Verfahrens am Standort Emmen-spitz

Statusbericht zur Veröffentlichung

27. April 2023

Projektname	**Prüfung der Umsetzbarkeit des Phos4life-Verfahrens am Standort Emmenspitz**
P4L	**P4L**
Empfänger	**Projektsteuergruppe Phos4life Emmenspitz**
Dokumententyp	**Statusbericht**
Version	**01**
Datum	**27.April 2023**
Erstellt von	**Stefan Schlumberger, Tobias Hofstetter & Planerteam P4L**
Genehmigt von	**Projektsteuergruppe Phos4life Emmenspitz**
Projektpartner	**ACR, ERZ, Epura, ERZO, REAL, SAIDEF, SIG, ZASE**

Abkürzungsverzeichnis

ABA	Abwasserbehandlungsanlage
ACTS	Abroll-Container-Transport-System
ARA	Kommunale Abwasserreinigungsanlage
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BM	Betriebsmittel
BKP	Baukostenplan
CAPEX	Kapitalkosten
EKS	Entwässerter Klärschlamm (30% TS)
EMSRL	Elektro-, Mess-, Steuer-, Regel und Leittechnik
FAS	Incoterms, Free Alongside Ship
FOB	Incoterms, Free on Board
HLKSE	Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär und Elektro
IBC	Intermediate Bulk Container
KS	Klärschlamm
KSA	Klärschlammasche
KVA	Kehrichtverwertungsanlage
ND-Dampf	Niederdruckdampf, 150°C, 4 bara
NS	Niederspannung
OPEX	Operativen Betriebsaufwand
P	Phosphor
P4L	Phos4life
SX	Solventextraktion
tKS	Trockener Klärschlamm (100% TS)
TMA	Tier- und Knochenmehlasche
TR	Técnicas Reunidas SA, Madrid, Spanien
TS	Trockensubstanz
TSP	Tripelsuperphosphat
UVB-VU	Voruntersuchung Umweltverträglichkeit
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen
ZASE	Zweckverband der Abwasserregion Solothurn-Emme

INHALT

1.	**Management Summary**	**1**
2.	**Hintergrund und Ziele**	**3**
2.1	Einleitung	3
2.2	Verfahrensevaluation zur Phosphorsäureproduktion	4
2.3	Verfahrensentwicklung und Pilotierung Phos4life	5
2.4	Mögliche Phosphorrückgewinnung in der Schweiz	7
2.5	Prüfung der Machbarkeit Phos4life am Standort Emmenspitz	7
2.6	Aufgabenstellung und Ziele der Machbarkeitsüberprüfung	8
3.	**Standort Emmenspitz**	**10**
4.	**Phos4life-Anlage**	**11**
4.1	Phos4life Verfahren	11
4.2	Nebenanlagen	14
4.3	Logistikkonzept	14
4.4	Elektro- und Leittechnik	16
4.5	Energetische Einbindung und Optimierung	16
4.6	Gebäudekonzept und Integration	17
4.6.1	Phos4Life-Gebäude	18
4.6.2	Baugrund	19
4.6.3	Bereiche / Räume und Funktionen	19
4.6.4	Baustelleninfrastruktur und Montageflächen	23
4.7	Genehmigungs- und umweltrechtliche Aspekte	23
4.8	Betriebsmodell	24
5.	**Wirtschaftlichkeit**	**25**
5.1	Investitionskosten	25
5.2	Betriebskosten und Wirtschaftlichkeit	26
6.	**Ökologie**	**28**
7.	**Umfeldbeobachtung und Produktabsatz**	**30**
8.	**Risikoanalyse**	**33**
9.	**Beurteilung Machbarkeit und Weiteres Optimierungspotenzial**	**35**
10.	**weiteres Vorgehen und Ausblick**	**36**

BEILAGENVERZEICHNIS

1. MANAGEMENT SUMMARY

Phosphor ist ein essenzielles und nicht substituierbares Element für Pflanzen, Tiere und Menschen. Als Nährstoff ist Phosphor unverzichtbar und somit neben Stickstoff und Kalium der dritte «Baustein» vieler Düngemittel. Über den Konsum von Nahrungsmitteln gelangt Phosphor in die Kläranlage. Dort ist Phosphor erst einmal ein Schadstoff, der im Sinne des Gewässerschutzes abgetrennt werden muss. Dies geschieht in der Schweiz hauptsächlich durch chemische Phosphorelimination mit Fällmitteln. Anschliessend wird der im Klärschlamm mit dem gebundenen Phosphor thermisch verwertet. Im Falle einer Monoverbrennung des Klärschlamms gelangt die gesamte Phosphorfracht in die Klärschlammasche, die derzeit noch ungenutzt abgelagert wird.

Mit dem Erlass der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) hat der Bundesrat am 4. Dezember 2015 gestützt auf das Umweltschutz- und Gewässerschutzgesetz die Bestimmung erlassen, wonach aus kommunalem Abwasser, aus Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen oder aus der Asche aus der thermischen Behandlung von solchem Klärschlamm Phosphor zurückzugewinnen und stofflich zu verwerten ist. Gemäss Art. 51 der VVEA gilt die Pflicht zur Rückgewinnung von Phosphor ab dem 1. Januar 2026.

Getrockneter Klärschlamm bzw. Klärschlammaschen (KSA) von ARAs mit chemischer Phosphorelimination eignen sich mit ihren geringeren Phosphor-Anteilen (2-6% bzw. 5-12% P) und den verhältnismässig hohen Schwermetallgehalten nicht zur direkten Nutzung bzw. zur Herstellung von Phosphordüngern. Qualitativ hochwertige und vom Markt nachgefragte Produkte können so nicht hergestellt werden bzw. benötigen sehr viel «sauberen» Phosphor zur Verdünnung. Als Lösung bietet sich daher der Weg über die Herstellung sauberer Phosphorsäure aus KSA als Zwischenschritt an.

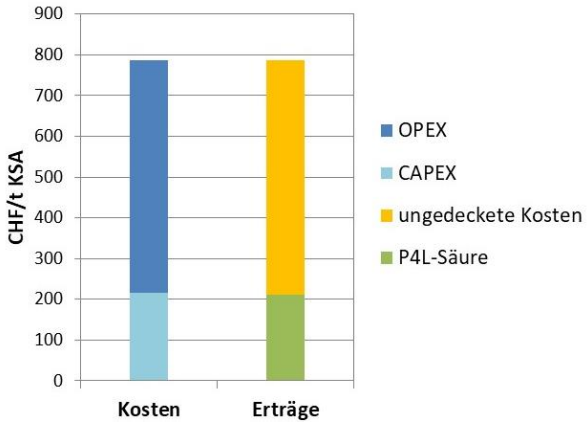
Eine Verfahrensevaluation ergab 2014, dass es am Markt bisher keine erfolgreich umgesetzten und etablierten Verfahren zur Herstellung technisch reiner Phosphorsäure aus KSA gab. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich hat die Stiftung ZAR anschliessend einen geeigneten Entwicklungspartner evaluiert: Técnicas Reundias SA aus Madrid (Spanien). Gemeinsam mit dem spanischen Generalunternehmer TR wurde das Phos4life-Verfahren anschliessend entwickelt, erfolgreich pilotiert (2015 – 2018) und im laufenden Projekt weiter optimiert bzw. vereinfacht.

Die Umsetzbarkeit des Phos4life-Verfahrens zur Behandlung von 40'000 t/a KSA wurde am Standort Emmenspitz (Zuchwil, SO) geprüft. Dort ist durch den Betrieb der KEBAG erneuerbare Energie in Form von Dampf und Strom sowie eine gute Verkehrsanbindung durch Strasse und Bahnanschluss vorhanden. Darüber hinaus verfügt das Betriebsteam der KEBAG bereits über jahrelange Erfahrung mit einer auf gleicher Technologie basierenden Anlage (FLUREC-Verfahren), wodurch auf dem dort gewonnenen Knowhow für den zukünftigen Phos4life-Betrieb aufgebaut werden kann. Erforderliche Platz- sowie Logistikflächen könnten in geeigneter Weise bereitgestellt und im Falle des bestehenden FLUREC-Gebäudes auch weitergenutzt werden, so dass ein entsprechender Phos4life-Bau ab 2027 umsetzbar ist. Zuvor muss auf dem Areal aber der Rückbau bestehender Bauten, die nach der Inbetriebnahme der neuen Kehrichtverwertungsanlage KEBAG Enova nicht mehr benötigt oder an einen anderen Standort umgesiedelt werden können, abgeschlossen sein. Dies bedeutet, dass eine Phosphorrückgewinnungsanlage im Emmenspitz erst ab 2030 in den operativen Betrieb gehen kann und somit die derzeitige gesetzliche Frist nicht einhalten würde.

Die notwendigen Betriebsmittel sowie die anfallenden Produkte und Rückstände können in geeigneter Weise an- und abgeliefert werden. Insgesamt werden durch Phos4life etwa 175'000 t/a Güter bewegt, davon mehr als die Hälfte klimafreundlich per Bahntransport. Die Voruntersuchung zur Umweltverträglichkeit durch den Kanton Solothurn wurde erfolgreich abgeschlossen, die massgebenden Umweltvorschriften können alle eingehalten werden.

Durch die aktuell geopolitisch angespannte Situation ist einerseits die Kostenermittlung sowie anderseits auch die Situation auf den Rohstoffmärkten von Unsicherheiten gekennzeichnet. Die nachfolgende Kostenbetrachtung basiert daher auf dem Preisniveau des Jahres 2020. Sowohl für die Investitions- als auch Betriebskosten wurden Preise aus dem Referenzjahr 2020 angewendet. Die im Rahmen des Projektes ermittelten Investitionskosten belaufen sich für den Bau der Anlage und der

Bewirtschaftung bis zur Aufnahme des Regelbetriebs auf CHF 155 Mio. Die Genauigkeit dieser Kostenermittlung liegt bei ±30%. Die Kapital- und Amortisationskosten von ca. 220 CHF/t KSA stellen rund 25% der Gesamtkosten dar. Der operative Aufwand von ca. 570 CHF/t KSA dominiert hier deutlich. Durch den Verkaufserlös der Phosphorsäure können 210 CHF/t KSA gedeckt werden. Da die Phos4life-Anlage keinen Gewinn erwirtschaften, sondern einen kostendeckenden stabilen Betrieb ermöglichen soll, ist eine entsprechende Behandlungsgebühr zur Annahme der Klärschlammasche notwendig. Die Kosten der Annahmegebühr zum Ausgleich der ungedeckten Kosten belaufen sich auf ca. 580 CHF/t KSA.



Für den Absatz der technisch reinen Phosphorsäure zu marktüblichen Preisen stehen zwei unabhängige Wege zur Verfügung: chemische Industrie oder Mineraldüngerproduktion. Die Düngerproduktion ermöglicht dabei die Herstellung eines hochwertigen Phosphor-Mineraldüngers, der gegenüber den konventionellen Mineraldüngern deutliche ökologische Vorteile – insbesondere tiefere Uran- und Schwermetallgehalte - aufweist. Die Phos4life-Phosphorsäure bietet auch gegenüber primär gewonnener Phosphorsäure deutliche ökologische Vorteile. Sowohl bei der Umweltbelastung als auch bei der CO_2-Bilanzierung schneidet Phos4life besser ab. Insbesondere bei der CO_2-Bilanzierung bieten sich in einer nächsten Projektphase weitere Optimierungsmöglichkeiten an, wenn die im Abwasserstrom der Phos4life-Anlage vorhandene Schwefelsäure noch einer weiteren Nutzung zugeführt werden kann.
Die Machbarkeit des Phos4life-Verfahrens zur Behandlung von 40'000 t/a KSA am Standort Emmenspitz konnte somit erfolgreich gezeigt werden. Die im Rahmen der Projektvereinbarung gestellten Ziele sind erreicht und die entsprechenden Aufgaben erfüllt. Zum Abschluss der Arbeiten wird die Stiftung ZAR bis zum Jahresende 2023 noch einen Businessplan erstellen und den Projektpartnern zustellen.

Ausblick:
Damit das Projekt in einer nächsten Phase weiterentwickelt werden kann, braucht es eine Trägerschaft, die sich unter anderem der Weiterentwicklung des Projektes, der Standortsicherung, Fragen zur Organisationsform, des Betriebsmodells und der Mitwirkung bei der übergeordneten strategischen Planung auf nationaler Ebene annimmt. Damit sich eine entsprechende Trägerschaft formiert, muss zwingend zuerst auf politischer Ebene die Frage der Finanzierung der Phosphorrückgewinnung verbindlich geklärt werden. Dies ist insbesondere darum notwendig, weil nur ein Teil des Klärschlamms bzw. der Klärschlammasche behandelt werden muss, um zusammen mit dem Phosphor aus dem Tier- und Knochenmehl den Phosphorbedarf der Schweizer Landwirtschaft abzudecken. Nach der Klärung der Finanzierung bietet sich die Chance, am Standort Emmenspitz eine Anlage zur Bearbeitung der Hälfte der schweizweit anfallenden Klärschlammaschenmenge zu realisieren: Dies wäre ein zukunftsweisendes Leuchtturmprojekt ganz im Sinne der Kreislaufwirtschaft.

2. HINTERGRUND UND ZIELE

2.1 Einleitung

In der Schweiz wurde bis zum Verbot im Jahr 2006 Klärschlamm aus den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) als Nährstoffquelle in der Landwirtschaft direkt auf Böden ausgetragen. Das Verbot beruht auf Basis des Vorsorgeprinzips – einer zentralen Säule des Schweizer Gesundheits- und Umweltrechts, die auch im Sinne des Phosphor-Recyclings zur Begrenzung der Schadstoffeintrags mit Mineraldüngern angewendet werden könnte. Demnach müssen «Einwirkungen auf die Umwelt, die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig begrenzt werden, auch wenn der letzte wissenschaftliche Nachweis einer Schädlichkeit nicht erbracht werden kann»[1]. Klärschlamm weist neben Pflanzennährstoffe wie Phosphor und Stickstoff, aber auch eine ganze Palette von Schadstoffen und Krankheitserregern aus Industrie, Gewerbe und Privathaushalten auf. Durch das Verbot wurde aus einem Düngemittel ein Abfallprodukt. Klärschlamm weist jedoch ein grosses Potenzial zur Phosphorrückgewinnung auf, da der darin enthaltene Phosphor als Ressource genutzt werden kann. Mit dem Erlass der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) hat der Bundesrat am 4. Dezember 2015, gestützt auf das Umweltschutz- und Gewässerschutzgesetz, die Bestimmung zur Phosphorrückgewinnung und stofflichen Verwertung aus kommunalem Abwasser, aus Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen oder aus der Asche aus der thermischen Behandlung von solchem Klärschlamm erlassen. Diese gesetzliche Regelung sieht aktuell eine Phosphor-Rückgewinnungspflicht ab dem Jahr 2026 vor.

Zur Phosphor-Rückgewinnung bieten sich verschiedene Ansätze, die Rückgewinnung eines Düngerproduktes aus dem Klärschlamm oder der Klärschlammasche bzw. die Herstellung eines hochwertigeren Phosphorproduktes, z.B. Phosphorsäure. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich hat die Stiftung ZAR von 2011 bis 2018 mit weiteren Partnern ein Phosphor-Mining für die Klärschlammaschemenge des Kantons entwickelt (Abbildung 2-1). In einer ersten Phase von 2011bis 2013 lag der Fokus auf der Herstellung eines sekundären Düngerrohstoffes (Calciumphosphat) aus der Klärschlammasche. Daraus resultierte das von der BSH Umweltservice AG entwickelte «LeachPhos-Verfahren»[2], bei dem mit Schwefelsäure der Phosphor aus der KSA extrahiert und zu einem Calciumphosphat-Dünger aufbereitet wurde. In einem industriellen Grossversuch als Demonstrationsanlage konnte die Eignung Ende 2012 erwiesen werden. Trotz technischer Machbarkeit wurde das Verfahren aufgrund einer Risikobeurteilung vor allem aus Produkt- und Absatzperspektive als zu wenig zielführend eingestuft. Für ein entsprechendes Calciumphosphat mit hohen Aluminium- und Eisengehalten war kein Markt in der Schweiz vorhanden, der Absatz ins grenznahe Ausland sehr riskant, da es nur sehr wenige ausländischen Abnehmer gibt und die Produkterträge im Verhältnis zu den Transportkosten sehr gering sind. Dies führte 2014 zu einer Weiterentwicklung des Lösungsansatzes und einem Strategiewechsel. Gefragt war ein höherwertiges, handelsübliches Produkt mit besseren Absatzchancen und geringeren Risiken. Technisch reine Phosphorsäure als Produkt aus Klärschlammasche erfüllte diese Ansprüche.

[1] Medienmitteilung des Bundes (UVEK), Düngen mit Klärschlamm wird verboten, Bern, 26.03.2003
[2] Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung (2019), EBP Schweiz AG, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt

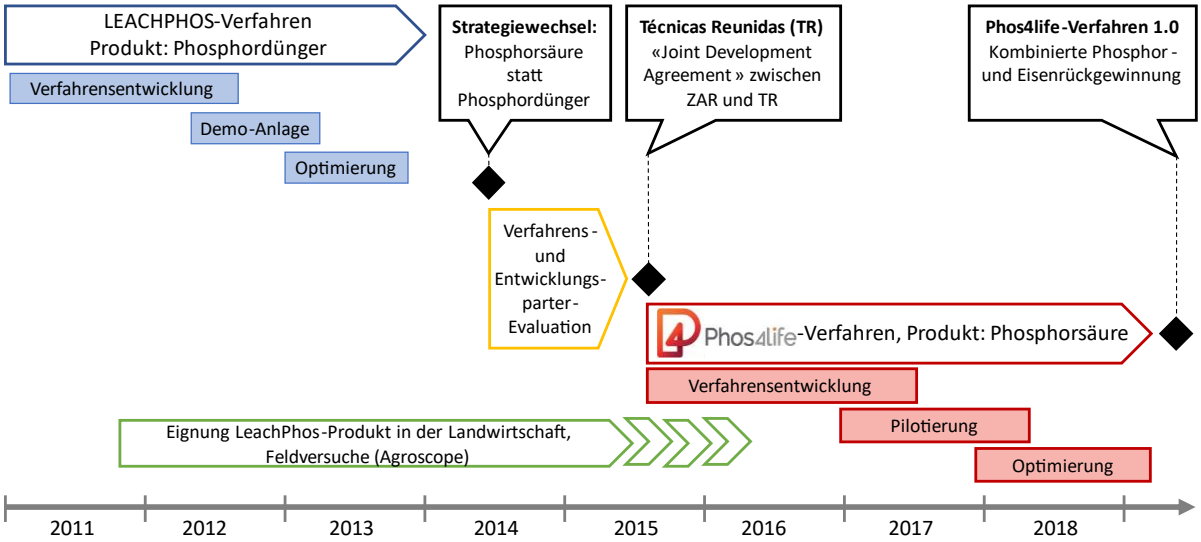


Abbildung 2-1: Entwicklung des Phosphor-Minings im Auftrag der Baudirektion des Kanton Zürichs

Ergänzende Dokumente zur Entwicklungszeit von 2011 bis 2013 sind den «Phosphor-Blättern» Nr. 1 – 3 zu sowie dem Businessplan 1.0 zu entnehmen. Diese Dokumente sind unter https://zar-ch.ch/zar/kompetenzenprojekte/phosphormining/ zu finden.

2.2 Verfahrensevaluation zur Phosphorsäureproduktion

Da es am Markt – Stand 2014 - keine erfolgreich umgesetzten und etablierten Verfahren zur Herstellung technisch reiner Phosphorsäure aus KSA gab, wurde die Stiftung ZAR von der Baudirektion des Kantons Zürich mit der Suche nach einem geeigneten Technologiepartner, mit dem die Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche möglich ist, beauftragt. Der entscheidende Schritt auf dem Weg zu einer qualitativ hochwertigen Phosphorsäure aus Klärschlammasche ist die effiziente Abtrennung der in der KSA enthaltenen Schwermetalle.

Dafür kommen prinzipiell Fällungsreaktionen, Membranverfahren oder ein Ionenaustauschprozess – als Festbrettreaktor oder als flüssig-flüssig-Reaktor, die sogenannten Solventextraktion, in Frage. In der primären Phosphorsäureproduktion wird die Solventextraktion weltweit bereits seit Jahrzehnten erfolgreich zur Reinigung und Aufbereitung roher – also verunreinigter – Phosphorsäure zur Herstellung qualitativ hochwertiger Phosphorsäuren (technische Qualität, Lebensmittelqualität etc.) eingesetzt und repräsentiert hier den Stand der Technik. Durch eigene industrielle Erfahrungen in der Schweiz beim Betrieb von Ionenaustauschverfahren – den klassischen Festbett-Ionenaustauschern und der Solventextraktion zeigte sich im Zusammenhang mit der Metallrückgewinnung aus Filteraschen der thermischen Abfallbehandlung die Leistungsfähigkeit und Stabilität der Solventextraktion gegenüber dem Festbett-Ionenaustauscher. Im Hinblick auf die Produktqualität und Quantität der rückgewinnbaren Wertstoffmenge war die Solventextraktion deutlich überlegen. Ein auf Festbett-Ionenaustauschern basierende Verfahren zur Zinksulfatproduktion der KVA Linth wurde 2008 eingestellt. Als Weiterentwicklung wurde 2013 das auf Solventextraktion basierende FLUREC-Verfahren bei der KEBAG in Zuchwil in Betrieb genommen. Jährlich werden seitdem zwischen 200-300 Tonnen *special high grade Zinc* mit einem Reinheitsgrad >99.995% Zink zurückgewonnen und als 100% «grünes» Zinkmetall verkauft.

Basierend auf den Erfahrungen der primären Phosphorsäureproduktion und den in der Schweiz vorhandenen Erkenntnissen aus der Metallrückgewinnung von Filteraschen wurde die Solventextraktion als geeignetes Verfahren zur Herstellung einer qualitativ hochwertigen Phosphorsäure aus

Klärschlammasche ausgewählt. Damit sollten die Zielvorgaben eines Prozesses, der einerseits eine konstant hohe Qualität und Produktausbeute gewährleistet, sowie anderseits eine hohe Verfügbarkeit und Verlässlichkeit aufweist, erfüllt werden können.

Die anschliessende Evaluation eines geeigneten Entwicklungspartners, der über grosstechnische Referenzen im Bau von Solventextraktionsanlagen im europäischen Umfeld verfügt, zeigte, dass dafür drei international renommierte Anlagenbauer bzw. Generalunternehmer in Frage kommen. Nach detaillierten Sondierungsgesprächen und Konzeptstudien wurde der spanische Generalunternehmer und Entwickler Técnicas Reunidas SA (TR) aus Madrid als geeigneten Partner, der sich zudem bereit erklärt hat, 40% der Entwicklungskosten zu übernehmen, ausgewählt. Die restlichen 60% der Entwicklungskosten wurden vom Kanton Zürich im Sinne einer Subvention übernommen. Als Gegenleistung stellt TR dafür der Stiftung ZAR – als derzeitige Vertreterin einer zukünftigen Schweizer Trägerschaft - eine oder mehrere Gratislizenzen zum Bau und Betrieb entsprechender P-Rückgewinnungsanlagen zur Verfügung. Ein entsprechender Zusammenarbeitsvertrag (Joint Development Agreement) wurde 2015 zwischen TR und ZAR unterzeichnet.

TR ist mit 6'500 Mitarbeitern seit 1960 erfolgreich im internationalen Anlagenbau tätig. Dabei wurden mehr als 1’0000 Anlagen in 50 Ländern realisiert. Solventextraktionsanlagen zur Zinkrückgewinnung wurden in Spanien, Portugal, Namibia, Japan, Italien und den USA in Betrieb genommen. Der jährliche Verkaufserlös von TR beträgt gut 4 Milliarden Euro. Mit einem eigenen Entwicklungszentrum – José Lladó Technology Centre - und gut 100 Mitarbeitern steht ein erfahrenes Team zur Verfahrensentwicklung zur Verfügung.

Abbildung 2-2: José Lladó Technology Centre, Técnicas Reunidas SA, Madrid, Spanien.

2.3 Verfahrensentwicklung und Pilotierung Phos4life

Técnicas Reunidas entwickelte gemeinsam mit der Stiftung ZAR von 2015 – 2017 das Phos4life-Verfahren. Eine eigene Pilotanlage (Abbildung 2-3) wurde im Madrider Technologiezentrum aufgebaut und anschliessend im 3-Schichtbetrieb mit Klärschlammasche aus dem Kanton Zürich in betrieben. In mehreren Kampagnen wurde das Verfahren in den Jahren 2017 – 2018 weiter optimiert. Das Verfahren – als Phos4life 1.0 bezeichnet (Abbildung 2-4) – bot neben der Phosphorrückgewinnung auch die Möglichkeit, das Fällmittel Eisenchlorid zum erneuten Einsatz in Kläranlagen zur chemischen

Phosphorelimination zurückzugewinnen. Die resultierende, technisch reine Phosphorsäure kann durch die hohe Reinheit sowohl in der chemisch-/technischen Industrie als auch in der Düngemittelproduktion hochwertiger Produkte eingesetzt werden.

Abbildung 2-3: Phos4life-Pilotierung, José Lladó Technology Centre, Madrid, Spanien.

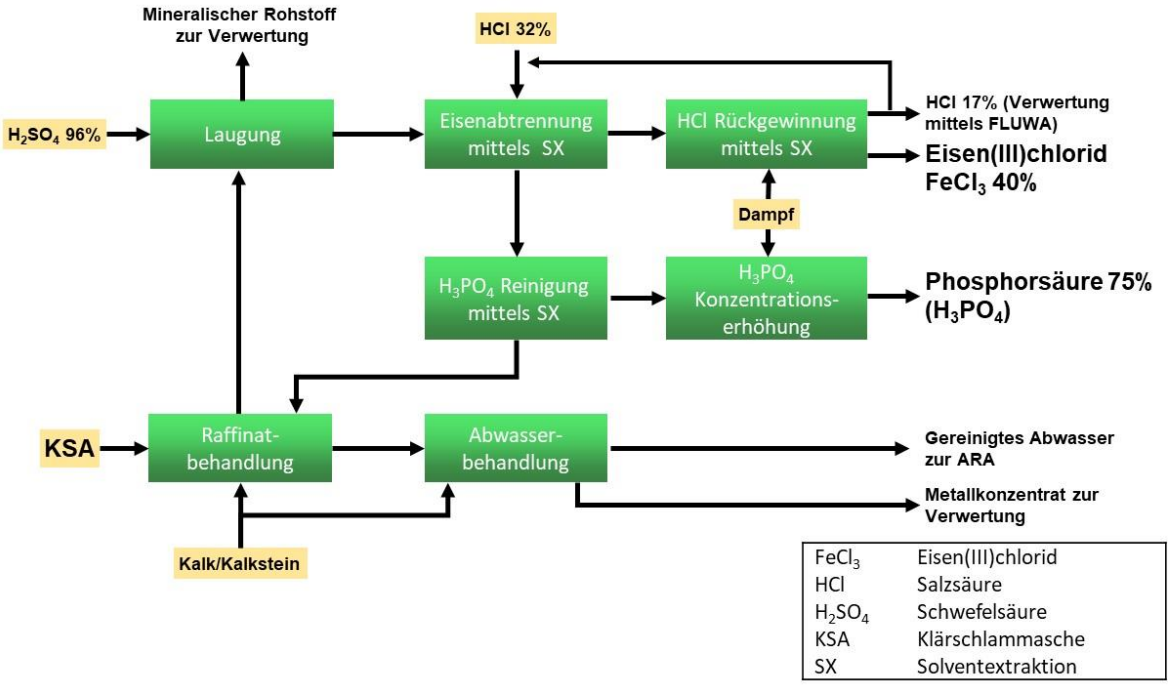


Abbildung 2-4: Verfahrenskonzept Phos4life 1.0 mit integrierter Eisenrückgewinnung.

Ein detaillierter Bericht zur Pilotierung sowie ein kurzer Film dazu sind hier zu finden: https://zar-ch.ch/zar/kompetenzenprojekte/phosphormining/.

2.4 Mögliche Phosphorrückgewinnung in der Schweiz

Für die Umsetzung der Phosphorrückgewinnungspflicht aus dem Klärschlamm (KS) bzw. der daraus resultierenden Klärschlammasche (KSA) wird in der Schweiz eine neue, zusätzliche Infrastruktur benötigt. Aus der Verfahrensevaluation hat sich klar herausgestellt, dass mit der Herstellung von sauberer Phosphorsäure aus Klärschlammasche das Ziel einer ökoeffizienten Phosphorrückgewinnung sehr gut erreicht werden kann. Da in der Schweiz etwa 90'000 Tonnen KSA anfallen würden – sofern aller heute vorhandener Klärschlamm (ca. 180'000 t/a trockener Klärschlamm) thermisch zu KSA umgesetzt wird – benötigt es für die entsprechende Phosphorrückgewinnung Anlagen mit grosser KSA-Kapazität, eine gute verkehrstechnische Erschliessung und Infrastruktur (Bahn, Logistikflächen etc.) sowie Platzreserven für den Bau und die Bewirtschaftung der Anlage. Die heute bekannten Verfahren zur Phosphorsäureherstellung sind technisch aufwändig und anspruchsvoll sowie auch sehr energieintensiv, da grosse Mengen Wasser zu Konzentrationserhöhungszwecken verdampft werden müssen, so dass für einen geeigneten Standort die Bereitstellung von erneuerbarer Energie-/Wärmequelle unabdingbar ist.

In der Schweiz gibt es nur eine sehr begrenzte Anzahl an potenziellen Standorten, die diese Rahmenbedingungen erfüllen. Einer davon ist der Emmenspitz in Zuchwil (SO). Die Machbarkeit des Phos4life-Verfahrens soll hier gezeigt werden.

2.5 Prüfung der Machbarkeit Phos4life am Standort Emmenspitz

Die Stiftung ZAR prüft im Auftrag[3] einer Trägerschaft von 8 kommunalen Abwasserreinigungs- bzw. Klärschlammmonoverbrennungsanlagen die Umsetzbarkeit des Phos4Life-Verfahrens am Standort Emmenspitz. Diese Trägerschaft repräsentiert eine heutige bzw. zukünftig KSA-Menge von etwa 40'000 t/a bzw. etwa der Hälfte der schweizweit anfallenden Klärschlammaschenmenge. Somit wird als Auslegungsgrösse für die geplante Phos4life-Anlage eine Kapazität von 40'000 t/a KSA angenommen.

Zur Ausführung der notwendigen Arbeiten beauftragte ZAR die Firma Ramboll zur bauherrenseitigen Projektleitungsunterstützung sowie die Fachplaner Fiedler Beck Ingenieure (Architektur, Hochbau), Ramboll (Elektrotechnik EMSRL), TBF Partner (Tiefbau, Logistik, Umweltverträglichkeit, Gebäudetechnik), Técnicas Reunidas SA (Kernprozess Verfahren) und VTU Schweiz (Nebenanlagen) zur Erarbeitung der notwendigen Konzepte Unterlagen. Das Organigramm ist nachfolgend dargestellt.

[3] Projektvereinbarung zwischen der Stiftung ZAR und den 8 Trägerschaften, Juli/August 2019

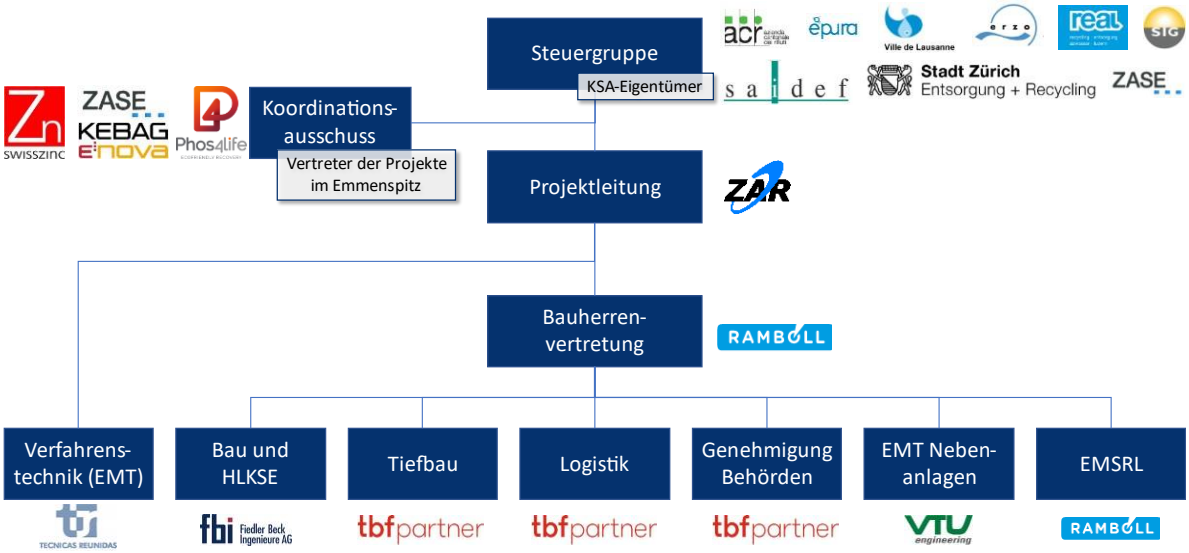


Abbildung 2-5: Organigramm für die Planungsphase 2021-2023

Um die Umsetzbarkeit des Phos4Life Projektes am Standort Emmenspitz beurteilen zu können, wurden im Rahmen der vorliegenden Studie unter anderem folgende Punkte geklärt:

- Erstellung eines abgestimmten Logistikkonzeptes vorzugsweise unter Nutzung des vorhandenen Bahnanschlusses
- Ermittlung der Platzverhältnisse, Gebäude und Layoutangaben
- Ermittlung aller notwendigen Anlagenteile zum Betrieb der Phos4life-Anlage. Dazu gehört die Bereitstellung von Betriebsmitteln, Lagerung und Abtransport von Produkten und Reststoffen, EMSR und Schnittstellen zu den anderen Anlagen. Wo möglich und sinnvoll machbar, soll die Integration in vorhandene Infrastrukturen geprüft werden.
- Prüfung der Bewilligungsfähigkeit
- Grundlagen zur Investitions- und Betriebskostenrechnung

Bei all diesen Punkten ist die Realisierung von erwarteten Synergien mit dem Betrieb des SwissZinc Verfahrens und der KEBAG Enova unbedingt anzustreben. In dieser Studie wurden jedoch keine dieser Synergien bei den CAPEX- und OPEX-Berechnungen berücksichtigt.

2.6 Aufgabenstellung und Ziele der Machbarkeitsüberprüfung

Die Ziele der Machbarkeitsüberprüfung sind:

1. Bewilligungsfähigkeit ist gegeben
2. Optimales Logistikkonzept für den Betrieb steht
3. Grund- und Prozessfliessbilder liegen vor
4. Gebäudemodell und Layoutangaben mit allen Haupt- und Nebenanlagen, Sozial- und Nebenräumen, Labor etc. erarbeitet
5. Ermittlung der zu erwartenden Investitions- und Betriebskosten (OPEX +/- 10%, CAPEX +/- 30%)

6. Evaluierung möglicher Synergiepotenziale
7. Risiken, respektive ‘Show-Stopper’ sind erkannt und bewertet.
8. Erste Schritte auf dem Weg zu einer Trägerschaft «Phos4life» sind eingeleitet.

Im hier vorliegenden technischen Statusbericht werden nachfolgend die wichtigsten Erkenntnisse des Projektes zusammengefasst. Der zeitliche Ablauf des Projektes, von der Optimierung des Phos4life-Verfahrens bis zur Prüfung der Umsetzbarkeit am Standort Emmenspitz ist in Abbildung dargestellt. Diese Etappen werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt. Ergänzende Unterlagen werden gegen Jahresende 2023 in einem Businessplan zusammengefasst.

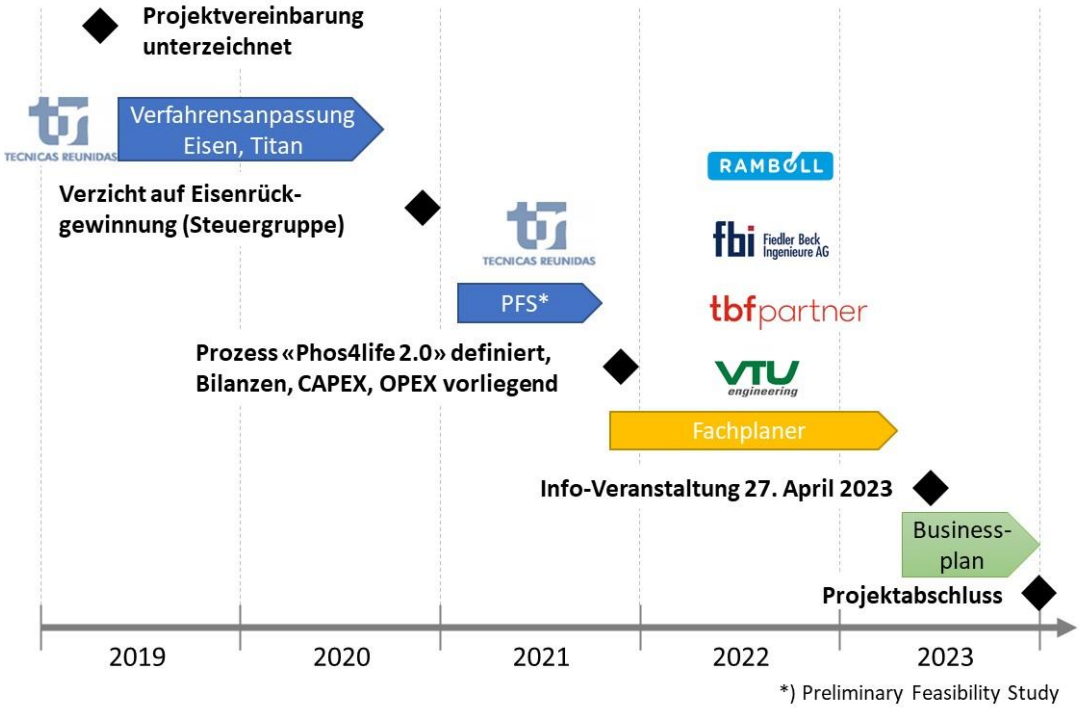


Abbildung 2-6 Zeitliche Projektabwicklung und wichtige Meilensteine

3. STANDORT EMMENSPITZ

Am Standort Emmenspitz ist erneuerbare Energie in Form von Strom, Dampf und Fernwärme durch die KEBAG Enova vorhanden. Eine gute Verkehrsanbindung sowie der vorhandene Bahnanschluss bieten gute und bei Bedarf auch ausbaufähige Logistikmöglichkeiten, bei denen allerdings die Abläufe mit den anderen Projekten auf dem Areal synchronisiert und beachtet werden müssen. Neben diesen «baulichen» Rahmenbedingungen verfügt das Betriebspersonal am Standort mit der FLUREC-Anlage, die auf einer analogen Technologie wie das Phos4life-Verfahren basiert, bereits über operative Erfahrungen, die zur Integration des Phos4life-Verfahrens entscheidend ist.

Heute befinden sich auf dem Areal «Emmenspitz» die in Abb. 3-1 dargestellten Betriebe der KEBAG und des ZASE. Der Neubau der KVA (KEBAG Enova) ist bereits im Gang und wird bis 2025 mit der Inbetriebnahme der neuen Anlage abgeschlossen. Die bauliche Umsetzung des Projektes SwissZinc wird voraussichtlich zwischen 2025 und 2028 stattfinden.

Das für die neue Phos4Life-Anlage auf dem Emmenspitz-Gelände zur Verfügung stehende Baufeld umfasst ca. 1’900m^2 und ist ca. 95m lang und 20m breit. Es liegt zwischen der bestehenden KVA, die nach Fertigstellung der KEBAG Enova rückgebaut wird und der ARA, die weiterhin in Betrieb bleibt. Auf dem Baufeld befinden sich jetzt noch die beiden Bestandsgebäude «FLUREC» und «Turbinengebäude TG2» mit integrierter Werkstatt. FLUREC und das Turbinengebäude können rückgebaut werden, für die Werkstatt muss dann allerdings eine Ersatzlösung (Neubau Werkstatt im Bereich KEBAG Enova) eingeplant werden. Zur Umsetzung des Phos4life-Verfahrens muss somit die KEBAG Enova in Betrieb sein, die «alte» KVA rückgebaut und die neue Werkstatt in Betrieb sein. Ein anderes Baufeld ist auf dem Standort Emmenspitz derzeit nicht verfügbar. Aus dieser Abhängigkeit vom laufenden KEBAG-Enova-Projekt und dem Rückbau der bestehenden Anlagenteile ist ein Baubeginn Phos4life vor 2027 nicht realisierbar.

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

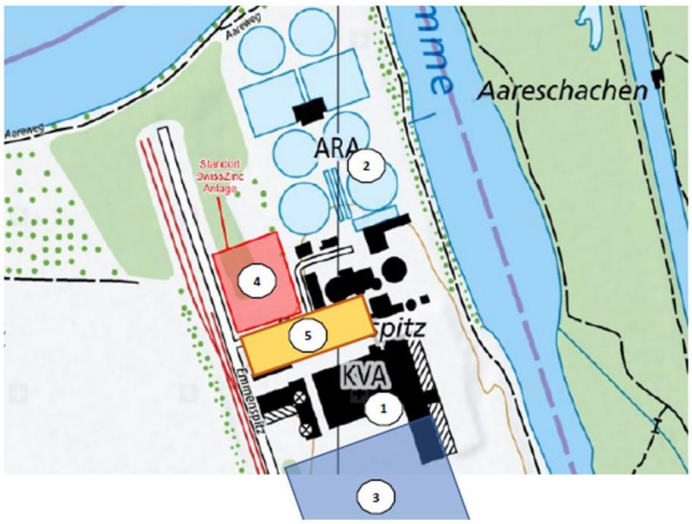


Abbildung 3-1: Arealübersicht mit den bestehenden Betrieben KEBAG und ZASE, dem Neubauprojekt KEBAG Enova und den beiden Projekten SwissZinc und Phos4life

4. PHOS4LIFE-ANLAGE

4.1 Phos4life Verfahren

Gegenüber dem in Kap. 2.3 dargestellten Phos4life-Verfahren wurden Anpassungen und Vereinfachungen vorgenommen. Titan, das als Titanoxid-Pigment in verschiedensten Produkten zum Einsatz kommt, gelangt auch in die Klärschlammasche (siehe Faktenblatt 01, Titan in der Klärschlammasche, 2020[4]). Beim Prozessschritt der integrierten Eisenrückgewinnung (Phos4life 1.0, vgl. Kap. 2.3) reichert sich Titan langsam in der organischen Phase der Eisen-Solventextraktion an. Eine aufwändige Reinigungsstufe wäre dafür notwendig (siehe Faktenblatt 02, Titan in der Klärschlammasche, 2021[4]), die mit sehr hohen Betriebsmittelkosten verbunden wäre (vgl. Anhang 01).

Das Phos4life 2.0-Verfahren zur Herstellung von technisch reiner Phosphorsäure aus Klärschlammasche (KSA) basiert neu auf einem dreistufigen Verfahren (Abbildung 4-1). Die KSA wird per LKW in einem Silowagen angeliefert und in entsprechende Silos entleert und von dort kontinuierlich dem Prozess zugeführt. In einer ersten Stufe wird der in der KSA enthaltene Phosphor mit Schwefelsäure extrahiert (Laugung) und als Rohphosphorsäure abgetrennt. Der mineralische Anteil der Klärschlammasche bleibt als Laugungsrückstand zurück, der im Wesentlichen aus Gips, Sand und Eisenoxid besteht und in Zementwerken stofflich verwertet oder in der Schweiz deponiert werden soll. In der zweiten Stufe erfolgt die Reinigung der zuvor gewonnenen Rohphosphorsäure. Da bei der Laugung neben Phosphor auch Schwermetalle in Lösung gehen, werden diese mittels Solventextraktion (SX) abgetrennt und als separater Rückstand (Konditionierung) einer stofflichen Verwertung bzw. Entsorgung zugeführt. In der dritten Stufe wird die Phosphorsäure mittels Verdampfung auf die Zielkonzentration von beispielsweise 75% aufkonzentriert und eine abschliessende Feinreinigung mittels Additiven (Natriumhydrogensulfid NaHS und Bariumcarbonat $BaCO_3$) erreicht.

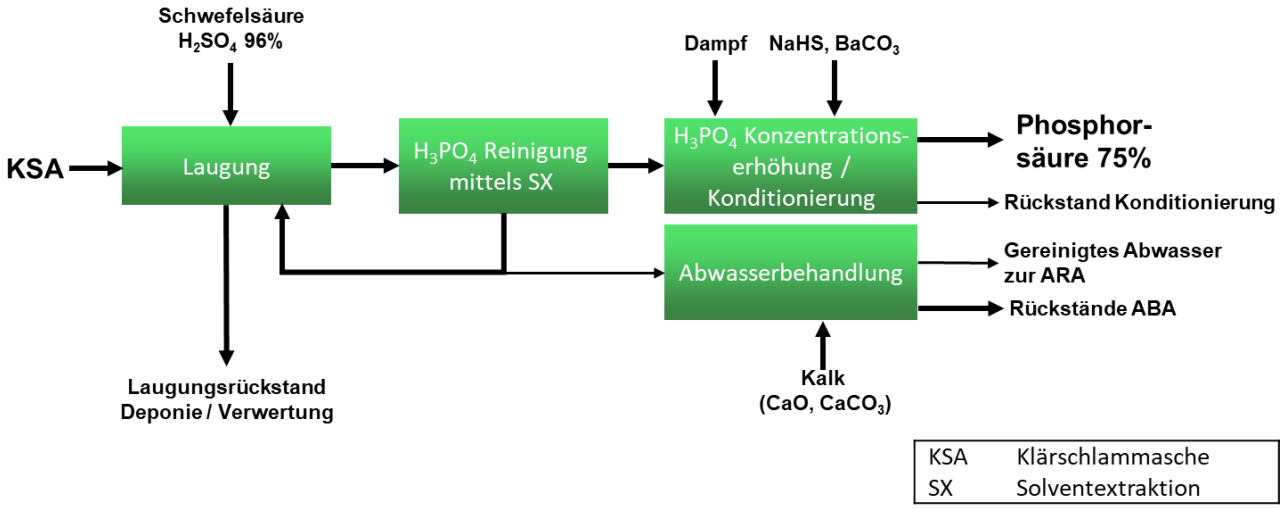


Abbildung 4-1: Prinzipschema des Phos4life 2.0-Prozesses

In diesem Projekt wurde eine durchschnittliche KSA-Zusammensetzung mit 9% Phosphor angenommen, die dem langjährigen durchschnittlichen P-Gehalt der KSA des Kantons Zürich entspricht, bzw. der KSA-Zusammensetzung, mit der die Verfahrensentwicklung in Spanien durchgeführt wurde. Der P-Gehalt der im Projekt beteiligten Anlagen mit bestehender Monoverbrennung liegt gewichtet bei

[4] Siehe https://zar-ch.ch/zar/kompetenzenprojekte/phosphormining/

8.3% Phosphor und demzufolge in einer ähnlichen Grössenordnung. Von dem in der Klärschlammasche enthaltenen Phosphor werden mit dem Phos4life-Verfahren >80% in die Phosphorsäure transferiert. Die in der Feinreinigung abgetrennten Verunreinigungen werden gemeinsam mit dem Konditionierungsrückstand verwertet bzw. deponiert. Die prozessinterne Abwasserbehandlungsanlage bereitet die internen Abwässer dahingehend auf, dass eine gewässerschutzkonforme Einleitung in die lokale ARA des ZASE erfolgen kann. Hierbei wird eine signifikante Menge Schwefelsäure aus der Phosphorsäure-Reinigung, die intern nicht weiter genutzt werden kann, mit Kalk ($CaCO_3$) neutralisiert. Dabei fällt eine signifikante Gipsmenge (ABA-Rückstand) an, die einer stofflichen Verwertung zugeführt werden soll. In Abbildung 4-2 sind die wichtigsten Stoffströme in einer Energie- und Massenbilanz angegeben. Hierfür wurde der Prozess in zwei funktionelle Einheiten «Phosphorsäureproduktion» und «Abwasserbehandlung» unterteilt. Letztere ist nur dann notwendig, sofern keine externe Nutzungsmöglichkeit der im internen Abwasserstrom enthaltenen Schwefelsäure möglich ist.

Die im Kondensat bzw. in den Brüden der beiden Verdampfer zur Phosphorsäure-Konzentrationserhöhung vorhandene Restwärme wurde in einer Wärmeoptimierung zur Bereitstellung der Wärme für den restlichen Prozess sowie die Gebäudetechnik genutzt (vgl. Anhang 3, Wärmekonzept). Ein Kondensat-Wärmeaustauscher ermöglicht die Wärmerückgewinnung zur Deckung des Hauptteils der Prozesswärme (1.6 MW). Zur Wärmerückgewinnung aus den Brüden werden drei Wärmeaustauscher benötigt, mit denen 1.7 MW für die Gebäudetechnik und 0.2 MW für die restliche Prozesstechnik genutzt werden können. Für die Nutzung der verbleibenden 4 MW der «Restkühlung» sollen in einer späteren Projektphase geeignete Lösung (z.B. thermische Trocknung der P4L-Rückstände, SwissZinc etc.) aufgezeigt und im Detail untersucht werden, wenn die Realisierung der entsprechenden anderen Projekte am Standort Emmenspitz gesichert ist. Durch das Konzept zur Wärmerückgewinnung konnte der thermische Bedarf um ca. 3.3 MW reduziert werden.

In einer nächsten Projektetappe sollen für diese anfallende Schwefelsäuremenge alternative Verwertungsmöglichkeiten – wie beispielsweise eine anteilige Verwertung via SwissZinc, «Wäsche» von Trockenschlackefraktionen, Abgabe an externe Verwerter - evaluiert werden. Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes ist der «worst-case» dargestellt, der einen autonomen P4L-Betrieb ermöglicht. Die gesamte Schwefelsäuremenge wird daher mit Kalk neutralisiert und der resultierende Gips verwertet bzw. entsorgt. Synergien mit SwissZinc, wodurch maximal 40% dieser Schwefelsäuremenge arealintern verwerten könnte, sind derzeit nicht mit eingerechnet. Dies sollte erst ab dem Zeitpunkt erfolgen, an dem die Realisierung des SwissZinc-Verfahrens sichergestellt ist. Das hier dargestellte Verfahrenskonzept stellt somit ein unabhängiges Referenzszenario dar, das im Sinne der Abwasserbehandlung machbar aber noch nicht optimiert ist und ein Einsparpotenzial aufweist.

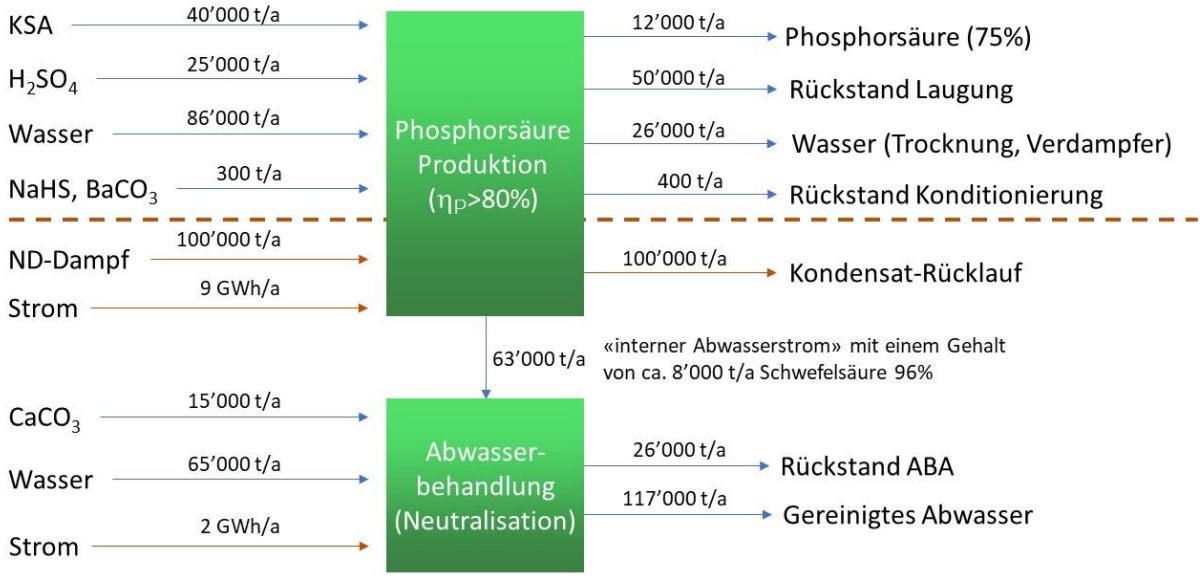


Abbildung 4-2: Massen- und Energiebilanz der Hauptströme des Phos4life-Verfahrens sowie der anschliessenden integrierten Abwasserbehandlung (Neutralisation der «Rest-Schwefelsäure»)

Die mit dem Phos4life-Verfahren gewonnene Phosphorsäure ist sehr sauber und erfüllt die Vorgaben für eine technisch reine Phosphorsäure (*technical grade acid*, TGA). In der nachfolgenden Tabelle ist die chemische Zusammensetzung der Phosphorsäure im Vergleich zum Ausgangsmaterial Klärschlammasche dargestellt.

Neben dem Phosphor könnte auch das Fällmittel «Eisenchlorid» aus der KSA zurückgewonnen werden, wie dies in einem ursprünglichen Verfahrenskonzept vorgesehen war. Dies bedingt aber eine deutlich grössere Anlage und wesentlich höhere Warenumschläge, für die der vorhandene Platz zum Bau und Betrieb nicht vorhanden sind. Daher wurde gemeinsam mit der P4L-Steuergruppe entschieden, diesen Prozess nicht weiter zu projektieren. Details dazu sind im Anhang 1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Chemische Zusammensetzung der Klärschlammasche (Edukt), der P4L-Phosphorsäure (Produkt) und einer handelsüblichen technischen Phosphorsäure (Budenheim Phosphorsäure, technical pure)

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

Das Phos4life-Verfahren soll für eine maximale Behandlungskapazität von 40'000 t/a KSA und einer jährlichen Verfügbarkeit von 7'500 h/a dimensioniert werden. Der Betrieb erfolgt während 24h pro Tag an 7 Tagen pro Woche (24/7) im Schichtbetrieb, der gemeinsam mit dem ebenfalls auf dem Areal befindlichen SwissZinc-Verfahren organisiert werden soll (vgl. Kap. 4.8, Betriebsmodell).

4.2 Nebenanlagen

Unter den Nebenanlagen werden diejenigen Anlagenteile zusammengefasst, die zur Bewirtschaftung des Phos4life-Verfahrens notwendig sind. Zur Dimensionierung der Nebenanalgen wurde die Anlagenbetriebsdauer von 7'500 Stunden pro Jahr sowie ein autonomer Betrieb ohne Wareneinausgang zwischen 5-10 Tagen angenommen. Unter den Nebenanlagen werden folgende Anlagenteile zusammengefasst:

- 4 Aschesilos à 375 m^3 zur Annahme der Klärschlammasche,
- Bunkerkompartimente à 1'000m^3 und 2'000m^3 mit einer Lagerkapazität von 5 Tagen für die Lagerung und den Abtransport der Rückstandsmengen,
- Containerstellplatz für die Lagerung und den Abtransport des Konditionierungsrückstandes,
- Chemikalienlager mit den entsprechenden Befüll- und Dosiersystemen für die eingesetzten Betriebsmittel (u.a. 2 Kalksilos à 160m^3, 2 Schwefelsäuretanks à 216m^3, 3 Phosphorsäuretanks à 94m^3),
- Bereitstellung von Druckluft,
- Bereitstellung von Wasser in geeigneten Qualitäten (enthärtetes und vollentsalztes Wasser),
- Abwasserbehandlung
- Lagerflächen für Kleingebinde, BigBags und IBC-Container sowie
- prozesstechnischen Abluftanlagen.

Beim Chemikalienlager wurde besonderes Augenmerk auf die Substitution der von TR vorgeschlagenen Chemikalie Schwefelwasserstoff (H_2S) zur Feinreinigung der Phosphorsäure gelegt, welche ein hohes Risiko für das Handling mit Transport, Lagerung und Einsatz im Prozess darstellt. Im Verlauf der Bearbeitung konnte diese Chemikalie durch das wesentlich einfacher zu handhabende Natriumhydrogensulfid (NaHS) subsituiert werden und die damit verbundenen Risiken minimiert werden (vgl. Risikobewertung).

4.3 Logistikkonzept

Als Grundlage für das Logistikkonzept dient die in Tabelle 4-2 abgebildete Materialflussliste mit den relevanten Massenströmen. Mit dem Phos4life-Verfahren werden insgesamt ca. 85'000 Tonnen Material pro Jahr angeliefert und 90'000 Tonne pro Jahr abtransportiert. Der Materialumschlag beträgt somit 175'000 Tonnen pro Jahr. Hierbei dominieren die Klärschlammasche, die Schwefelsäure und der Laugungsrückstand beim Prozessschritt der Phosphorsäureproduktion, der Kalkeinsatz und die resultierende Gipsfracht im ABA-Rückstand beim Prozessschritt der Abwasserbehandlung.

Tabelle 4-2: Warenfluss P4L via Strasse und Bahn

Bezeichnung	Verbrauch [t/a]	Transport-mittel	Anzahl Gebinde Pro Jahr	Anzahl Gebinde Pro Tag
Input				
Klärschlammasche (KSA)	40’000	LKW	1667	7
Schwefelsäure 96%	25’000	Bahn	417	2
Kalk (CaCO3)	15’000	LKW	625	3
Natronlauge 50%	2’000	LKW	84	<1
Branntkalk (CaO)	600	LKW	25	<1
NaCl Sole 30%	560	LKW	24	<1
NaHS-Lösung	290	LKW	12	<1
Salzsäure 32%	250	LKW	11	<1
Diverse Kleinmengen (Komplexbildner, Bariumcarbonat, Aktivkohle etc.)	< 200	LKW		<1
Output				
Phosphorsäure 75%	12’000	Bahn/LKW	200/500	1/2
Laugungsrückstand, 90% TS	50’000	Bahn	3846	15
Rückstand Konditionierung 70% TS	400	LKW	31	<1
Rückstand Abwasserbehandlung, 90% TS	26’000	Bahn	2000	8

Basierend auf diesem Mengengerüst wurden die Logistikwege für LKW- und Bahnlieferung geprüft. Für den Chemieumschlag muss ein zusätzliches Bahngleis westlich des geplanten SwissZinc-Standortes zur Anbindung des Phos4life-Prozesses integriert werden. Die Anbindung zum Phos4life-Bau erfolgt über eine Chemikalienpumpstation. Der Umschlag der festen Rückstände per Bahn erfolgt über das bestehende Gleis und wird gemeinsam mit KEBAG Enova und SwissZinc genutzt. Der LKW-Umschlag ist exemplarisch in Abbildung 4-3 für die Anlieferung der Klärschlammasche und Kalk dargestellt. Im Anhang 2 ist die Situation für die übrigen An- und Ablieferwege abgebildet. Zur Wägung der Ein- und Ausgangsstoffströme werden die Waagen, welche im Zuge des KEBAG Enova Projektes realisiert werden, mitgenutzt. Es konnte somit für alle Materialumschläge ein funktionierendes System ausgearbeitet und das bestehende Logistikkonzept integriert werden.

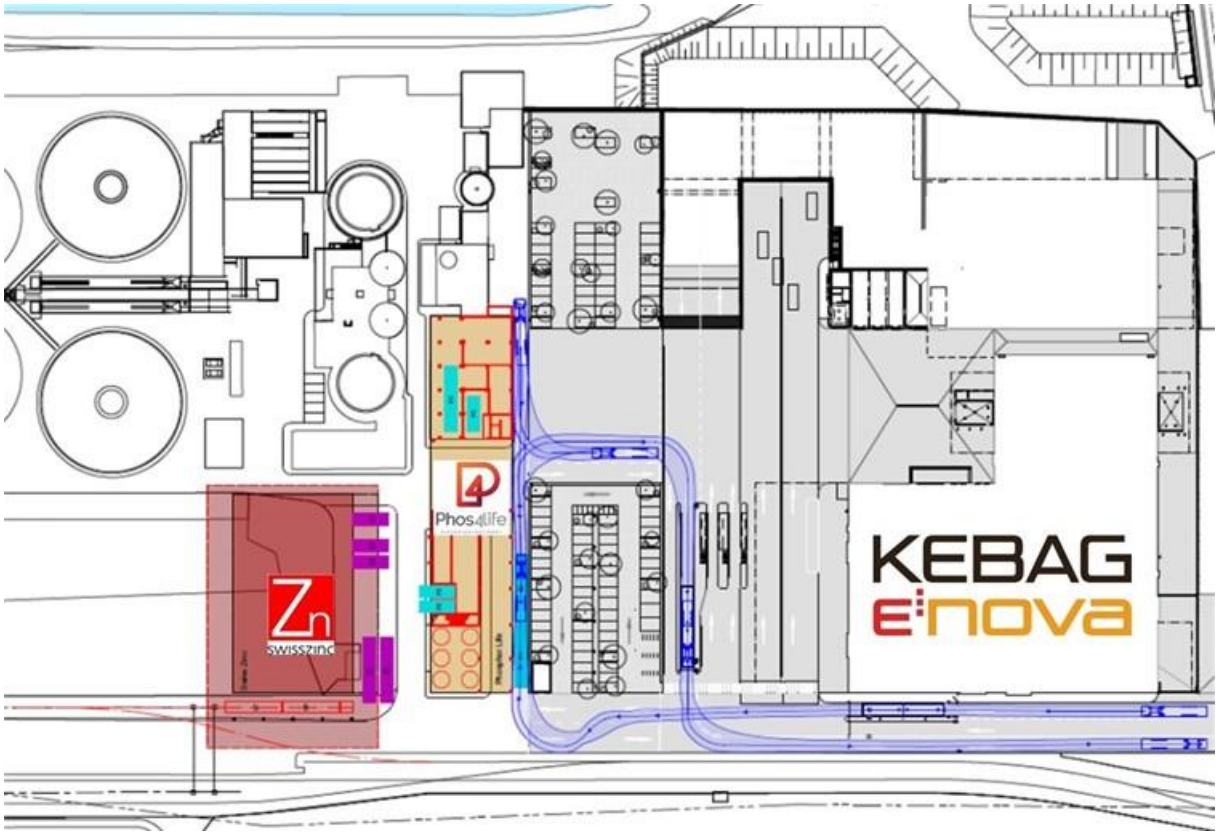


Abbildung 4-3 Anliefersituation der Klärschlammasche und des Kalks via LKW-Silowagen

4.4 Elektro- und Leittechnik

Die Elektro- und Leittechnik gliedert sich in das bestehende Konzept am Standort ein (Basis KEBAG Enova). Das Gebäude wird mittelspannungsseitig aus dem vorhandenen Ring auf dem Areal versorgt. Im P4L-Bau sind zwei separate Trafozellen sowie die Niederspannungs-Hauptverteilung. Das Leitsystem wird analog zum Leitsystem der KEBAG-Enova ausgeführt, um die Synergien bezüglich Betrieb, Instandhaltung und Ersatzteilhaltung optimal nutzen zu können (vgl. Kap. 4.8).

Für die elektrische Versorgung erfolgt über die KEBAG Enova, dafür ist eine Anschlussleistung von ca. 3'000 kVA notwendig. Im gesamten Prozess werden ca. 600 Instrumente, 300 E-Verbraucher und 1'300 Signale angeschlossen und verarbeitet werden.

4.5 Energetische Einbindung und Optimierung

Neben der zuvor erwähnten elektrischen Anbindung wird für den Betrieb der Phos4life-Analge vor allem Energie zur Verdampfung und Konzentrationserhöhung der Phosphorsäure sowie Kühlleistung benötigt. Dafür wurde ein optimiertes Wärme-/Kältekonzept ausgearbeitet, das eine optimale Integration am Standort ermöglicht und auf folgendem Grundsatz basiert:

- Die Wärmeversorgung erfolgt mit Dampf aus der KEBAG Enova,
- Die Kühlung wird primär durch Aarewasser realisiert,
- Kühlung mit Hybrid-Kühlern, wenn aus behördlichen Vorgaben das Aarewasser nicht verwendet werden kann (Temperatur der Aare >25°C).

Der Wärmebedarf der Phos4life-Anlage beträgt etwa 11.5 MW. Davon entfallen 8.2 MW auf die Verdampfung von Wasser zur Konzentrationserhöhung der Phosphorsäure, 1.6 MW auf die

restliche Verfahrenstechnik und 1.7 MW auf die Gebäudetechnik. Durch das ausgearbeitete optimierte Wärmerückgewinnungskonzept (Schema siehe Anhang 3) konnte der gesamte Wärmebedarf auf 8.5 MW reduziert werden (benötigte Verdampfungswärme). Der Wärmebedarf der restlichen Verfahrenstechnik sowie der Gebäudetechnik konnte durch die Rückkühlung der Brüden aus den Verdampfern rückgewonnen werden. Das dabei anfallende Kondensat wird prozessintern wiederverwendet und reduziert den Wasserverbrauch der Anlage.

In Abbildung 4-4 ist der durchschnittliche und maximale Temperaturgang der Aare gezeigt. Für den Standort Emmenspitz gilt die Vorgabe des Kantons Solothurn, dass bei einer Aaretemperatur von mehr als 25°C die Temperatur der Aare nur um 0.01°C erhöht werden darf. Diese Temperaturerhöhung wird allerdings durch die KEBAG-Enova bereits vollständig ausgeschöpft.

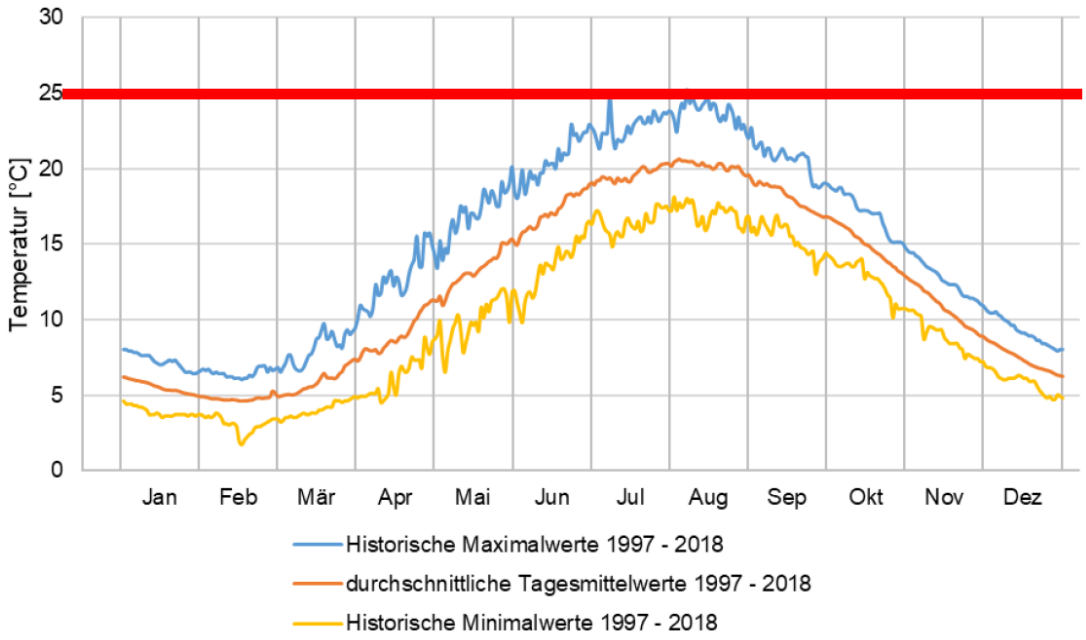


Abbildung 4-4 Historischer Temperaturverlauf der Aare

Die Tage, an denen die Aare eine Temperatur >25°C aufweist, waren in der Vergangenheit sehr selten bzw. sind insbesondere seit der Stilllegung des Kernkraftwerkes Mühleberg gar nicht mehr aufgetreten. Damit die erforderliche Kühlleistung im Zuge der Klimaerwärmung und zunehmender Trockenheit wird allerdings davon ausgegangen, dass es längere Phasen geben wird, in denen die Aare wärmer als 25°C ist und Phos4life somit ein alternatives Kühlkonzept mit 7 hybriden Rückkühlern à 1MW Leistung anwenden muss. Proaktiv wird dies bei den Investitionskosten (CAPEX) bereits berücksichtigt, beim operativen Aufwand (OPEX) hingegen nicht, da nicht relevant.

4.6 Gebäudekonzept und Integration

Der notwendige Flächen-/Raumbedarf für den Hauptprozess, Nebenanlagen, Gebäude- und Elektrotechnik sowie von Sozial- und Betriebsräumen wurde ermittelt und daraus das Gebäudekonzept abgeleitet. Es wurde überprüft, ob und welche Teile der beiden Bestandsgebäude «FLUREC» und «Turbinengebäude TG2» erhalten bzw. weitergenutzt werden können.

Das bestehende Turbinengebäude, welches aus einer Kombination von Stahlbeton und Stahlleichtbau besteht, ist aufgrund des grossen Stahlleichtbau-Anteils zur Unterbringung der Phos4life-

Anlagenkomponenten nicht geeignet und soll daher komplett rückgebaut werden. An dieser Stelle wird der Phos4Life-Neubau errichtet.

Bei dem bestehenden FLUREC-Gebäude handelt es sich um einen Massivbau, welcher aufgrund der bisherigen Nutzung bereits auf den Umschlag und die Lagerung von Chemikalien eingerichtet ist. Dieses Gebäude kann für das Phos4Life-Verfahren weiter genutzt werden und soll grösstenteils erhalten bleiben bzw. in das neue Phos4Life-Gebäude eingebunden werden.

4.6.1 Phos4Life-Gebäude

Die Phos4Life-Anlage mit einer Grundfläche von etwa 1'900m^2 verfügt über ein Kellergeschoss, ein Erdgeschoss, fünf Obergeschosse und erreicht eine maximale Höhe von ca. 30 Metern. Der umbaute Raum beträgt 57'800m^3. Das FLUREC-Gebäude bleibt grösstenteils erhalten. Es wird ab dem 1. OG an der westlichen Seite mit dem Neubau verbunden und mit einem zusätzlichen obersten Stockwerk erweitert.

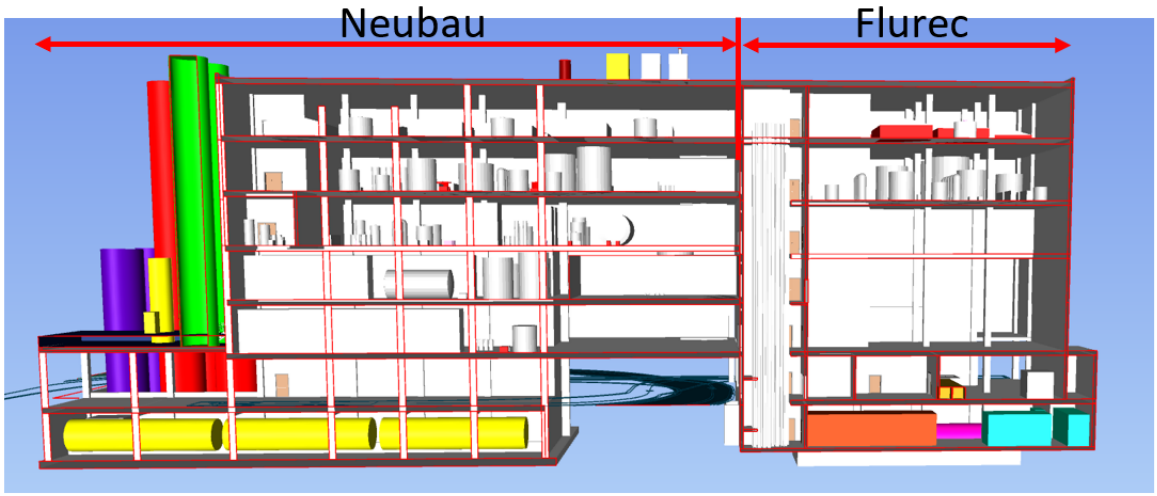


Abbildung 4-5 Schnitt (West-Ost-Richtung) durch das Gesamtgebäude. Im westlichen Aussenbereich sind die Silos für Klärschlammasche (rot), Kalk (violett) sowie die Lagertanks für Schwefelsäure (grün) aufgestellt. Der Durchfahrtsbereich zwischen dem «Neubau» und dem «FLUREC-Bau» ermöglicht die Bewirtschaftung mit Betriebsmitteln und die Erschliessung der SwissZinc-Anlage sowie der Kläranlage ZASE.

Alle Ebenen innerhalb des Gebäudes werden durch das bestehende Treppenhaus und den Aufzug im FLUREC-Gebäude bzw. durch das neue Treppenhaus und den neuen Aufzug im Neubau erschlossen. Die Dachebene wird durch die beiden Treppenhäuser erschlossen. Im Kellergeschoss und im EG besteht die Anlage aus zwei Gebäudeteilen - FLUREC und Neubau - die nicht miteinander verbunden sind. Ab dem 1. OG (Ebene +4.90m) sind die beiden Gebäude verbunden.

Aufgrund der Anforderungen der Areallogistik wurde auf der Südseite des Phos4Life-Neubaus im EG eine Durchfahrt von 8m Breite angeordnet, die entlang des Neubaus bzw. zwischen den Gebäudeteilen durchführt. Damit ist der Verkehrsfluss zur ARA sowie zu der geplanten SwissZinc-Anlage und dem gemeinsamen Chemieumschlagsplatz gewährleistet.

Die notwendigen Sozialräume werden im Neubau ab dem 3. OG (Ebene +14.70m) in ein 3-stöckiges, auskragendes Gebäudeteil angeordnet, in welchem sich Garderoben, Sanitäranlagen, Labor, Archiv sowie Büros, Aufenthaltsraum mit Cafeteria und Sitzungsräume befinden. Dieser Gebäudeteil kragt mit einer Länge von 28.5m um 6m nach Norden über den Hofbereich zur SwissZinc-Anlage aus.

Insgesamt stehen in dem geplanten Phos4Life-Gebäude ca. 9’500m^2 Aufstellungsfläche zur Verfügung. Gemäss der aktuellen Planung sind davon ca. 8’000m^2 bzw. 84% der Flächen belegt. Die freien Flächen befinden sich mehrheitlich im FLUREC-Gebäude und dienen als Projektreserve.

4.6.2 Baugrund

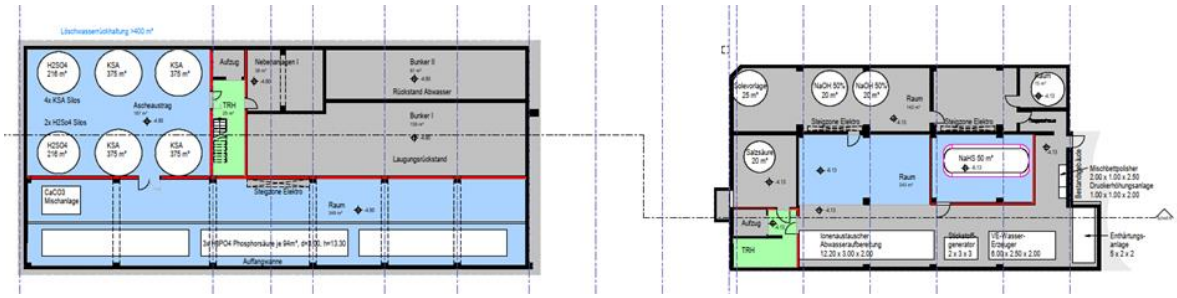
Aufgrund der Erkenntnisse aus den laufenden Bauarbeiten der KEBAG Enova sowie aus den damit zusammenhängenden Baugrunduntersuchungen geht man davon aus, dass für den Phos4Life-Neubau eine Tiefgründung notwendig ist. Es wird ein möglichst erschütterungsarmes Gründungsverfahren mit Bohrpfählen empfohlen.

Zudem soll in dem Bereich, wo das FLUREC-Gebäude in den Neubau integriert wird, für die Gründung der dort angeordneten Stützen in Kellertiefe ein Streifenfundament erstellt werden, welches ebenfalls auf Bohrpfählen abgesetzt wird.

4.6.3 Bereiche / Räume und Funktionen

Nachfolgend werden die Nutzungen der einzelnen Räume, unterteilt in die beiden Gebäudebereiche «FLUREC» und «Neubau Phos4life» schematisch beschrieben.

4.6.3.1 UG, Ebene -4.90



FLUREC

Der Kellerbereich des FLUREC-Gebäudes ist bereits für die Lagerung von Chemikalien eingerichtet und kann für Phos4Life so übernommen werden. Im nördlichen Bereich werden bestehende Tanks zur Lagerung der Solevorlage (25m^3) sowie von NaOH 50% (2x 20m^3) genutzt. Auch die beiden Spezialräume für Salzsäure (20m^3) und NaHS (50m3) können) übernommen bzw. umgenutzt werden.

Des Weiteren sollen hier die Komponenten der Wasseraufbereitung angeordnet werden.

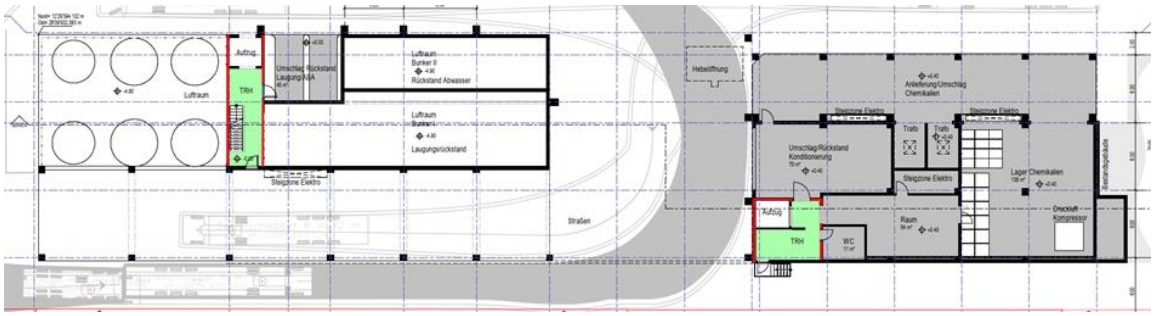
Zudem soll der Bereich der Vertiefung in der Mitte bei einem schweren Brandfall als Löschwasserrückhaltung dienen (blaue Markierung, ca. 200m^3).

Neubau

Auf der Nordseite befindet sich die Sohle der beiden Bunker, die der Lagerung der Rückstände aus der Laugung und der Abwasserbehandlung (ABA) dienen. Die Bunker wurde auf Basis einer Lagerkapazität von 5 Tagen ausgelegt und erstrecken sich bis auf die Höhe des 3. OG.

Im Aussenbereich ist auf der Westseite die Sohle der Lager-Silos für die angelieferte Klärschlammasche (4 Silos) und für die Schwefelsäure (2 Tanks). Zur Lagerung von Phosphorsäure wurde auf der Südseite ein Keller angeordnet, in welchem die drei Lagertanks liegend untergebracht werden können. Zudem wurde hier auch die $CaCO_3$-Mischanlage platziert.

4.6.3.2 EG, Ebene +/-0.00m



FLUREC

Auch der Bereich im EG kann für Phos4Life so übernommen werden. Sowohl der überdachte Anlieferbereich auf der Nordseite als auch die Verladehalle können weiterhin genutzt werden. In den hier zur Verfügung stehenden Räumen sollen die beiden Trafos (siehe dazu Kapitel 3.1) sowie die Lagerfläche für die Betriebsmittel in IBC oder Spundfässern (flüssige Stoffe) und Big Bags (Feststoffe)angeordnet werden. Zudem wird hier der Druckluft-Erzeugung untergebracht.

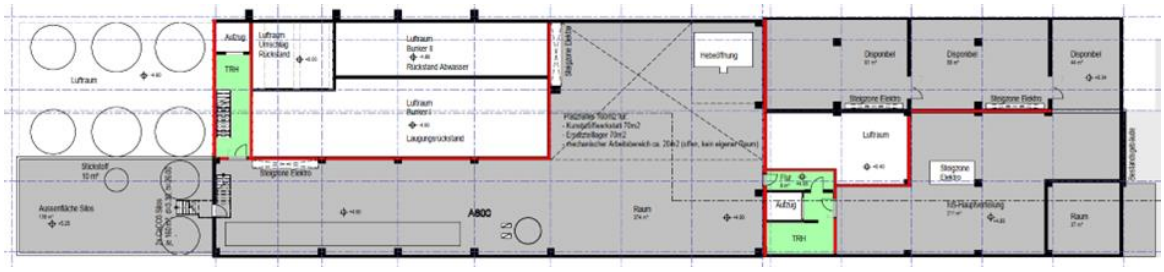
Neubau

Auf der Nordseite sind die beiden Rückstand-Verladestellen angeordnet, welche auch als Greiferabstellplatz zu Revisionszwecken der Krananlage dienen. Die Rückstände werden aus dem Bunker mit einem Kran in ACTS-Container abgefüllt, die anschliessend von einem LKW mit einem Kettengerät abgeholt und auf die Bahn verladen werden.

Auf der Südseite der Anlage befindet sich der Haupteingang und der Zugang zu Treppenhaus und Aufzug. Der Aufzug hat auf dieser Etage eine Doppellade-Funktion, sodass er von beiden Seiten benützt und be-/entladen werden kann.

Zwischen den beiden Gebäuden wird eine frei befahrbare Durchfahrt ausgebildet, die eine Ab-/Ablieferung von Betriebsmitteln und die Erschliessung der beiden Anlagen ZASE (Kläranlage) und SwissZinc ermöglicht.

4.6.3.3 1. OG, Ebene +4.90m



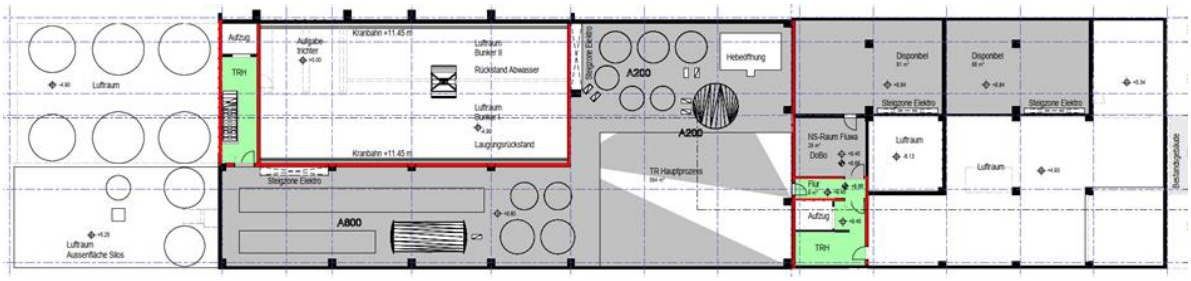
FLUREC

Diese Ebene bietet genügend Platz, um die NS-Hauptverteilung der neuen Phos4Life-Anlage unterzubringen. Zudem stehen hier noch freie Flächen/Räume («Disponibel») von ca. 260m2 zur Verfügung, deren Nutzung in einer späteren Projektphase definiert werden soll.

Neubau

Hier soll ein Ersatzteillager, eine Kunststoffwerkstatt sowie ein offener mechanischer Arbeitsbereich als lokaler Werkstattbereich eingerichtet werden Die restliche Innenfläche steht der Anordnung der Haupt-Verfahrenstechnik-Komponenten von Técnicas Reunidas zur Verfügung.

4.6.3.4 2. OG, Ebene +9.40m



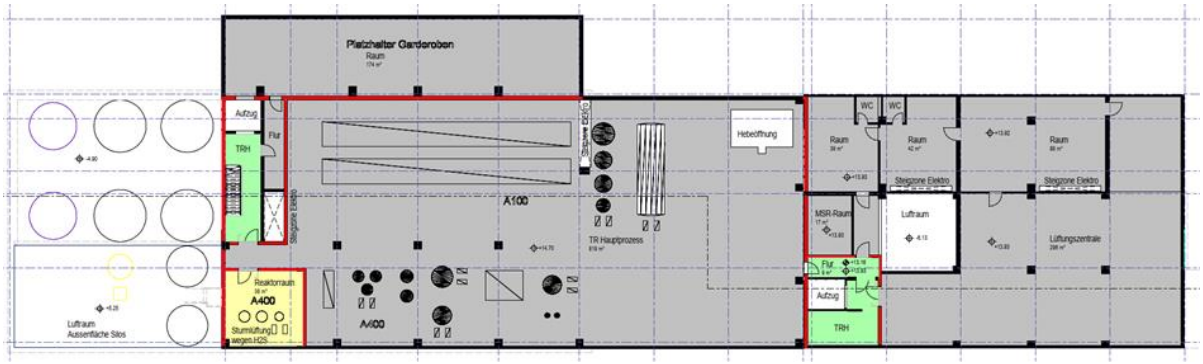
FLUREC

Der bestehende «NS-Raum Fluwa» soll als Rohbau erhalten bleiben und der Unterbringung von Schaltanlagen dienen. Zudem stehen hier noch freie Flächen/Räume von ca. 180m^2 zur Verfügung. Der Bereich kann entsprechend den neuen Anforderungen umgebaut und einer weiteren Nutzung zugeführt werden.

Neubau

Hier steht die gesamte Fläche für die Anordnung der Haupt-Verfahrenstechnik-Komponenten von Técnicas Reunidas zur Verfügung.

4.6.3.5 3. OG, Ebene +14.70m



FLUREC

Der bestehende MSR-Raum (mit Doppelboden), der Kommandoraum und das Labor einschliesslich der WCs können weiterhin für Phos4Life genutzt werden. Auf dieser Ebene steht ausreichend Platz zur Verfügung, um die neue Lüftungszentrale der Phos4Life-Anlage unterzubringen.

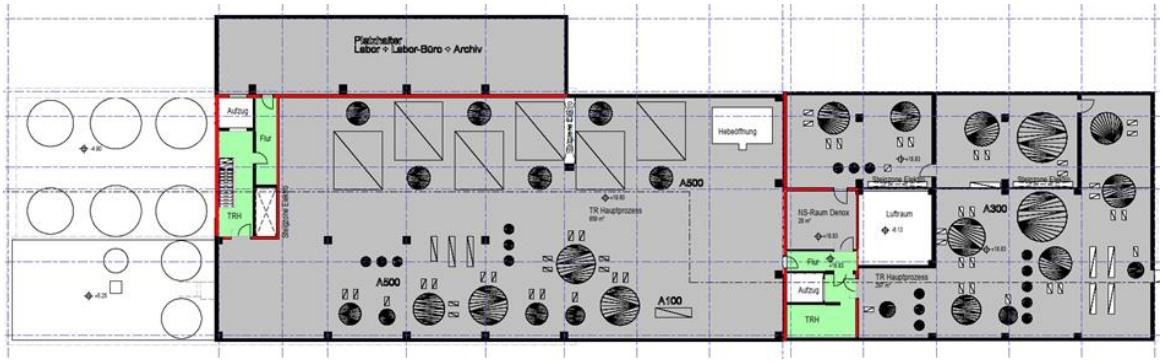
Neubau

Die gesamte Fläche im Anlagenbereich steht der Anordnung der Haupt-Verfahrenstechnik-Komponenten von Técnicas Reunidas zur Verfügung. U.a. befindet sich hier auch der «Reaktorraum», .in dem die Reaktoren zur in-situ-Herstellung von Schwefelwasserstoff und dessen Einsatz

untergebracht werden. Dieser ist gasdicht zu gestalten und benötigt eine Sturmlüftung und entsprechende Sicherheitsausrüstung.

Zudem gibt es hier einen Zugang zur «Auskragung Nord», in welchem sich auf dieser Etage die Garderoben einschl. Duschen und WCs befinden. Die Größe der Garderoben wird auf 15 Mitarbeiter, welche maximal gleichzeitig vor Ort sein werden, ausgelegt.

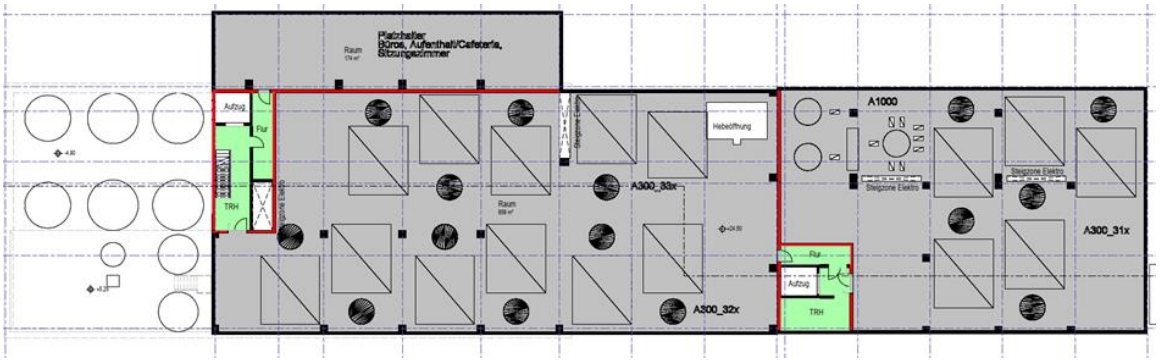
4.6.3.6 4. OG, Ebene +19.60m



FLUREC und Neubau

Der bestehende NS-Raum Denox (mit Doppelboden) kann als Rohbau erhalten bleiben. Die restliche Fläche dient der Anordnung der Haupt-Verfahrenstechnik-Komponenten von TR und muss entsprechend den neuen Anforderungen umgebaut werden. Zudem wird in der «Auskragung Nord» ein Büro und Lagerräume untergebracht.

4.6.3.7 5.OG, Ebene +24.50m



FLUREC und Neubau

Die gesamte Fläche dieses neuen Geschosses steht für die Anordnung der Haupt-Verfahrenstechnik-Komponenten von TR zur Verfügung. Zudem wird in der «Auskragung Nord» der Aufenthaltsraum mit Cafeteria sowie die Sitzungsräume realisiert.

4.6.4 Baustelleninfrastruktur und Montageflächen

Für die Baustelleneinrichtung und Installationsfläche wird ein Bereich von mind. 1'500m^2 benötigt. Nach dem Rückbau der bestehenden KVA steht an deren Stelle eine temporäre Fläche für das Phos4life-Bauvorhaben zur Verfügung.

Abbildung 4-6 Vorgesehene Installationsflächen Phos4life und SwissZinc

4.7 Genehmigungs- und umweltrechtliche Aspekte

Phos4life unterliegt aufgrund der dem Gefahrenpotential der Lagermengen der Störfallverordnung. Der Standort Emmenspitz mit der KEBAG Enova und SwissZinc verfügt über Knowhow und Praxis mit diesen Risiken umzugehen. Positiv wirkt sich aus, dass der Standort ausserhalb des Siedlungsgebiets liegt und keine publikumsintensiven Veranstaltungen in diesem Raum durchgeführt werden.

Die vorliegende Studie zeigt, dass das Phos4life-Verfahren am Standort Emmenspitz zonenkonform realisiert werden kann. Mit dem Projekt können die vorgegeben Mantellinien gemäss den Sonderbauvorschriften des Gestaltungsplans Emmenspitz eingehalten werden.

Gemäss heutigem Projektstand werden keine Anpassung des Zonen- und Gestaltungplans für die Realisierung von Phos4life benötigt. Die raumplanerischen Rahmenbedingungen können eingehalten werden.

Die Voruntersuchung zur Umweltverträglichkeit (UVB-VU) wurde erfolgreich abgeschlossen. Gemäss heutigem Kenntnisstand werden die massgeblichen Umweltvorschriften eingehalten. Dies wird in einer ersten Einschätzung des Kantons Solothurn vom 29.11.22 bestätigt.

Im Rahmen der nächsten Projektetappe soll die detaillierte Hauptuntersuchung erstellt werden und die offenen Punkte geklärt werden.

4.8 Betriebsmodell

Das zu wählende Betriebsmodell für eine Phos4life-Anlage am Standort Emmenspitz wird zukünftig von der «Trägerschaft Phos4life» und mit den am Standort ansässigen bzw. in Planung befindlichen Anlagen (KEBAG Enova, SwissZinc) abgestimmt werden müssen. Ein autarker Betrieb mit komplett eigenem Personalbestand P4L wäre sehr personal- und kostenintensiv (ca. 30 Vollzeitstellen). Synergien zwischen den Projekten SwissZinc und Phos4life, die beide auf einer ähnlichen Technologie aufbauen, sowie der KEBAG Enova würden somit nicht genutzt.

Da zum derzeitigen Planungsstand die Umsetzung von SwissZinc am Standort Emmenspitz noch nicht beschlossen ist, können hier nur Annahmen für mögliche Betriebsmodelle getroffen werden. Dabei kommen grundsätzlich mehrere verschiedene Varianten in Frage, von denen nachfolgend exemplarisch zwei Möglichkeiten aufgezeigt werden:

a) SwissZinc wird am Standort Emmenspitz realisiert. Zusammen mit Phos4life wird ein eigenes, von KEBAG weitestehend unabhängiges Betriebsteam aufgebaut, das beide Anlagen sowie das zentrale Labor betreibt. Lediglich übergeordnete Bereiche werden zentral von KEBAG Enova organisiert (z.B. mechanischer und elektrischer Unterhalt), P4L stellt dafür 300 Stellenprozent zur Verfügung. Der P4L-Personalaufwand dieser Variante beträgt ca. 18 Vollzeitstellen. Die Personalbedarf von P4L und SwissZinc zusammen beträgt ca. 40 Personen.

b) SwissZinc wird nicht am Standort Emmenspitz realisiert. Phos4life kann weitestgehend durch KEBAG-Personal betrieben werden. Phos4life stellt einen Betriebsleiter (100%) und das Laborpersonal (300%) zur Verfügung. Darüber hinaus übernimmt Phos4life die Personalkosten für einen zusätzlichen Mitarbeiter pro Schicht und weitere 6 Personen im Tagesbetrieb: Administration (50%), Finanzen (50%), Wartung und Unterhalt (300%), Produktion (150%) und Logistik (50%). Der Personalaufwand beläuft sich in dieser Variante auf ca. 14 Vollzeitstellen.

Für die nachfolgende Kostenermittlung des Phos4life-Verfahrens werden 18 Vollzeitstellen angenommen. Das effektive anzuwendende Betriebskonzept muss in einer weiteren Phase zwischen der zukünftigen Trägerschaft Phos4life und KEBAG entwickelt und definiert werden.

5. WIRTSCHAFTLICHKEIT

In der aktuell geopolitisch angespannten Situation ist einerseits die Kostenermittlung sowie anderseits auch die Situation auf den Rohstoffmärkten von sehr hohen Unsicherheiten gekennzeichnet. Die nachfolgende Kostenbetrachtung basiert daher auf dem Preisniveau des Jahres 2020.

5.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten wurden im Rahmen des Projektes mit einer Genauigkeit von +/- 30% ermittelt. Für das benötigte Bauland wird von der KEBAG ein Baurecht für 75 Jahre gewährt. Ein regionaler Industrielandpreis von 135 CHF/m^2 mit einer marktüblichen Zinskonditionen, angepasst an einen Teuerungsindex, wird dafür zugrunde gelegt. In Tabelle 5-1 sind die Investitionskosten im Baukostenplan (BKP) zusammenfassend dargestellt, die detailliertere Zusammenstellung ist dem Anhang 4 zu entnehmen. Für das optimierte Wärme-/Kältekonzept sind unter BKP-3 zusätzliche Investitionskosten in der Höhe von CHF 3.5 Mio. bereits enthalten. Die Gesamtkosten für den Bau der Anlage belaufen sich auf ca. CHF 155 Mio.

Tabelle 5-1 Investitionskosten (exkl. MwSt. und Teuerung)

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**

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass sich die unter der BKP-Position 5 enthaltenen «Baunebenkosten» in Abhängigkeit der Organisationsform und des Betriebsmodells verändern können. Da P4L kein eigenständiger, existierender Betrieb ist, müssen die in Tabelle 5-2 dargestellten, während der Planung-, Bau- und Inbetriebnahmephase anfallenden Kosten vollumfänglich von der Investitionskostenrechnung getragen werden, da bis zu diesem Zeitpunkt keine Einnahmen aus dem operativen Betrieb generiert werden.

Tabelle 5-2 Detailkosten der BKP-Position 54-56, Baunebenkosten (exkl. MwSt.)

BKP	Bezeichnung	Kosten [CHF]
BKP 54	Finanzierungskosten für das notwendige Fremdkapital bis Start Normalbetrieb.	5'600’000
BKP 551	Bauherrenleistungen (Verwaltungsrat, Geschäftsführung, Projektleitung etc.)	2'500’000
BKP 552	Betriebspersonal bis Start Normalbetrieb	3'200’000
BKP 59	Honorare, externe Gesamtprojektleitung, Spezialisten etc.	2'500’000

Mit der in Tabelle 5-3 angegebenen Amortisationsdauer der einzelnen Anlagenteile ergeben sich mit einem Zinssatz von 2% Kapitalkosten in der Höhe von CHF 7.6 Mio./a bzw. 189 CHF/t KSA. Da der Hauptteil der mechanischen Anlagenkomponenten der Bearbeitung von Flüssigkeiten dient, die nicht abrasiv sind, wurde die Abschreibungsdauer für die Verfahrenstechnik auf 25 Jahre angenommen. Die dabei zum Einsatz kommenden Komponenten sind vor allem Standardteile wie Behälter, Rührwerke und Pumpen und somit keine komplexen bzw. teuren Einzelsysteme zum Einsatz, die somit eine längere Nutzungsdauer aufweisen. Reinvestitionen zum Werterhalt in die mechanischen und elektrischen Anlagenteile wurden in den Kapitalkosten nicht mit abgebildet. Diese sind in den laufenden Betriebskosten dem Unterhalt zugeordnet (vgl. Anhang 5). Eine differenziertere Kostenbetrachtung wird dazu im Rahmen des Businessplans per Ende 2023 ausgewiesen.

Tabelle 5-3 Abschreibungsdauer und Kapitalkosten (exkl. MwSt. und Teuerung)

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**

5.2 Betriebskosten und Wirtschaftlichkeit

Für den Betrieb einer P4L-Anlage mit einer Behandlungskapazität von 40’0000 t/a KSA sind die in Tabelle 5-4 zusammengefassten Betriebskosten (OPEX, Genauigkeit +/- 15%) massgeben. Die detaillierte Zusammenstellung ist dem Anhang 5 zu entnehmen. KEBAG verrechnet einen branchenüblichen Strompreis auf Basis des 3-Jahres-Mittelwert des Marktstrompreises. Für das Referenzjahr 2020 betrug der Strompreis 80 CHF/MWh. Die Dampfkosten ergeben sich aus dem entgangenen Stromerlös, die für eine Tonne Niederdruckdampf (ND) ca. 150 kW beträgt, mit obigem Strompreis zu 12 CHF/t ND-Dampf.

Tabelle 5-4 Betriebskosten (exkl. MwSt.)

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**

Aus dem Verkauf der Phosphorsäure wird mit einem Ertrag von CHF 8.4 Mio. bzw. 210 CHF/t KSA gerechnet. Dieser Erlös deckt etwa 25% der Gesamtkosten und zeigt deutlich, dass die Einnahmen nicht zu einer kostendeckenden Finanzierung der Anlage ausreichen (Abbildung 5-1).

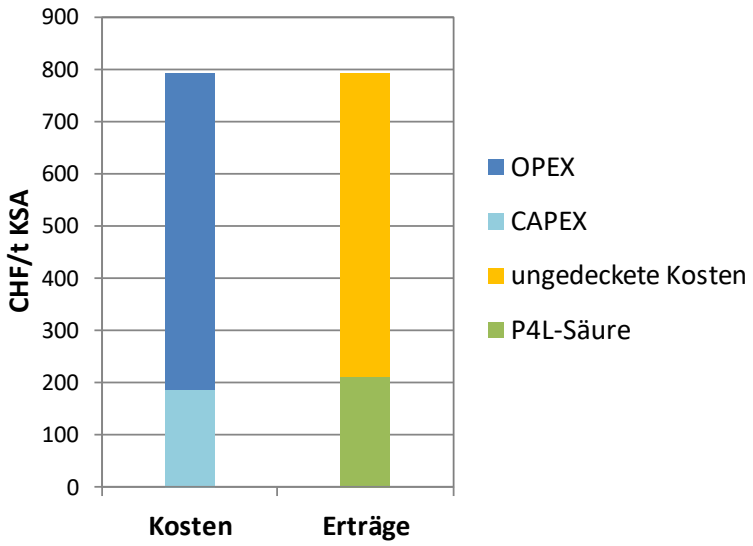


Abbildung 5-1 Kosten- und Ertragssituation für eine Phos4life mit 40'000 t/a KSA-Kapazität.

Diese ungedeckten Kosten müssen durch eine Behandlungsgebühr zur Annahme der Klärschlammasche in der Höhe von ca. 580 CHF/t gedeckt werden. Die effektiven Mehrkosten des Phos4life-Verfahrens gegenüber der heutigen Monoverbrennung und Deponierung der KSA belaufen sich hingegen auf 490 CHF/t KSA, da die heutigen Deponiekosten von ca. 90 CHF/t KSA ab Monoverbrennungsanlage entfallen.

6. ÖKOLOGIE

Die primäre Phosphor-Mineraldüngerherstellung basiert auf dem Einsatz von Rohphosphat und der daraus gewonnen Phosphorsäure. Bei der Herstellung von Tripelsuperphosphates (TSP) – der heutigen Standard-Phosphor-Komponente in Mineraldüngern – wird der Phosphorgehalt durch Mischung von 30% P aus dem Rohphosphat und 70% P aus der Phosphorsäure gewonnen. Die Phosphorsäure ist somit mit 70 Gew.-% am Phosphoranteil des Produktes das dominierende Edukt. Bei der klassischen Phosphorsäuregewinnung mit Schwefelsäure aus Rohphosphat fallen pro Tonne Phosphorsäure weltweit ca. 5 Tonnen unter anderem radioaktiv (z.B. uranhaltiger) kontaminierter Gips – sogenannter Phosphorgips - an, der je nach Standort (un-)kontrolliert abgelagert oder im Ozean «entsorgt» wird. Diesen ökologischen Fussabdruck tragen auch alle in die Schweiz importierten phosphorhaltigen Düngemittel mit sich. Eine rückstandsfreie primäre Düngemittelproduktion gibt es nicht. Die ökologische Belastung der importierten Mineraldünger findet in den Ländern der Mineraldüngerabnehmer praktisch keine Beachtung und spiegelt sich auch in der heutigen Preisgestaltung der Produkte nicht wider.

Bei der Herstellung der P4L-Säure fällt analog zur Primärproduktion eine entsprechende schadstoffärmere Gipsmenge im Laugungsrückstand an. Im Vergleich zur Primärproduktion ist sie bei P4L aber geringer, da nicht aller Phosphor in der KSA als Calciumphosphat, sondern auch als Eisenphosphat vorliegt. Wenn eine «rückstandslose» Phosphorsäuregewinnung angestrebt wird, muss dieser mineralische Rückstand in den Baustoffkreislauf integriert werden.

Der im Phos4life-Verfahren anfallende Laugungsrückstand weist darüber hinaus durch die effiziente Schwermetallabtrennung einen deutlich geringeren Schwermetallgehalt auf. Das primäre Ziel ist die baustoffliche Verwertung dieses eisenhaltigen Gipses. Teile der Schweizer Zementindustrie signalisieren hierzu ein grundlegendes Interesse, vor allem im Sinne eines Frachtansatzes (vgl. Kap. 7) zur Phosphorrückgewinnung, bei dem nicht aller Klärschlamm der stofflichen Phosphorrückgewinnung zugeführt werden soll, so dass eine im Sinne des inländischen Phosphorbedarfs nicht benötigte Phosphorfracht weiterhin als Ersatzbrennstoff in der Zementindustrie genutzt werden kann. Hierbei sind zur gesamthaften Bilanzierung dieses Frachtmodells nicht nur die phosphorbezogenen Kriterien, sondern auch energetische Aspekte und der CO_2-Fussabdruck der gesamten Systemkette im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu berücksichtigen und in eine allfällige Bilanzierung zu integrieren. Falls eine stoffliche Verwertung nicht erreicht werden kann, muss der Laugungsrückstand deponiert werden.

Im ökobilanziellen Vergleich der primär herstellten Phosphorsäure und der P4L-Phosphorsäure ist das Phos4life-Verfahren bei den beiden betrachteten Kategorien der Umweltbelastungspunkte (UBP) und der CO_2-Bilanzierung ökologisch besser (Abbildung 6-1). Beim Phos4life-Verfahren wurden drei Szenarien untersucht: Referenzfall, Best-Case und Worst-Case-Szenario. Die Szenarien unterscheiden sich je nach Herkunft der Betriebsmittel (vor allem Schwefelsäure) und der Verwertungen der Rückstände bzw. den Gutschriften für Metalle (SwissZinc) bzw. Eisen und Gips im Falle der Zementverwertung (siehe Anhang 6).

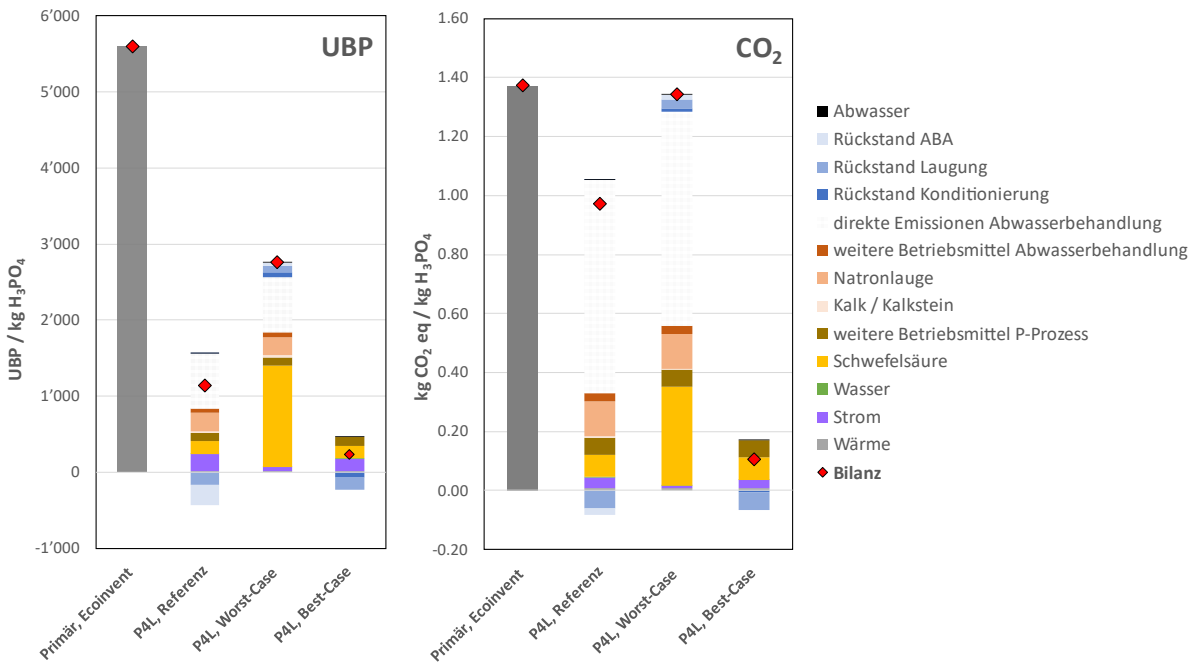


Abbildung 6-1 Umweltbelastung (UBP) und CO_2-Bilanz der primär gewonnenen Phosphorsäure im Vergleich zur Phos4life-Phosphorsäure.

Die «Vernichtung» der im Abwasserstrom des Phosphorsäure-Prozesses enthaltenen Schwefelsäuremenge (vgl. Kap. 4.1) mit Kalk ($CaCO_3$) hat einen sehr grossen Einfluss auf die Ökologie. Zur Neutralisation der Säure wird viel Kalk benötigt, der wiederum durch die Reaktion mit Säure grosse Mengen CO_2 freisetzt (direkte Emissionen der Abwasserbehandlung). In einer nächsten Projektphase soll der Prozess der Abwasserbehandlung weiter optimiert und alternative Nutzungen der vorhandenen Schwefelsäuremenge geprüft werden. Da der ökologische Fussabdruck des Phos4life-Verfahrens massgeblich durch die Abwasserbehandlung beeinflusst wird, ist das ökologische Potenzial zur Optimierung hier sehr gross (vgl. Best-Case-Fall).

7. UMFELDBEOBACHTUNG UND PRODUKTABSATZ

Neben der Schweiz ist derzeit nur in Deutschland eine Phosphorrückgewinnungspflicht auf gesetzlicher Ebene verankert. Europaweit laufen aber viele Projekte und Fördermassnahmen, damit ein Phosphorrecycling entwickelt und industriell etabliert werden kann. Die Weichen sind auch hier klar weg von der heutigen linearen Phosphorwirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft gestellt. Hier geht der Weg auch klar in Richtung der aschebasierten Verfahren, die daraus direkt eine «Dünger» oder eine Phosphorsäure herstellen. Damit verbunden ist ein Ausbau der Monoverbrennungskapazitäten. Verfahren, die aus Klärschlammasche technisch reine Phosphorsäure gewinnen können, sind derzeit noch nicht in industriellem Massstab erprobt und verfügbar. Eine erste Anlage in Deutschland befindet sich seit zwei Jahren in der Inbetriebnahme, Aussagen zur Eignung der dort eingesetzten Technologie lassen sich aber noch nicht abschliessend ableiten. Andere Technologien stehen - analog zu Phos4life - erst kurz vor der industriellen Umsetzung, so dass auch hier ein objektiver, direkter Vergleich erst nach einigen Betriebsjahren möglich ist. Somit zeichnet sich zum heutigen Zeitpunkt kein alternatives oder besseres Verfahren ab, das die gleichen Qualitätskriterien und Anforderungen wie das Phos4life-Verfahren erfüllen würde.

Das Phos4life-Verfahren gewinnt eine technisch reine und saubere Phosphorsäure, die für den direkten Einsatz in der chemisch-/technischen Industrie vorgesehen ist. Dort kann sie direkt oder über den Chemikalienhandel vermarktet werden. Der direkte Absatz in der Schweiz ist auf ca. 25% der hergestellten Menge begrenzt, europaweit werden aber weitaus grössere Volumina gehandelt, so dass dort ein Absatz problemlos möglich ist und es zu keiner Marktverzerrung kommt. Die P4L-Phosphorsäure kann aber auch anteilig für eine Düngemittelherstellung eingesetzt werden, wenn hochwertige und somit schadstoffarme Produkte daraus hergestellt werden sollen. Eine Möglichkeit stellt hierzu die Herstellung eines Tripelsuperphosphates (TSP 46) in der Schweiz dar. TSP 46 ist die heutige «klassische» P-Düngerkomponenten in den meisten handelsüblichen Mineraldüngern und somit seit Jahrzehnten der «Branchenstandard» als wasserlöslicher und gut verfügbarer Phosphordünger.

Der Phosphor-Mineraldüngerbedarf der Schweizer Landwirtschaft ist in nachfolgender Abbildung dem Potenzial in den beiden rückgewinnungspflichtigen Massenströmen Klärschlamm bzw. Klärschlammasche und Tier-/Knochenmehl gegenübergestellt. Aufgrund der Nahrungs- und Futtermittelimporte ist das in der Schweiz verfügbare Phosphorpotenzial deutlich grösser als der Bedarf an mineralischen Phosphordüngern. Zur Nutzung dieses Potenzial stehen grundsätzlich drei Wege offen:

1) Zusammen mit Tier-/Knochenmehlasche (TMA) und Phosphorsäure aus Klärschlammasche kann ein für den Schweizer Markt geeigneter Dünger (TSP, blauer Balken) hergestellt werden.

2) Damit darüber hinaus der weitere Phosphorbedarf gedeckt werden kann, sind Importe von Spezialprodukten und Phosphorsäure für technische Anwendungen notwendig (oranger und grauer Balken).

3) Auch bei einer hohen gesamten P-Rückgewinnungsrate (z.B. 70%) könnte in Anlehnung an die heute etablierten Entsorgungswege ein Teil des Klärschlamms weiterhin als Ersatzbrennstoff in der Zementherstellung genutzt werden.

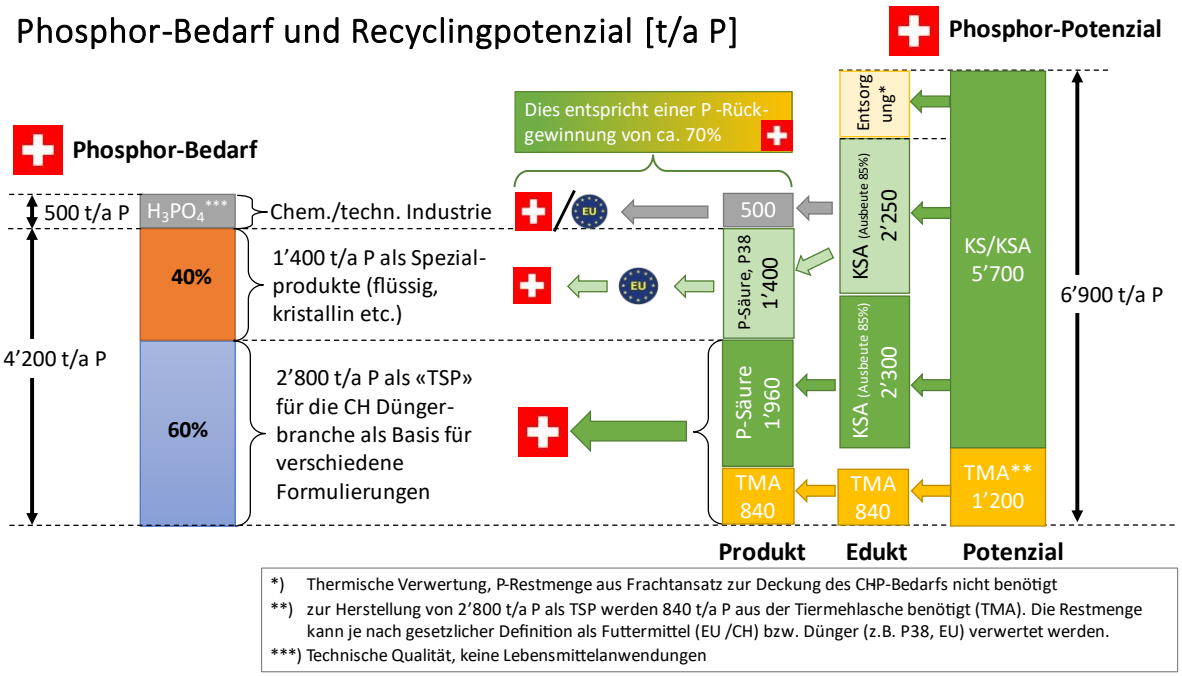


Abbildung 7-1 Phosphor-Potenzial und Bedarf in der Schweiz

Der Produkterlös, der aus dem Verkauf der Phosphorsäure sowie phosphorhaltigen Produkten generiert werden kann, unterliegt typischen Marktschwankungen. Exemplarisch ist diese Schwankung im Verlauf der letzten 17 Jahre anhand des Rohphosphates und dem TSP in Abbildung 7-2 gezeigt, das eine Mischung aus Phosphorsäure und Rohphosphat darstellt.

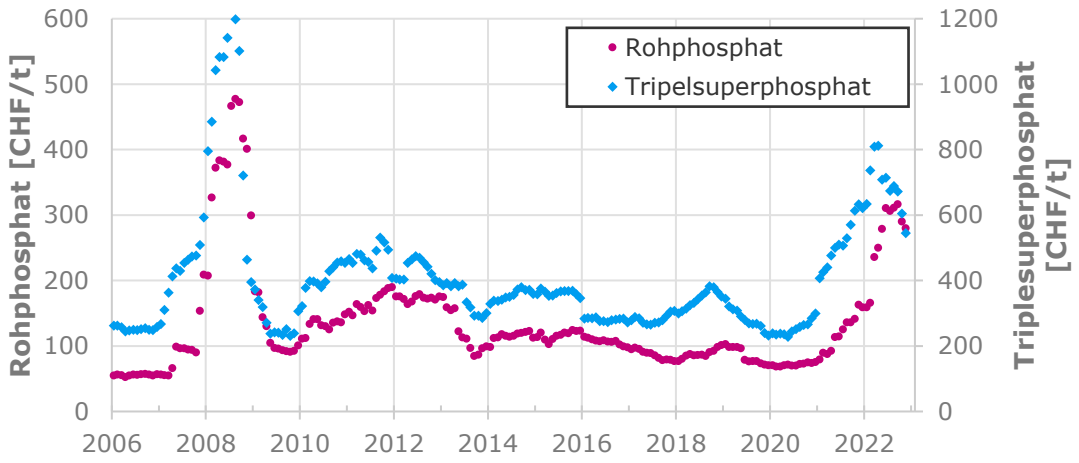


Abbildung 7-2 Weltmarktpreise für Rohphosphat (FAS, Marokko) und TSP (FOB, Tunesien), Quelle Indexmundi.com

Gut erkennbar sind die Einflüsse der vergangenen beiden Jahre mit der COVID-Pandemie und der geopolitischen instabilen Lage in der Ukraine bzw. Russland. Nach einer Phase des starken Preisanstiegs sinken die Kosten derzeit wieder.

Zusammenfassend kann für den Absatz der ca. 12'000 t/a Phos4life-Säure festgehalten werden, dass im Falle einer Schweizer TSP-Produktion maximal 1'960 t/a Phosphor (dies entspricht ca.

8'300 t/a 75%iger Phosphorsäure) benötigt würden. Die restliche Menge könnte problemlos dem nationalen und internationalen Handel abgegeben werden. Falls die Schweizer Düngeproduktion nicht erfolgen sollte, stellt dies auch kein Problem dar, da die qualitativ hochwertige P4L-Säure-menge direkt dem europäischen Markt zugeführt werden kann. Der Wert der Säure richtet sich nach dem Marktpreis, dessen Einfluss auf die Behandlungsgebühr der Klärschlammasche bereits in Kap. 5.2 diskutiert wurde.

8. RISIKOANALYSE

Die zu Beginn des Projektes erstellte und laufend aktualisierte Risikomatrix zeigte vier wesentliche Risikobereiche, die grosse Auswirkungen auf die Realisierung bzw. die Kosten des Verfahrens haben:

1) Umsetzbarkeit am Standort ist nicht möglich (Platzbedarf, Logistik und Energie),
2) Umweltverträglichkeit der Anlage ist nicht gegeben,
3) Qualitäten der Rückstände und des Produktes genügen den Anforderungen nicht,
4) Andere Konkurrenzverfahren bieten eine bessere Leistung.

Zu diesen Bereichen wurden die entsprechenden Arbeiten im Projekt ausgeführt und durch geeignete Massnahmen eine Minimierung der Risiken untersucht. Die Beurteilung der Risiken nach Abschluss der Arbeiten wird nachfolgend für die 4 Bereiche zusammengefasst.

Die standortbedingten Risiken zur Umsetzbarkeit des P4L-Verfahrens konnten alle entschärft werden. Mit dem heute vorliegenden Projekt sind diese Punkte erfüllt und die Risikoeinschätzung fällt hier gering aus. Der Platz zum Bau und Betrieb der Anlage ist vorhanden und das optimierte Energiekonzept ermöglicht eine gute Integration und Nutzung einer konstanten Wärmemenge der KEBAG Enova.

Bei den umwelt- und bewilligungsrechtlichen Risiken konnten durch technische Anpassungen – wie beispielsweise der Verzicht auf die Anlieferung von Schwefelwasserstoff durch dessen in-situ Herstellung – Risiken deutlich reduziert werden. Durch das optimierte Wärme-/Kältekonzept konnte auch die erforderliche Rückkühlleistung durch eine Kombination aus Aarewasserkühlung und Hybrid-Rückkühlung so umgestaltet werden, dass die Bewilligungsfähigkeit gegeben ist. Im Rahmen der Umweltverträglichkeitsvorprüfung wurde dies auch durch die vorläufige Beurteilung des Kantons Solothurn bestätigt.

Die qualitätsbedingten Risiken zum Produktabsatz bzw. der stofflichen Verwertung der gipshaltigen Rückstände konnten im Rahmen des Projektes nicht signifikant reduziert werden. Die Produktqualität kann abschliessend erst nach der Inbetriebnahme der Anlage beurteilt werden. Die erfolgreich durchgeführte Pilotierung des P4L-Verfahrens zeigte diesbezüglich keine negativen Aspekte, so dass weiter davon ausgegangen wird, eine technisch reine Phosphorsäure konstanter Qualität und Quantität zu gewinnen, deren Absatz auf dem europäischen Markt problemlos möglich sein sollte. Bei der stofflichen Verwertung der Rückstände als Alternative zur Deponierung zeigte sich eine grundsätzliche Bereitschaft potenzieller Abnehmer, dieses Material zu verwerten. Gesetzliche Rahmenbedingungen im Anhang 4 der Abfallverordnung (VVEA) müssten dafür aber angepasst und im Rahmen eines integralen Konzeptes umgesetzt werden. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sollte die stoffliche Verwertung der Rückstände nicht isoliert, sondern im Kontext einer klimaoptimierten ganzheitlichen stofflichen und energetischen Verwertung des Klärschlamms betrachtet werden (vgl. Kap. 7).

Aus heutiger Sicht ist kein alternatives und besseres Verfahren absehbar, das gegenüber dem Phos4life-Verfahren signifikante Vorteile bieten würde. Zwar wird vor allem in Deutschland an der grosstechnischen Umsetzung der Phosphorrückgewinnung gearbeitet und entsprechende Pilot- und Demoprojekte auch grosszügig subventioniert, ein markttaugliches Verfahren mit ebenbürtiger Produktqualität konnte bislang aber noch nicht erfolgreich realisiert werden (vgl. Kap. 7). Diesen Punkt gilt es somit in den weiteren Projektphasen weiter zu beobachten und in die strategische Planung einzubeziehen.

Zusammenfassend sind die beeinflussbaren technischen Risiken durch das aktuelle Projekt massgebend reduziert und auf ein allgemein geringes Restrisikoniveau reduziert worden. Ökonomische Risiken durch die Finanzierung, Teuerung bzw. Zinsentwicklung sind aktiv nicht beeinflussbar. Sie werden detaillierter im noch zu erstellenden Businessplan abgebildet. Die Weiterführung der Umfeld- und Risikobeurteilung wird somit auch in den nächsten Projektetappen ein wichtiger Bestandteil der auszuführenden Arbeiten sein.

9. BEURTEILUNG MACHBARKEIT UND WEITERES OPTIMIERUNGSPOTENZIAL

Die Machbarkeit einer Phos4life-Anlage im Emmenspitz zur Phosphorsäuregewinnung aus einer jährlichen Klärschlammaschenmenge von 40'000 t/a ist aus Sicht der Fachplaner, des Standortes und des Kantons Solothurn gegeben. Das Phos4life-Verfahren wurde weiterentwickelt und mit Fokus auf einen stabilen Betrieb und eine hohe Verfügbarkeit der Anlage vereinfacht. Dabei wurden auch umwelttechnische Risiken entschärft und durch geeignete Alternativprozesse substituiert. Der Entscheid, Schwefelwasserstoff, ein toxisches und hochentzündliches Gas, das zur Feinreinigung der Phosphorsäure benötigt wird, vor Ort herzustellen und nicht anliefern zu lassen, ist ein Beispiel dafür. Der für das geplante Bauvorhaben benötigte Platz sowie die zur Bewirtschaftung erforderlichen Verkehrsflächen können zur Verfügung gestellt werden. Der zusätzlich anfallende Verkehr – LKW- und Bahnlogistik – ist bewilligungsrechtlich nicht kritisch und durch den Entscheid, möglichst viel Warenumschlag via Bahnlogistik abzuwickeln, weiter entschärft worden.

Für die weiteren Projektetappen sind unter anderem folgende Punkte als Optimierungspotenzial identifiziert worden:

- Alternative Nutzung der «Rest-Schwefelsäure» im Abwasserstrom der Phosphorrückgewinnung ➔ Minimierung der Abwasserbehandlung, weniger Rückstände
- Anpassung der Abwasserbehandlung
- Optimierung der Ablufteinigung und prüfen der Kreislaufführung sulfidhaltiger Lösungen ➔ Minimierung des Natriumhydrogensulfid-Verbrauchs und des Natronlaugenverbrauchs
- Weiternutzung bestehender Anlagenteile des heutigen FLUREC-Prozesses im Phos4life-Prozess
- Ersatz der elektrischen Trockner (Trocknung der Rückstände) durch thermische Trocknung (Nutzung der Restwärme)
- Synergiepotenzial mit SwissZinc (Betrieb, Wärmeversorgung, Schwefelsäure-Nutzung, Chemikalienbewirtschaftung etc.)

10. WEITERES VORGEHEN UND AUSBLICK

Gemäss den aktuellen Vorgaben vom Bund sollen die Anlagen zum Phosphor Recycling ab dem 1.1.2026 in Betrieb sein, da ab diesem Datum Phosphor aus dem Abwasser respektive der Klärschlammasche mit mindestens 50% Ausbeute zurückgewonnen werden muss. Auch wenn aus heutiger Sicht noch nicht absehbar ist, ob und in welchem Umfang die in Art. 51 VVEA genannte Übergangsfrist zur Umsetzung der P-Rückgewinnung verlängert wird, ist davon auszugehen, dass es noch eine längere Zeit dauern wird, bis ein konkretes Bauprojekt für eine Phos4life Anlage ausgeführt werden kann. Das Baufeld kann erst nach der Inbetriebnahme der neuen KVA KEBAG Enova (Mitte 2025) und dem anschliessenden Rückbau der bestehenden KVA sowie dem Turbinengebäude inkl. Werkstatt ab 2027 genutzt werden. Aus der Standortperspektive lässt sich folgender grober Terminplan für die weitere Umsetzung arbeiten:

- Rückbau «alte» KEBAG abgeschlossen — Ende 2026
- Neubau Werkstatt KEBAG Enova — Mitte 2027
- Baufeld für P4L verfügbar — ab Juli 2027
- Bau Phos4life-Anlage — 2027 – 2030
- Inbetriebnahme und Optimierung P4L — 2030+.

Eine Umsetzung und Inbetriebnahme einer P4L-Anlage am Standort Emmenspitz ist somit vor 2030 nicht realisierbar. Auch wenn die bis dahin verbleibende aus heutiger Perspektive Zeit ausreichend ist, müssen zeitnah das Grundstück durch die künftige Trägerschaft gesichert, die Optimierungspotenziale geprüft, die notwendigen Geldmittel beantragt, die weiteren Planungsphasen beauftragt und die Fragen zur Organisation der Trägerschaft für die P4L-Anlage geklärt werden (siehe separater Bericht zur Trägerschaft Phos4life). Somit kann die Planungssicherheit für die Trägerschaft Phos4life sowie den Standort Emmenspitz gewährleistet werden.

Neben diesen standortrelevanten Rahmenbedingungen ist die Umsetzung des P4L-Projektes auch von einigen übergeordneten Faktoren abhängig. Politische und strategische Entscheidungen zur genauen Ausgestaltung und Finanzierung der Phosphorrückgewinnung müssen erst noch auf nationaler Ebene gefällt werden. Der Realisierungsentscheid der SwissZinc-Anlage muss abgewartet und anschliessend mit der Planung P4L koordiniert werden, damit mögliche Synergien am Standort ideal genutzt werden können. Dies gilt es bei den weiteren Etappen zu berücksichtigen und im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise umzusetzen, damit diese beiden wichtigen Projekte hin zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft erfolgreich umgesetzt werden können.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass der Auftrag der Projektpartner in dem Sinne erfolgreich abgeschlossen werden konnte, dass eine Phos4life Anlage am Standort Emmenspitz machbar und bewilligbar ist.

BEILAGENVERZEICHNIS

Nr.	Dokument Name			
1	Machbarkeit der Eisenrückgewinnung am Standort Emmenspitz			
2	Verkehrswege zur Bewirtschaftung der P4L-Anlage			
3	Optimiertes Wärmekonzept Phos4life			
4	Baukostenplanung (BKP)			
5	Kostenbetrachtung OPEX und CAPEX			
6	Szenarien zur ökobilanziellen Betrachtung			

Anhang 1) Machbarkeit der Eisenrückgewinnung am Standort Emmenspitz

Anfänglich war im Rahmen des Phos4life-Verfahrens auch eine Rückgewinnung des Fällmittels Eisenchlorid, wie es bei vielen Kläranlagen zur chemischen Phosphorelimination eingesetzt wird, vorgesehen. Dieser Prozessschritt wurde so überarbeitet, dass er einer vorgängigen Phosphorrückgewinnung nachgeschaltet und nicht mehr als integraler Bestandteil der Phosphorrückgewinnung betrieben werden kann (Abbildung 3). Mit Salzsäure wird das Eisen dabei aus dem Rückstand der Phosphorrückgewinnung extrahiert, via Solventextraktion aufgereinigt und mittels Verdampfer als 40%ige Eisenchloridlösung aufkonzentriert und vermarktet. Der dabei anfallende mineralische Rückstand besteht hauptsächlich aus Gips und kann einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Das resultierende Abwasser wird neutralisiert, von Schwermetallen befreit und der Kläranlage zugeführt.

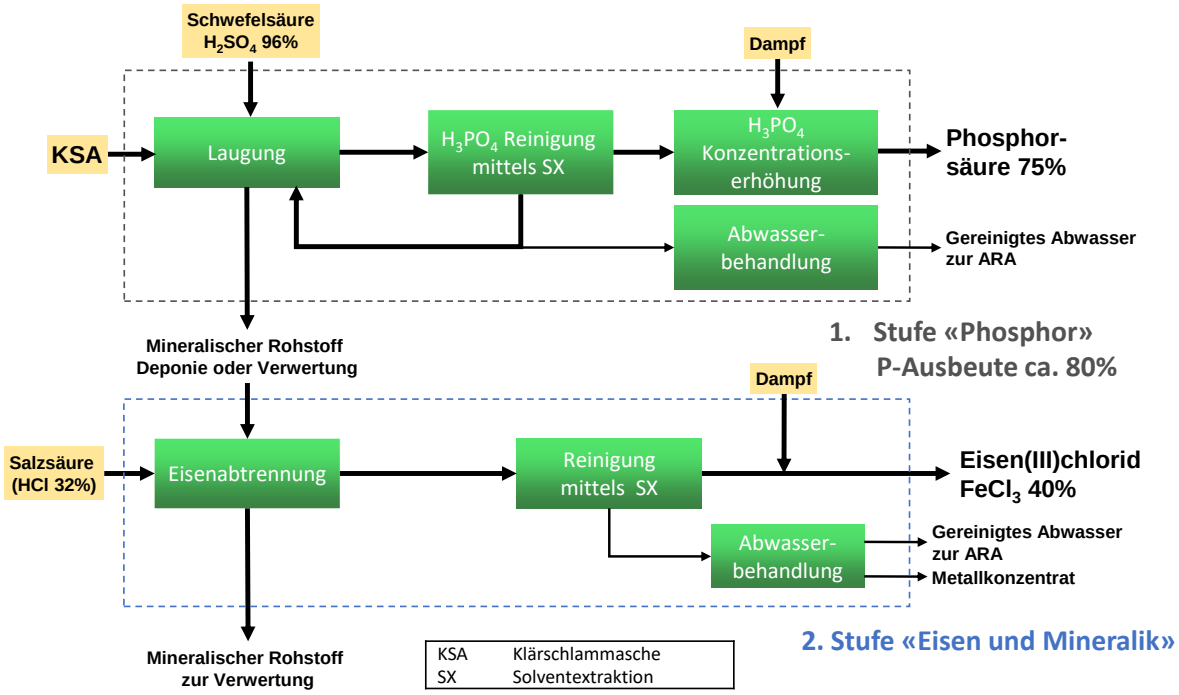
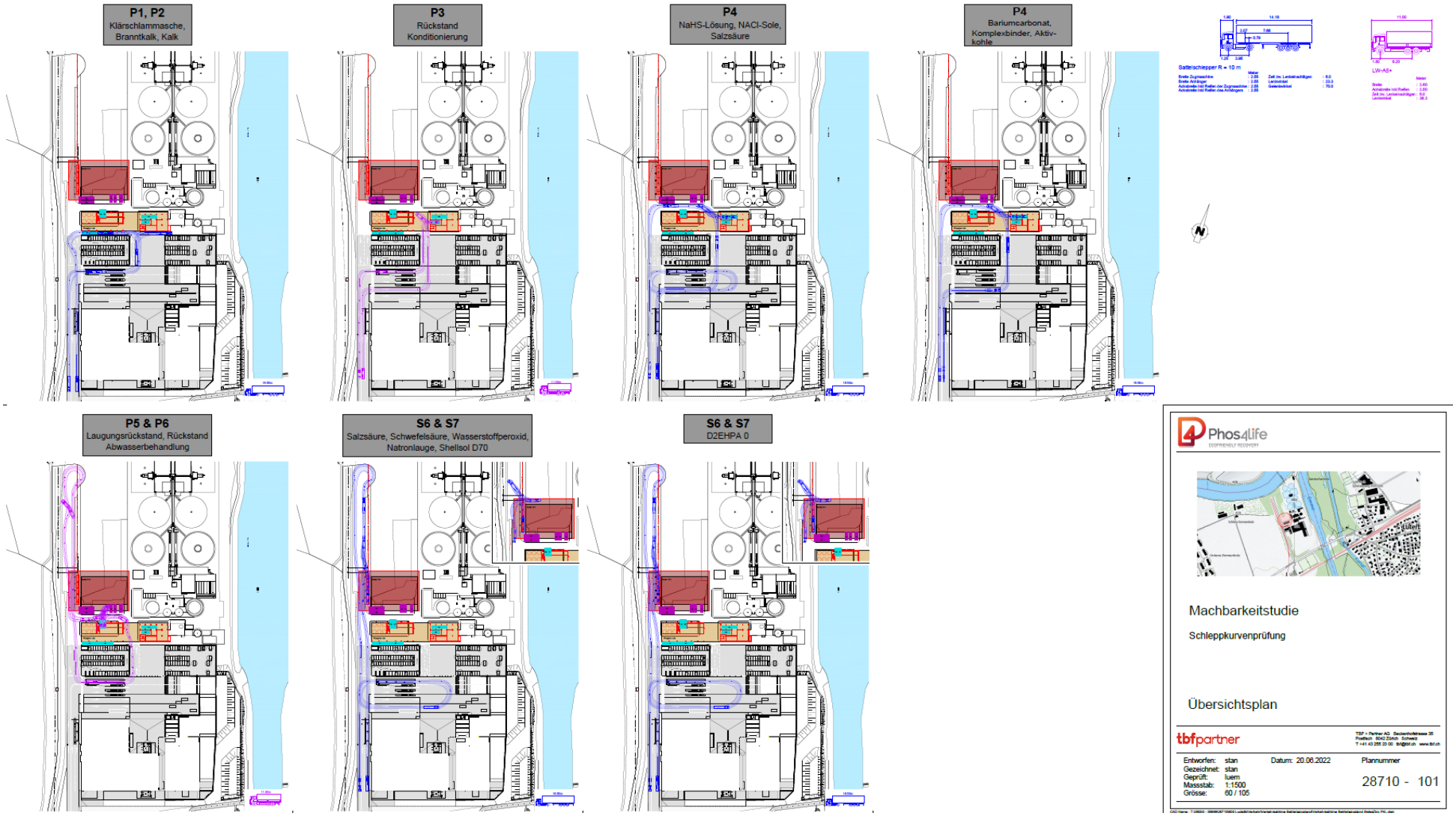


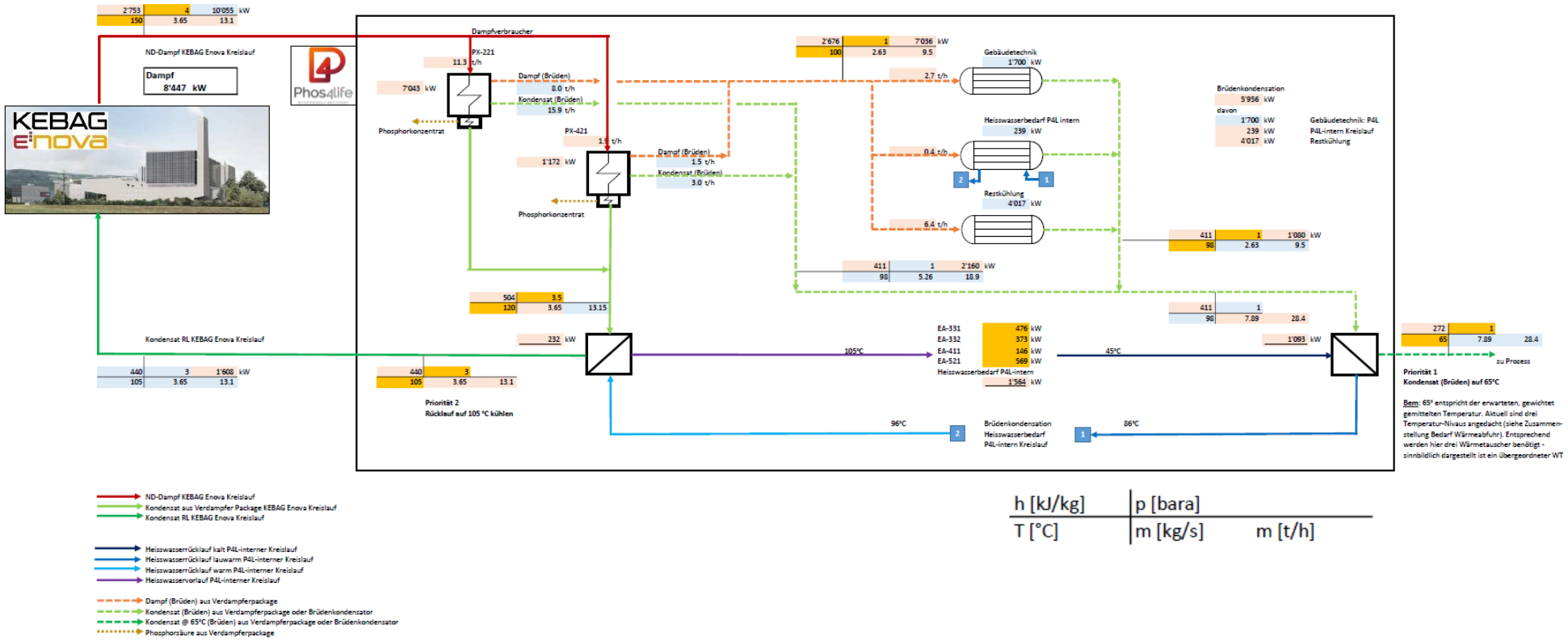
Abbildung 3: Phos4life 2.0-Prozess inklusive optionaler Eisenrückgewinnung

Zur Eisenrückgewinnung aus dem Rückstand der Phosphorrückgewinnung (40'000 t/a KSA) wird unter anderem 123'000 t/a 32%ige Salzsäure benötigt. Diese Menge ist einerseits logistisch am Standort Emmenspitz nicht zu bewerkstelligen und anderseits ist die resultierende Chloridfracht im Abwasserstrom (36'000 t/a Cl) für den Vorfluter Aare deutlich zu gross und nicht bewilligbar. Eine entsprechende Salzrückgewinnungsanlage wäre nur mit sehr hohem Energie- und Kostenaufwand möglich und somit wenig zielführend. Neben diesen beiden Aspekten ist der Platzbedarf für die zusätzliche Verfahrenstechnik am Standort nicht gegeben. Der zusätzlich notwendige Platzbedarf zur Eisenrückgewinnung beläuft sich auf ca. 70% des Platzbedarfs der Phosphorrückgewinnung. Diese zusätzlich benötigte Fläche kann auf dem Areal Emmenspitz nicht zur Verfügung gestellt werden. Die Gesamtbeurteilung der «Eisenrückgewinnung» führt somit zu höheren Kapital- und Betriebsmittelkosten, die durch die Vermarktung des Eisenchlorids nicht vollständig gedeckt werden können und somit zu einer Verteuerung der gesamten Phosphorrückgewinnung führen würde. Die Umsetzbarkeit am Standort Emmenspitz ist aus den zuvor genannten Gründen nicht möglich. Die projektbegleitende Steuergruppe hat daher am 19. Januar 2021 entschieden, auf diesen Verfahrensschritt für die weitere Projektierung zu verzichten.

Anhang 2) Verkehrs- und Logistikwege für die einzelnen Güter



Anhang 3) Optimiertes Wärmekonzept Phos4life



Anhang 4) Baukostenplanung (BKP)

Kostenschätzung P4L (exkl. MwSt. und exkl. Teuerung, Preisbasis 2020)

Genauigkeit: +/- 30%

		Kosten
	Kosten Total exkl. MwSt. und exkl. Teuerung	155'000'000
0	Grundstück	6'700'000
00	Vorstudien	0
01	Grundstück- bzw. Baurechtserwerb	6'700'000
1	Ersatzbau Werkstatt	3'000'000
2	Rohbau-Wert Flurec Gebäude	3'700'000
02	Nebenkosten zu Grundstückerwerb	0
1	Vorbereitungsarbeiten	11'000'000
10	Bestandesaufnahmen und Baugrunduntersuchungen	0
11	Räumungen, Terrainvorbereitungen	7'600'000
12	Provisorien	0
19	Honorare	3'400'000
2	Gebäude	23'200'000
20	Baugrube	1'600'000
21	Rohbau 1	10'900'000
211	Abzug Rohbauwert Flurec Gebäude	-3'700'000
22	Rohbau 2	2'800'000
23	Elektroanlagen	1'600'000
24	Heizungs-, Lüftungs-, Klimaanlagen	2'000'000
25	Sanitäranlagen	900'000
26	Transportanlagen	400'000
27	Ausbau 1	500'000
28	Ausbau 2	3'200'000
29	Honorare	3'000'000
3	Betriebseinrichtungen	66'600'000
31	P-Recovery Kernprozess	23'100'000
32	P-Recovery Abwasserbehandlung	4'100'000
36	Elektro- und Leittechnik (EMSRL)	7'000'000
37	Nebenanlagen	13'900'000
38	Verschiedenes	1'000'000
39	Honorare	17'700'000
4	Umgebung	5'000'000
40	Terraingestaltung	100'000
41	Rohbauarbeiten	0
44	Installationen (Umzäunung, Beleuchtung, Überwachung etc.)	0
45	Erschliessung durch Leitungen (Werkleitungen innerhalb des Grundstücks)	2'700'000
46	Strassen, Plätze etc.	1'400'000
49	Honorare	900'000
5	Baunebenkosten	14'800'000
51	Bewilligungen und Gebühren	100'000
52	Muster, Modelle, Dokumentation, Vervielfältigungen	200'000
53	Versicherungen (über gesamtes Projekt)	300'000
54	Finanzierung ab Baubeginn	5'600'000
55	Bauherrenleistungen	5'700'000
56	Übrige Baunebenkosten	300'000
59	Honorare	2'700'000
6	Unvorhergesehens	25'400'000
60	Reserven	25'000'000
7	Rückbau	siehe BKP 11
70	Rückbau bestehende Anlagen	
79	Honorare	
9	Ausstattung	2'100'000
90	Ausstattungen (Möblierungen, Garderoben, Büro, Cafeteria, Labor)	2'100'000

Anhang 5) Kostenbetrachtung OPEX und CAPEX

Kostenbetrachtung Phos4life (Kostenbasis 2020) — **Machbarkeit Emmenspitz (April 2023)**

Parameter	Einheit	Wert
Grundlagendaten (Prozess,KSA)		
	t/a	40'000
P-Gehalt in KSA	%	9.0%
P-Ausbeute Phos4Life	%	80.0%
Jährliche H3PO4-Produktion 75%	t/a	12'000
	t/a P	2'845

Betriebskosten (OPEX)	Einheit	Einheit/t KSA	CHF/Einheit	t/a	CHF/t KSA	CHF/a	%-Anteil OPEX	%-Anteil Gesamt-kosten
Betriebsmittel P-Prozess								
H2SO4 95%	t	0.63	100	25'200	63	2'520'000	**10.4%**	8%
Bariumcarbonat	kg	0.42	0.319	16.8	0.1	5'359	**0.0%**	0%
Natriumhydrogensulfid (NaHS, 47%)	kg	0.01	0.503	288	3.6	144'778	**0.6%**	0%
Komplexbildner	kg	2.10	8.36	84.0	18	702'240	**2.9%**	2%
Stickstoff flüssig (N2) inkl. Miettank	kg	0.25	0.3	10.0	0.3	12'000	**0.0%**	0%
Aktivkohle (TR)	kg	0.19	2.1	7.60	0.40	15'960	**0.1%**	0%
Aktivkohle für Prozessabluft (VTU)	kg	0.25	2.673	10.00	0.67	26'730	**0.1%**	0%
Aktivkohle für H2S (VTU)	kg	0.03	8.613	1.00	0.22	8'613	**0.0%**	0%
Brauchwasser TR (River water)	m3	0.68	0.08	27'375	0.05	2'190	**0.0%**	0%
Trinkwasser Input VTU-Wasseraufbereitung (für TR Prozess)	m3	1.50	2	60'000	3	120'000	**0.5%**	0%
Aare-Wasser als Kühlwasser	m3	107	0.01	4'260'000	1.1	42'600	**0.2%**	0%
ND-Dampf	t	*2.5*	*12*	*100'000*	30	1'200'000	**5.0%**	4%
Strom (Prozess und Nebenanlagen)	MWh	0.188	80	9'180	18	734'400	**3.0%**	2%
weitere Kleinmengen					15	600'000	**2.5%**	2%
Rundung					0	130	**0.0%**	0%
Zwischensumme Betriebsmittel P-Prozess					**153**	**6'135'000**	**25%**	**19%**
Betriebsmittel Abwasserbehandlung								
CaO (90%)	t	0.02	220	600	3	132'000	**1%**	0%
CaCO3 (90%)	t	0.37	55	14'800	20	814'000	**3%**	3%
Bayoxide	kg	1.88	5.4	75.00	10	404'250	**2%**	1%
Natronlauge 50%	t	0.050	275.0	1'995	14	548'625	**2%**	2%
Salzsäure 32%	t	0.006	88.0	250	1	22'000	**0%**	0%
Salzsole 30% (NaCl)	t	0.01	297	563	4	167'063	**1%**	1%
Brauchwasser Prozess (TR + VTU)	t	1.63	0.01	65'000	0	650	**0%**	0%
Strom	MWh	0.061	80	2'440	5	195'200	**1%**	1%
Rundung					0	6'212	**0%**	0%
Zwischensumme Betriebsmittel Abwasserbehandlung					**57**	**2'290'000**	**9%**	**7%**
Rückstände P-Prozess								
Laugungsrückstand (TS=90%) inkl. Transport	t	1.10	80	48'889	98	3'911'111	**16%**	12%
Konditionierungsrückstand (TS= 70%) inkl. Transport	t	0.01	300	400	3	120'000	**0%**	0%
Kondensat / verdampftes Wasser	t	9.9	0.0	396'000	0	0	**0%**	0%
Rundung						12'889	**0%**	0%
Zwischensumme Rückstände P-Prozess					**101**	**4'044'000**	**17%**	**13%**
Rückstände Abwasserbehandlung								
Abwasser	m3	2.5	0.25	117'000	1	29'250	**0%**	0%
Rückstand Abwasserbehandlung (TS=90%) inkl. Transport	t	0.6	80	25'778	52	2'062'222	**9%**	7%
Kondensat / verdampftes Wasser	t	0.2	0	6'800	0	0	**0%**	0%
Zwischensumme Rückstände Abwasserbehandlung					**52**	**2'091'472**	**9%**	**7%**
Wartung / Unterhalt (4% EMT, 0.5% Bau)	CHF/a				55.9	2'237'093	**9%**	7%
Personal	CHF/a				58.5	2'340'000	**10%**	7%
Bahnlogistik und Umschlag (LKW ACTS)	CHF/a				11	438'450	**2%**	1%
Baurechtszins	CHF/a				0.2	7'290	**0%**	0%
Versicherungen (0.5% Investment)	CHF/a				15.5	620'000	**3%**	2%
Reserve OPEX	CHF/a				98.2	3'927'167	**16%**	12%
Summe OPEX (Genauigkeit: ± 15%)	**CHF/a**				**603**	**24'130'471**	**100%**	**76%**
CAPEX inkl. Honorare	Zinssatz	2.00%						
P-Prozess (Phosphorrückgewinnung)		35'600'000		25	45.6	1'823'448		6%
P-ETP (Abwasserbehandlung)		5'500'000		25	7.0	281'712		1%
Nebenanlagen		17'900'000		25	22.9	916'846		3%
EMSRL	Investment	7'700'000	Abschreibe-dauer [a]	15	15.0	599'256		2%
Gebäude		48'000'000		33	50.0	2'000'953		6%
Baunebenkosten		15'000'000		33	15.6	625'298		2%
Reserve		25'500'000		25	32.7	1'306'121		4%
Summe CAPEX (Genauigkeit: ± 30%)		**155'000'000**			**189**	**7'553'635**		**24%**
Erträge, Produkte					CHF/t SSA			
Erlös Phosphorsäure 75%	CHF/t	700			-210	8'400'000		
Erlös Schwefelsäure in Abwasserbenandlung	CHF/t H2SO4	0						
Zwischensumme Erträge					**-210**	**8'400'000**		
Total zusätzliche Kosten pro Tonne KSA					**582**			

Anhang 6) Szenarien P4L zur ökobilanziellen Betrachtung

Herkunft und Verwendung der Materialien (Ecoinvent Datenbank Version 3.9.1)

		Standard-Case	Worst-Case	Best-Case
Schwefelsäure	in	Herkunft aus einer Metallhütte als 'Abfall', d.h. burden free, aber Transport über 600 km per Bahn eingerechnet	"Market for" Schwefelsäure, dh. 30% burden free, inkl. Transport	gleich wie Standard-Case
CaCO3	in	"Market for"-Limestone	"Market for"-Limestone	entfällt, da im Best Case die Schwefelsäure nicht neutralisiert, sondern weiterverwendet wird (SwissZinc, Schlackenwäsche etc.)
Wasser	in	"Market for"-Tap water	"Market for"-Tap water	gleich wie Standard-Case
weitere Betriebsmittel (P-Prozess)	in	"Market for"- diverse BM (Bariumcarbonat, NaHS, Flüssig-N2 etc.)	"Market for"- diverse BM (Bariumcarbonat, NaHS, Flüssig-N2 etc.)	gleich wie Standard-Case
weitere Betriebsmittel (Neutralisation)	in	"Market for"-diverse BM (Bayoxide, NaOH, HCl, NaCl)	"Market for"-diverse BM (Bayoxide, NaOH, HCl, NaCl)	entfällt, da im Best Case die Schwefelsäure nicht neutralisiert, sondern weiterverwendet wird (SwissZinc, Schlackenwäsche etc.)
direkte Emissionen Abwasserbehandlung	out	CO2 Freisetzung bei der Neutralisation der Schwefelsäure mit CaCO3	CO2 Freisetzung bei der Neutralisation der Schwefelsäure mit CaCO3	entfällt, da im Best Case die Schwefelsäure nicht neutralisiert, sondern weiterverwendet wird (SwissZinc, Schlackenwäsche etc.)
Rückstand Laugung	out	Verbringung ins Zementwerk (trocken). Nutzung des Eisen- und Mineralik-Gehaltes, aber keine Nutzung des Gipses. Eisengehalt ersetzt Pyritabbrand	Verbringung auf eine Inertstoffdeponie	gleich wie Standard-Case
Wärme zur Konzentrationserhöhung der Phosphorsäure	in	KVA-Dampf (heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial)	KVA-Dampf (heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial)	gleich wie Standard-Case
Trocknung der Rückstände	out	Trocknung mit elektrischer Energie von 60% TS auf 90% TS	Keine Trocknung, da die Rückstände deponiert werden	Nur Trockner P-Prozess. Trocknung des ABA-Schlamms entfällt.
Rückstand Konditionierung	out	Verbringung auf eine Schlackendeponie (Typ D)	Verbringung nach Zementverfestigung auf eine Reststoffdeponie (Typ C)	Verbringung in SwissZinc-Verfahren. Gewinnung von Zink (rein), sowie von Kupfer und Blei (als Konzentrate). Ausschleusung und Deponierung der restlichen Masse
Rückstand ABA	out	Verbringung ins Zementwerk (trocken). Nutzung des Gips-Gehaltes. Kein Bonus und auch kein Malus für den Rest	Verbringung auf eine Inertstoffdeponie	entfällt, da im Best Case die Schwefelsäure nicht neutralisiert wird und damit auch kein Gips entsteht.
Abwasser	out	Anrechnen der Entsorgung ARA als "Market for"-Wastewater (CH)	Anrechnen der Entsorgung ARA als "Market for"-Wastewater (CH)	gleich wie Standard-Case
KSA	in	Zentraler, als unbelastet angenommener Ausgangsstoff (Basis für den Ökobilanzvergleich)		
Phosphorsäure	out	Bezugsgrösse für den Vergleich (UBP bzw. kg CO2 pro kg Phosphorsäure). Im Fall ohne P4L-Verfahren wird die Phosphorsäure auf dem Weltmarkt eingekauft (market for phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state, GLO)		