HOLINGER
the art of engineering

PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG ARA THUNERSEE

MACHBARKEITSSTUDIE

Bern, 07. März 2022

Gemeindeverband ARA Thunersee

holinger.com

HOLINGER AG
Kasthoferstrasse 23, CH-3006 Bern
Telefon +41 31 370 30 30
bern@holinger.com

Version	Datum	Sachbearbeitung	Kontrolle	Verteiler
Entwurf	16.08.2021	Isabell Köpping Selina Jörg	Reto von Schulthess Patrick Graf	Gemeindeverband ARA Thunersee
Entwurf	28.10.2021	Isabell Köpping Selina Jörg	Reto von Schulthess Patrick Graf	Gemeindeverband ARA Thunersee
V01	07.03.2022	Isabell Köpping Selina Jörg	Reto von Schulthess Patrick Graf	Gemeindeverband ARA Thunersee

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG **8**

1 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG **10**

1.1 AUSGANGSLAGE 10

1.2 VORGEHEN 10

2 GRUNDLAGEN **11**

2.1 SITUATION ARA THUNERSEE 11

2.2 RECHTLICHE GRUNDLAGEN UND VORGABEN 12

2.2.1 Einleitung 12

2.2.2 Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) Stand 01.01.2021 [21] 12

2.2.3 Modul der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) Stand 20.01.2021 [9] 12

2.2.4 Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern (Dünger-Verordnung, DüV) Stand 01.01.2019 [22] 13

2.2.5 Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV) Stand 01.03.2021 [23] 13

2.3 STUDIEN ZUR PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG 14

2.4 PROJEKT «SWISSPHOSPHOR» 14

2.5 STRATEGIE PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG KANTON BERN 15

3 PHOSPHOR AUF DER ARA THUNERSEE **16**

3.1 PHOSPHOR-PFAD 16

3.2 PHOSPHORFRAKTIONIERUNG 17

3.3 SCHADSTOFFE IM KLÄRSCHLAMM 19

4 LITERATURRECHERCHE ZU PHOSPHORRÜCKGEWINNUNGSVERFAHREN **22**

4.1 FOKUS UND RAHMENBEDINUNGEN 22

4.2 VORGEHENSWEISE UND AUSWAHLKRITERIEN 22

4.3 ERKENNTNISSE AUS DER LONGLIST 24

4.4 HERLEITUNG DER SHORTLIST 26

4.4.1 Schlammverfahren 26

4.4.2 Alternativverfahren 28

5 TECHNISCHE UMSETZBARKEIT DER VERFAHREN GEMÄSS SHORTLIST **30**

5.1 INTEGRATION DER VERFAHREN AUF DER ARA THUNERSEE 30

5.2 ENTWICKLUNGSSTAND / WEITERENTWICKLUNG VERFAHREN 30

5.3 ABTRENNUNG REZYKLAT 31

5.4 SCHADSTOFFBELASTUNG DER PHOSPHOR-REZYKLATE 31

5.5 ENTSORGUNGSWEGE 32

5.6 UMGANG MIT FREMDSCHLAMM 34

6 BEST-VERFAHREN FÜR DIE ARA THUNERSEE 35

7 ÖKOLOGISCHE BEURTEILUNG 37

7.1 METHODIK UND VORGEHEN 37

7.2 RESULTATE 37

7.2.1 Ökologische Auswirkung der Verfahren 37

7.2.2 Ökologische Gutschrift der Verfahren 39

7.2.3 Umweltnutzen 39

8 REGIONALE P-RÜCKGEWINNUNGSSTRATEGIE 40

8.1 LANDKARTE «SWISSPHOSPHOR» 40

8.2 KLÄRSCHLAMMMENGEN UND PHOSPHOR-FRAKTIONEN KANTON BERN 41

8.3 REGIONALE VERWERTUNG PHOSPHOR-REZYKLAT 43

8.4 INTERESSE UND PFLICHTEN DER AKTEURE 43

9 FAZIT 46

10 AUSBLICK 47

10.1 ERHEBUNG DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEN 47

10.2 LABORVERSUCHE UND PILOTIERUNG 47

10.3 ABKLÄRUNGEN MIT AKTEUREN 47

LITERATURVERZEICHNIS 49

ANHANG

Anhang 1 Stoffströme und Bilanzen

Anhang 2 Bericht Eluatversuche mit Klärschlammproben

Anhang 3 Auswertung P-Fraktionierung

Anhang 4 Auswertung Schlammanalysen

Anhang 5 Longlist

Anhang 6 Beschrieb verfahrenstechnische Grundprozesse

Anhang 7 Innovative Verfahrensansätze

Anhang 8 Shortlist-Verfahren

Anhang 9 Verfahrensschema Shortlist-Verfahren

Anhang 10 Berechnung Entsorgungswege

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematische Darstellung der biologischen (rot) und MV-Stufe mit PAK-Reaktoren (grün) und Filtration (blau) inkl. Eisen-Dosierung und Kohlerückführung, Quelle: ARA Thunersee 11
Abbildung 2: Wichtigste Phosphorströme der ARA Thunersee, Stand 2020, mit Unsicherheiten von rund 10% 16
Abbildung 3: P-Fraktionierung nach DWA-ATV, Daten 2020 18
Abbildung 4: Anteile der Phosphorfraktionen gemäss Eluattests Mai 2021 19
Abbildung 5: Übersicht über Vorgehensweise in der Literaturrecherche 23
Abbildung 6: Möglichkeit zur Phosphorrückgewinnung auf einer kommunalen ARA mit P-Fällung 25
Abbildung 7: Verfahren der Longlist gruppiert nach Stoffstrom 25
Abbildung 8: Verfahren der Longlist gruppiert nach Verfahrensansatz 26
Abbildung 9: Entsorgungsweg Schlammverfahren mit Verwertung in der KVA 32
Abbildung 10: Entsorgungsweg Schlammverfahren mit Verwertung im Zementwerk 33
Abbildung 11: Entsorgungsweg Alternativverfahren EuPhoRe® 33
Abbildung 12: Entsorgungsweg Alternativverfahren Phos4Life® 34
Abbildung 13: Umweltfussabdruck (MöK 2021) der Phosphordüngerproduktion [11] 38
Abbildung 14: Umweltfussabdruck (MöK 2021) der Phosphorsäureproduktion [11] 38
Abbildung 15: Umweltnutzen der Phosphorrückgewinnung pro Jahr [11] 39
Abbildung 16: Landkarte "Phosphorrecycling Schweiz 2026" von «SwissPhosphor», Stand Januar 2021 [7] 40
Abbildung 17: Klärschlammentsorgung im Kanton Bern, Stand 2017 [15] 41
Abbildung 18: Klärschlammentsorgung Region 42

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Konzentrationen Schwermetalle im Faulschlamm der ARA Thunersee im Vergleich mit Schweizer Medianwerten 20
Tabelle 2: Schadstoffkonzentrationen im Faulschlamm der ARA Thunersee im Vergleich mit MinRec Grenzwerten 21
Tabelle 3: Auswahlkriterien für die Schlammverfahren 23
Tabelle 4: Auswahlkriterien für die Alternativverfahren 24
Tabelle 5: Reduktion der Schlammverfahren anhand definierter Auswahlkriterien 27
Tabelle 6: Reduktion der Longlist basierend auf Auswahlkriterien 27
Tabelle 7: Reduktion der Alternativverfahren anhand definierter Auswahlkriterien 28
Tabelle 8: Shortlist der Schlamm- und Alternativverfahren 28
Tabelle 9: Best-Verfahren der ARA Thunersee 36
Tabelle 10: Hochrechnung Kanton Bern. Gezeigt sind die Anteile der P-Fraktionen an Pges-Zulauf [5] 42

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ARA	Abwasserreinigungsanlage
β-Wert	eingesetzte Fällmittelmenge bezogen auf den gefällten Phosphor
BioP	Biologische Phosphorelimination durch PAO
$C_{P,A}$	Phosphor im Ablauf der ARA
ChemRRV	Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen
CSH	Calcium-Silikat-Hydrat
DüV	Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern
DWA	Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
$f_{P,BioP}$	Anteil biologischer P-Elimination an biologischem Sauerstoffbedarf im Zulauf
Fe	Eisen
GR	Glührückstand
I-TEQ	Internationale Toxizitätsäquivalente
KS	Klärschlamm
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
K_P	der auf die P-Fracht im Zulauf der Kläranlage bezogene Fällmittelverbrauch
LKW	Lastkraftwagen
MinRec	Mineralischer Recyclingdünger
MV-Stufe	Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen
P	Phosphor
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAO	Phosphor Akkumulierende Organismen
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Dioxine/Furane
SEA	Schlammentwässerungsanlage
SVA	Schlammverwertungsanlage
SVKI	Schweizerischer Verband Kommunale Infrastruktur
TRG	Technologiereifegrad
TSP	Tripelsuperphosphat
VBBo	Verordnung über Belastungen des Bodens
VBSA	Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen
VSA	Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen
$X_{P,BioP}$	bei der biologischen Phosphorelimination biologisch gebundener Phosphor

$X_{P,BM}$	in der Biomasse eingebauter Phosphor
$X_{P,Fäll}$	durch chemische Fällung eliminierter Phosphor
$X_{P,FällBB}$	durch chemische Fällung eliminierter Phosphor in den Belebungsbecken
$X_{P,FällMV}$	durch chemische Fällung eliminierter Phosphor in der MV-Stufe
$X_{P,VK}$	in der Vorklärung eliminierter Phosphor

ZUSAMMENFASSUNG

Im Jahr 2016 wurde bei der Überarbeitung der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm aufgenommen. Um dieser Pflicht nachzukommen ist die ARA Thunersee auf der Suche nach möglichen Verfahren. Bei der Verfahrenswahl sind nebst den gesetzlichen Anforderungen die spezifischen Voraussetzungen einer Abwasserreinigungsanlage ausschlaggebend. So verfügt die ARA Thunersee als eine der wenigen Anlagen der Schweiz über eine biologische Phosphorelimination (BioP). Die im Vergleich zu Anlagen mit chemisch gefälltem Phosphor, unterschiedliche Verteilung der Phosphor-Fraktionen im Klärschlamm erlaubt es, vielfältigere Rückgewinnungsverfahren in Betracht zu ziehen und anzuwenden. Als weiterer Gesichtspunkt ist bei der Verfahrenswahl die Nachhaltigkeit ein wichtiger Aspekt, welcher im Rahmen dieser Studie mitberücksichtigt wird.

Um die Verfahren und deren Rückgewinnungspotential beurteilen zu können, wurden mit Hilfe von Bilanzierungen und Laboruntersuchungen der Phosphor-Pfad, die Verteilung der Fraktionen des Phosphors sowie die Schadstoffbelastung im Klärschlamm untersucht. Dabei zeigte sich, dass davon auszugehen ist, dass die angegeben Rückgewinnungsquoten der Schlammverfahren gemäss Literatur für die ARA Thunersee überschätzt werden, da der BioP-Anteil durch die Eisendosierung in der MV-Stufe reduziert wird. Wird ein Schlammverfahren realisiert, muss daher die Eisendosierung dahingehend optimiert werden, dass der BioP-Anteil so hoch wie möglich ist, um die Rückgewinnungsquote zu erhöhen. Bei der Auswertung der Schadstoffuntersuchungen im Klärschlamm zeigte sich, dass bis auf die Quecksilberbelastung vergleichbare Belastungen wie auf anderen Anlagen vorliegen. Entsprechend ist bei der Beurteilung der Rezyklate die Schadstoffbelastung auch für die ARA Thunersee ein Aspekt, welcher berücksichtigt werden muss.

Als Grundlage für die Verfahrenswahl wurde eine umfangreiche Literaturrecherche über die aktuell existierenden Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung durchgeführt. Unter Berücksichtigung der definierten Rahmenbedingungen wurden 46 Verfahren in der Longlist zusammengetragen. Sowohl für die Schlammverfahren (Rückgewinnungsverfahren mit Umsetzungsmöglichkeit auf der ARA Thunersee) wie auch die Alternativverfahren (Rückgewinnungsverfahren mit externer Umsetzung) wurde in Zusammenarbeit mit der ARA Thunersee ein Kriterienkatalog ausgearbeitet, anhand welcher die Longlist auf eine Shortlist mit neun Verfahren reduziert wurde.

Von diesen Shortlist-Verfahren wurde im Anschluss die technische Umsetzbarkeit geprüft. Dabei wurden die Rahmenbedingungen auf der ARA Thunersee, der Entwicklungsstand und die Weiterentwicklung der Verfahren, die Rückgewinnungsquoten und Schadstoffbelastung der Rezyklate sowie die Entsorgungswege und der Umgang mit Fremdschlamm beurteilt. Aus der technischen Beurteilung resultiert eine Liste der Best-Verfahren. Der Hauptgrund weshalb Verfahren nicht in diese Liste mitaufgenommen wurden liegt daran, dass viele der Verfahren aufgrund von nicht erreichten Rückgewinnungsquoten und erhöhter Schadstoffbelastung der Rezyklate nicht mehr weiterentwickelt werden. So resultiert für die ARA Thunersee eine Liste mit drei Best-Verfahren:

- Das ExtraPhos®-Verfahren mit einem Aufschluss durch Eindüsung von CO_2 im Faulschlamm und Kristallisation des Phosphors im Filtrat zur Herstellung von mineralischem Phosphor
- Das LysoPhos®-Verfahren mit einer thermochemischen Hydrolyse des Überschussschlammes und Kristallisation des Phosphors im Filtrat zur Herstellung von mineralischem Phosphor

- Das Phos4Life®-Verfahren mit einer nasschemischen Extraktion des Phosphors aus der Klärschlammasche zur Herstellung von Phosphorsäure

Für diese drei Verfahren wurde in einem weiteren Schritt eine ökologische Beurteilung mit Hilfe der Methode der ökologischen Knappheit durchgeführt. Bei der Betrachtung der Rückgewinnungsverfahren mit der Vergleichsbasis 1 kg Dünger verursachen die Rückgewinnungsverfahren eine geringere Umweltauswirkung als der handelsübliche Mineraldünger. Innerhalb der Rückgewinnungsverfahren schliessen dabei die beiden betrachteten Schlammverfahren im Vergleich zum Phos4Life®-Verfahren besser ab. Weiter konnte gezeigt werden, dass es sinnvoll ist, die Rezyklate der beiden betrachteten Schlammverfahren möglichst direkt als mineralischen Recyclingdünger einzusetzen. Auf Grund dieser Resultate können für die Bereitstellung von mineralischem Recyclingdünger aus ökologischer Sicht die Verfahren ExtraPhos® und LysoPhos® empfohlen werden und weitere Abklärungen für die Implementierung auf der ARA Thunersee angegangen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass der Phosphor-Rückgewinnungsgrad beim Phos4Life®-Verfahren als Alternativverfahren rund drei Mal höher ist als bei den anderen Verfahren. Aus Sicht einer möglichst hohen Phosphorrückgewinnung ist daher das betrachtete Alternativerfahren zu bevorzugen.

In einem nächsten Schritt sollen daher die offenen Fragestellungen rund um die beiden Schlammverfahren der Best-Verfahren mithilfe von spezifischen Laborversuchen untersucht werden. Dies bildet die Basis für eine mögliche nachfolgende Pilotierung. Im Rahmen dessen sollen die Verfahren in Hinblick auf die Erhöhung der Rückgewinnungsquote und auf die Reduktion des Hilfsstoffverbrauchs, welcher die grösste ökologische Auswirkung verursacht, optimiert werden.
Parallel dazu sollen die offenen Aspekte der regionalen P-Rückgewinnungsstrategie, vor allem das Projekt mit der Verwertung des Rezyklates, sowie eine mögliche Integration der Klärschlamme der Region mit untersucht werden.
Kann mit diesen weiterführenden Untersuchungen die Machbarkeit des Schlammverfahrens sowie die Verwertung des Rezyklats bestätigt werden, so sollte der nachhaltige, regional geschlossene Phosphorkreislauf weiterverfolgt und in einem nächsten Schritt die Fragestellungen rund um die finanziellen und rechtlichen Aspekte sowie der Zuständigkeit angegangen werden.

1 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

1.1 AUSGANGSLAGE

Basierend auf den rechtlichen Grundlagen und Vorgaben sind ab dem 1. Januar 2026 nach dem Stand der Technik 50% des Phosphors aus dem Inputstrom eines Rückgewinnungsverfahrens stofflich in den Wirtschaftskreislauf zurückzuführen.

Die ARA Thunersee ist nun auf der Suche nach einem nachhaltigen Rückgewinnungsverfahren, um der Pflicht zur Phosphorrückgewinnung nachzukommen.

Verschiedene Verfahren sind dafür in Entwicklung. Allerdings existieren aktuell im industriellen Massstab keine Verfahren, welche die gesetzlichen Vorgaben erfüllen. Zudem spielen für die Wahl des Verfahrens auch die verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen auf der jeweiligen Abwasserreinigungsanlage (ARA) eine Rolle.

Ziel der Studie ist es daher, zu untersuchen

- welche Verfahren für die ARA Thunersee technisch umsetzbar sind
- welche ökologischen Auswirkungen diese Verfahren haben

Dabei wird der Fokus auf den auf der ARA Thunersee anfallenden Klärschlamm gelegt. Fremdschlamm, der auf der ARA entwässert wird, wird bei der Verfahrenswahl nicht berücksichtigt. Weiter werden die Qualität und der Absatzmarkt des Rezyklats sowie die Wirtschaftlichkeit im Rahmen dieser Studie nicht beurteilt. Da es derzeit nur wenige grosstechnischen Verfahren gibt, die eine Rückgewinnungsquote von mindestens 50% erreichen, wird im Rahmen dieser Studie keine bestimmte Rückgewinnungsquote gefordert. Vielmehr wird die Quote als Orientierungswert verstanden.

1.2 VORGEHEN

Die HOLINGER AG wurde im Rahmen dieser Suche beauftragt eine Machbarkeitsstudie durchzuführen. Als Grundlage für die Studie werden in einem ersten Schritt die Online- und Labordaten mit spezifischen Analysen ergänzt und ausgewertet, um zu beurteilten wo und in welcher Form der Phosphor auf der ARA Thunersee vorkommt. Weiter wird eine umfangreiche Literaturrecherche über die aktuell existierenden Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung (Longlist) durchgeführt. Basierend auf den Erkenntnissen der Grundlagen sollen potenzielle Verfahren identifiziert (Shortlist) und auf ihre technische Umsetzbarkeit geprüft werden. Anhand dieser Überprüfung werden für die für die ARA Thunersee am besten geeignete Verfahren, die Best-Verfahren definiert. Weiter werden anhand einer ökologischen Betrachtung, welche durch die Firma Carbotech AG erarbeitet wurde, die identifizierten Best-Verfahren bezüglich Nachhaltigkeit einander gegenübergestellt.

Um den Einfluss der Verfahrenswahl auf den kantonalen Klärschlamm-Entsorgungsplan zu beurteilen, werden als Ergänzung die Eckpfeiler einer regionalen P-Rückgewinnungsstrategie identifiziert.

Anhand der Ergebnisse der Machbarkeitsstudie sollen die nächsten Schritte für eine Testphase im Labor- und Pilotmassstab aufgezeigt werden (nicht Bestandteil dieser Machbarkeitsstudie). In der etwaigen nächsten Phase sollen auch die ökonomischen Aspekte der ausgewählten Technologien sowie die Absatzfähigkeit des Rezyklats vertiefter untersucht werden.

2 GRUNDLAGEN

2.1 SITUATION ARA THUNERSEE

Die ARA Thunersee behandelt das Abwasser von 36 Gemeinden mit rund 125'000 Einwohnern bei insgesamt rund 155'000 Einwohnergleichwerten. Auf der ARA Thunersee wird das Abwasser zunächst in der mechanischen Reinigungsstufe von groben und feinen Feststoffen befreit. Nachdem in der Vorklärung sedimentierbare Stoffe entfernt worden sind, wird das Abwasser in der biologische Reinigungsstufe mit einer biologischen Phosphorelimination gereinigt. Durch das Wachstum der Mikroorganismen im Belebtschlamm werden Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor aus dem Abwasser entfernt und in den Zellen eingebaut respektive veratmet. Seit 2018 verfügt die ARA Thunersee über eine Pulveraktivkohle (PAK)-Dosierung zur Elimination von Mikroverunreinigungen (MV-Stufe). Durch die Dosierung von Eisensalzen und Flockungshilfsmitteln werden die beladenen Aktivkohleflocken in Sedimentationsbecken abgetrennt. Um die Adsorptionskapazität der Pulveraktivkohle vollständig auszunutzen, wird der PAK-Überschussschlamm (Überschusskohle) zusammen mit dem Rücklaufschlamm in die Biologie geleitet (siehe Abbildung 1). Das gereinigte Abwasser gelangt anschliessend in die Filtration, wo die verbliebenen Partikel entfernt werden. Falls notwendig kann im Zulauf der Filtration Eisen nachdosiert werden.

Der in der Biologie anfallende Schlamm wird zusammen mit dem Primärschlamm aus den Vorklärbecken in einer mesophilen Schlammfaulung stabilisiert. Das entstehende Biogas wird auf Erdgasqualität aufbereitet und in das Gasnetz der Energie Thun AG eingespeist. Der ausgefaulte Schlamm wird zusammen mit ausgefaultem Schlamm von umliegenden A-RAs (Fremdschlamm) in einer Schlammentwässerungsanlage (SEA) entwässert und in der KVA Thun (AVAG) thermisch verwertet. Das Zentrat der Schlammentwässerung wird zur Reduktion der Ammonium-Fracht mit dem DEMON®-Verfahren behandelt und anschliessend in den Zulauf der ARA zurückgeführt.

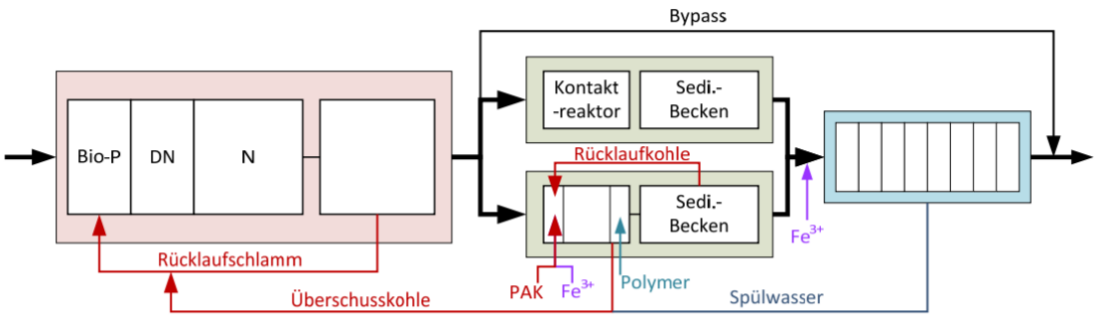


Abbildung 1: Schematische Darstellung der biologischen (rot) und MV-Stufe mit PAK-Reaktoren (grün) und Filtration (blau) inkl. Eisen-Dosierung und Kohlerückführung, Quelle: ARA Thunersee

Als Grundlage für die Machbarkeitsstudie wurden die Jahresberichte und kompletten Betriebsdaten seit der Inbetriebnahme der MV-Stufe im August 2018 verwendet. Weiter konnte auf eine vorhandene Phosphorbilanz der Anlage aus dem Jahr 2016 zurückgegriffen werden.

2.2 RECHTLICHE GRUNDLAGEN UND VORGABEN

2.2.1 Einleitung

Die relevanten rechtlichen Vorgaben inkl. Vollzugshilfen im Rahmen der Pflicht zur Phosphorrückgewinnung (gemäss Kapitel 2.2.2) sind in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführt.

In der Schweiz muss gemäss Vollzugshilfe (siehe Kapitel 2.2.3) eine Rückgewinnungsquote von 50% bezogen auf den Prozessinput erreicht werden. Im Gegensatz dazu wird in Deutschland unterschieden, ob eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm oder aus Klärschlammasche erfolgt. So muss in Deutschland beim Input Klärschlamm eine Abreicherung der Phosphorkonzentration auf kleiner 20 g P/kg TR erreicht werden oder mindestens 50% des in der Trockenmasse enthaltene Phosphor aus dem Klärschlamm selbst bzw. mindesten 80% des in der Klärschlammasche enthaltene Phosphor nutzbar gemacht werden [24].

Wird das gewonnene Phosphor-Rezyklat in der Schweiz als Dünger verwendet, müssen gemäss Kapitel 2.2.4, die Anforderungen für mineralische Recyclingdünger (MinRec-Dünger) (siehe Kapitel 2.2.5) eingehalten werden.

2.2.2 Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) Stand 01.01.2021 [21]

Art. 15:

[1] Aus kommunalem Abwasser, aus Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen oder aus der Asche aus der thermischen Behandlung von solchem Klärschlamm ist Phosphor zurückzugewinnen und stofflich zu verwerten.

[3] Bei der Rückgewinnung von Phosphor aus Abfällen nach Absatz 1 oder 2 sind die in diesen Abfällen enthaltenen Schadstoffe nach dem Stand der Technik zu entfernen. Wird der zurückgewonnene Phosphor für die Herstellung eines Düngers verwendet, so müssen zudem die Anforderungen Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4 ChemRRV [23] erfüllt sein.

Art. 51:

Die Pflicht zur Rückgewinnung von Phosphor nach Artikel 15 gilt ab dem 1. Januar 2026.

2.2.3 Modul der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) Stand 20.01.2021 [9]

Kapitel 2.1.1 Quantitative Anforderungen an die Phosphorrückgewinnung:

Aus Schlammwasser, Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen oder aus der Asche der thermischen Behandlung von Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen ist die Phosphorfracht im Prozessinput zurückzugewinnen. In diesem Input (= Prozessinput = Schlammwasser = Klärschlamm = Asche) ist Phosphor enthalten (= Phosphorfracht). Dieser Phosphor, der im Input vorhanden ist, muss zurückgewonnen werden. Nach dem Stand der Technik gilt, dass für Anlagen der Anteil der zurückgewonnenen Phosphorfracht mindestens 50 % beträgt.

Kapitel 2.1.2 Qualitative Anforderungen an die Phosphorrückgewinnung:

Bei der Rückgewinnung von Phosphor aus phosphorreichen Abfällen sind Schadstoffe gemäss Artikel 15 Absatz 3 VVEA [21] grundsätzlich nach dem Stand der Technik zu entfer-

nen, wenn der zurückgewonnene Phosphor zur Herstellung eines Düngers verwendet werden soll. Diese Vorgabe gilt dann als erfüllt, sofern die Anforderungen Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4 ChemRRV [23] eingehalten werden.

Wird der zurückgewonnene Phosphor anderweitig stofflich verwertet (z. B. als Phosphorsäure), ergeben sich die Vorgaben bezüglich Schadstoffentfernung aus den jeweiligen marktseitigen, für den Verwendungszweck spezifischen Anforderungen.

2.2.4 Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern (Dünger-Verordnung, DüV) Stand 01.01.2019 [22]

Art. 5:

2 c^{bis} mineralische Recyclingdünger: Dünger mit teilweise oder vollständig aus der kommunalen Abwasser-, Klärschlamm- oder Klärschlammaschenaufbereitung gewonnenen Nährstoffen.

2.2.5 Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV) Stand 01.03.2021 [23]

Anhang 2.6 Ziffer 2.1:

2 Klärschlamm darf nicht abgegeben werden.

Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4.

1 Der anorganische Schadstoffgehalt von mineralischen Recyclingdüngern mit zurückgewonnenem Phosphor darf die folgenden Grenzwerte nicht überschreiten:

Schadstoff	Grenzwert in Gramm pro Tonne Phosphor (P)
Blei (Pb)	500
Cadmium (Cd)	25
Kupfer (Cu)	3 000
Nickel (Ni)	500
Quecksilber (Hg)	2
Zink (Zn)	10 000
Arsen (As)	100
Chrom (Cr)	1 000

2 Der organische Schadstoffgehalt von mineralischen Recyclingdüngern mit zurückgewonnenem Phosphor darf die folgenden Grenzwerte nicht überschreiten:

Schadstoff	Grenzwert
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	25 Gramm pro Tonne Phosphor (P)[1]
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	0,5 Gramm pro Tonne Phosphor (P)[2]
Dioxine (PCDD) und Furane (PCDF)	120 Nanogramm I-TEQ pro Kilogramm Phosphor (P)[3]

1 Summe der folgenden 16 PAK-Leitverbindungen der EPA (Priority pollutants list): Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthen, Pyren, Benzo(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthen, Benzo(k)-fluoranthen, Benzo(a)pyren, Indeno(1,2,3-c,d)pyren, Dibenzo(a,h)anthracen und Benzo(g,h,i)perylen
2 Summe der 7 Kongeneren gemäss IRMM (Institute for Reference Materials and Measurements), IUPAC-Nr. 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180
3 I-TEQ = Internationale Toxizitätsäquivalente

[3] Mineralische Recyclingdünger mit zurückgewonnenem Stickstoff oder Kalium dürfen die Grenzwerte für Recyclingdünger nach Ziffer 2.2.1 nicht überschreiten.

2.3 STUDIEN ZUR PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG

Im Zusammenhang mit der Umsetzung der neuen Phosphor-Strategie der Schweiz wurden unter anderem folgende zwei Studien durch das BAFU in Auftrag gegeben:

a. 1. Studie «Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung», EBP im Auftrag des BAFU, Januar 2017

b. 2. Studie «Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung», EBP im Auftrag des BAFU April 2019

Beide Studien geben insbesondere über die sogenannten Ascheverfahren (Rückgewinnung des Phosphors aus der Klärschlammasche) einen guten Überblick und zeigen den aktuellen Stand auf.

Mögliche Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser der kommunalen ARA werden nur in der ersten Studie erwähnt. Gründe für den Fokus auf die Ascheverfahren sind einerseits der höhere Technologiereifegrad (TRG) dieser Verfahren, andererseits dass die Mehrheit der Schweizer ARAs mit einer chemischen Eisenfällung betrieben werden.

Eine weitere Grundlage bildet die im Jahr 2019 durch die Deutsche Phosphor Plattform publizierte Studie:

c. "Phosphorrecycling: Wer, wie, was?".

In dieser Studie werden neben den Ascheverfahren ebenfalls mögliche Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus dem Schlammwasser thematisiert. Diese Verfahren sind in Deutschland von grösserer Bedeutung, da die biologische Phosphor-Elimination (BioP) weiterverbreitet ist als in der Schweiz.

2.4 PROJEKT «SWISSPHOSPHOR»

Um die Umsetzung der Phosphorrückgewinnung gemäss Art. 15 VVEA [21] voranzutreiben, braucht es die Zusammenarbeit aller wichtigen Akteure – Bund, Kantone, Gemeinden, ARA, Klärschlamm-Trocknungsanlagen, KVA, Zementwerke, Klärschlamm-Mono-verbrennungsanlagen, Landwirtschaft und Düngerhersteller. Deshalb hat das BAFU im September 2018 die Arbeiten für «SwissPhosphor» gestartet. Das Projekt «SwissPhosphor» fördert den Austausch und die Zusammenarbeit zwischen den potenziellen Akteuren und hat das Ziel, eine

Planung mit konkreten Anlagen und Kapazitäten für die Schweizerische Phosphorrückgewinnung zu erarbeiten. Dabei sind die Interessen der Akteure zu erfassen und deren Projekte zu koordinieren. Das Vorgehen erfolgt in Form eines partizipativen Prozesses, d.h. die Interessen der Akteure werden geklärt und mit einbezogen. «SwissPhosphor» fokussiert auf folgende vier Schwerpunkte:

- Kommunikation (Politik, Medien, Bevölkerung)
- Koordination (Mengengerüste, Kapazitäten, Entsorgungssicherheit, Kooperationen und technisches Know-how)
- Abklärung und Diskussion möglicher Finanzierungmodelle der Phosphor-Rückgewinnung
- Markt für Phosphor-Rezyklat (Edukte, Produkte, Entwicklung)

Im Sinne des Partizipationsprozesses hat «SwissPhosphor» den Input der Akteure an der Startveranstaltung (Forum 1 am 19. März 2019 in Ittigen) abgeholt und diskutiert. Diese sind im Grundlagenbericht «SwissPhosphor» [8] zusammengefasst. Zusätzlich werden die rechtlichen Grundlagen, das internationale Umfeld, der Ist-Zustand der Klärschlammentsorgung in der Schweiz, Ideen, Projekte und Stossrichtungen der Akteure auf dem Gebiet der Phosphorrückgewinnung wie auch die mögliche Vermarktung von Phosphor-Rezyklaten behandelt. Basierend auf diesem Bericht und den Ergebnissen und Rückmeldungen der Mitwirkungsgrunde erarbeitete das Kernteam ein Planungsdokument Planung 2.1 «SwissPhosphor» [10]. Resultate des Planungsdokumentes sind unter anderem eine Planungsgrundlage mit möglichen Szenarios für die Rückgewinnung in der Schweiz (siehe Kapitel 8.1) sowie die Definition der Vision 2036 mit den Strategischen Zielen bis 2028.

Ab Herbst 2021 wird das Projekt unter der Leitung eines strategischen Lenkungsgremiums weitergeführt. An Jour fixe erfolgt der Austausch zwischen Bund, Kantone, ARA, SVKI, VBSA, VSA, Cemsuisse, Düngerverband und Bauernverband. Es werden Arbeitsgruppen gebildet, die die Fragestellungen des Planungsdokumentes der folgenden vier Schwerpunkte weiterbearbeiten:

- Planung
- Finanzierung
- Technik
- Produkte

2.5 STRATEGIE PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG KANTON BERN

In einem Statusbericht [4] hat der Kanton Bern im Jahr 2020 der aktuelle Stand der Phosphorrückgewinnung aus Sicht AWA, sowie seine Haltung und das weitere Vorgehen zusammengefasst.

Dabei werden unter anderem folgende Punkte hervorgehoben:

- Verfahren: Für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm existiert noch kein anerkannter Stand der Technik. Es fehlt ein ganzheitliches Verfahren zur Schliessung des Stoffkreislaufes. Das AWA bevorzugt ein rückstandfreies Rückgewinnungsverfahren.
- Umweltverträglichkeit: Zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit der verschiedenen Verfahren fehlen die Daten. Die Umweltverträglichkeit der gewählten Verfahren ist ein wichtiger Entscheidungsfaktor.
- Kosten: Die Kosten der verschiedenen Verfahren sind mit grossen Unsicherheiten behaftet.

3 PHOSPHOR AUF DER ARA THUNERSEE

3.1 PHOSPHOR-PFAD

Um die Phosphormengen in den einzelnen Strömen der Kläranlage zu quantifizieren und zu verifizieren, wurden für die Jahre 2019 und 2020 die Stoffströme auf der ARA dargestellt. Mithilfe von Massenbilanzen wurde eine generelle Prüfung der Messdaten auf systematische Abweichungen durchgeführt. In den Massenbilanzen wurde bei den Widersprüchen entsprechend der VSA Empfehlung [26] eine Zielgrösse von ≤10% von der Summe der Inputstofffrachten angestrebt.

Als Basis wurden die Bilanzen aus dem Jahr 2016 (siehe Kapitel 2.1) verwendet und durch die im Sommer 2018 in Betrieb genommene MV-Stufe ergänzt. Im Anhang 1 sind die Stoffströme und Massenbilanzen dargestellt. Basierend auf der Beurteilung der Widersprüche wurden keine systematischen Abweichungen bei den Online- und Labordaten festgestellt.

Die Resultate der Auswertung wurden mit der Darstellung der wichtigsten Phosphorströme in der Abbildung 2 zusammengefasst. Die höchste Phosphor-Fracht findet sich mit rund 310 kg P/d im Strom "Beschickung SEA", davon fallen rund 260 kg P/d aus dem eigenen Faulschlamm und weitere rund 45 kg P/d aus dem Fremdschlamm an.

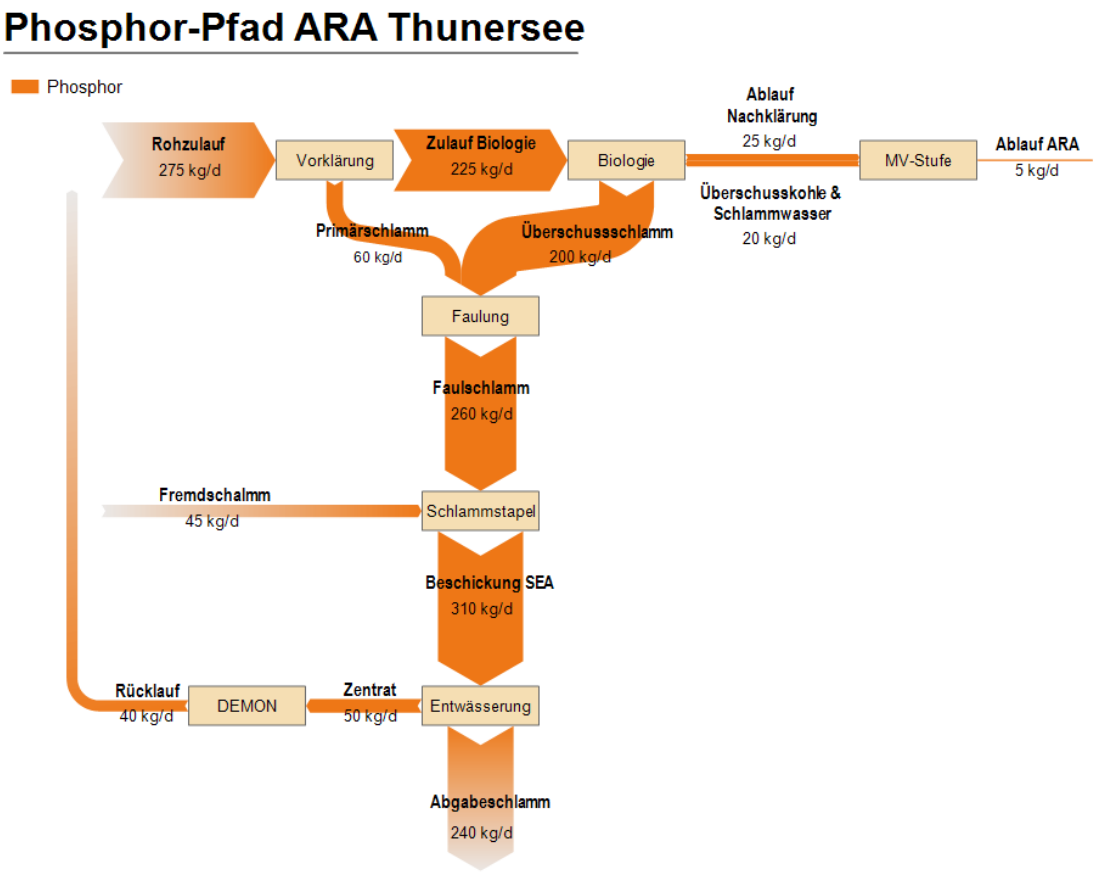


Abbildung 2: Wichtigste Phosphorströme der ARA Thunersee, Stand 2020, mit Unsicherheiten von rund 10%

3.2 PHOSPHORFRAKTIONIERUNG

Die Verfügbarkeit des Phosphors für die verschiedenen Rückgewinnungsverfahren ist abhängig davon, in welcher Form der Phosphor im Inputstrom des Verfahrens vorliegt. Auf der Kläranlage kommt Phosphor im Klärschlamm in verschiedensten Fraktionen vor. Abhängig vom Verfahren der ARA, insbesondere der Phosphorelimination, ändert sich die Verhältnisse der Fraktionen in den Schlämmen.

Um die Anteile der einzelnen Phosphorfraktionen im Schlamm der ARA Thunersee zu quantifizieren wurden zwei Ansätze angewendet:

- Rechnerische Fraktionierung gemäss DWA-ATV [2]:
  Für die Fraktionierung nach DWA-ATV [2] wurden die Daten 2020 ausgewertet und die einzelnen Fraktionen, unter Berücksichtigung eines β-Werts von 1 (die relative Fällmittelmenge bezogen auf den zu fällenden Phosphor), berechnet. Die Berechnung ist im Anhang 3 dargestellt.
  Es können folgende Phosphorfraktionen im Schlamm bestimmt werden:
    - $X_{P,VK}$: In der Vorklärung physikalische eliminierter Phosphor
    - $X_{P,Fäll}$: In der Biologischen und MV-Stufe mit Eisensalzen gefällter Phosphor
    - $X_{P,BioP}$: Biologisch eliminierter Phosphor (BioP)
    - $X_{P,BM}$: In der Biomasse inkorporierter Phosphor
- Eluattests nach Uhlmann [26]:
  Die Eluattests nach Uhlmann [26] wurden durch die Envilab AG durchgeführt (siehe Anhang 2) und erlauben die Bestimmung von neun Phosphor-Faktionen :
    - 1. Gelöste und adsorbierte Phosphate
    - 2. Gelöste Polyphosphate und Bruchstücke
    - 3. Chemisch an Fe gebundenes und an $Fe(OH)_3$ adsorbiertes Phosphat
    - 4. Zellphosphat
    - 5. An $Al(OH)_3$ adsorbierte und durch OH^- lösbares oder austauschbares Phosphat
    - 6. Hauptteil des organischen Phosphats, Polyphosphate
    - 7. Ca^- + Mg^- + ev. Al^- Phosphate
    - 8. Übriger organischer Phosphor
    - 9. "nicht extrahierter" Phosphor

Beim DWA-Ansatz wurde zur Überprüfung der Verlässlichkeit der Resultate basierend auf den Fraktionen die Kennzahl K_P, als der auf die Phosphor-Tagesfracht im Zulauf der Kläranlage bezogene Fällmittelverbrauch pro Tag, sowie der Faktor $f_{P,BioP}$, als der Anteil der biologischen P-Elimination in Abhängigkeit der CSB Konzentration im Zulauf Biologie berechnet. Mit einem mittleren K_P-Wert von 11 mol Me/kg P sowie einem $f_{P,BioP}$-Faktor von 1.4%, weist die ARA Thunersee mit den Erfahrungswerten gemäss DWA [3] (K_P: 11 mol Me/kg P / $f_{P,BioP}$ bei vorgeschaltetem Anaerobbecken = 1.0 bis 1.5%) übereinstimmende Kennzahlen auf. Bei den Eluattests diente der Vergleich der Analyseresultate mit den Daten der Bilanzierung 2020 sowie eine Phosphor- und Eisenbilanzierung innerhalb der Proben der Plausibilisierung.

Die Abbildung 3 zeigt die Resultate der P-Fraktionierung nach DWA-ATV. Der Anteil an Phosphor, welcher mechanisch in der Vorklärung eliminiert wird ($X_{P,VK}$), sowie der Anteil, welcher an der Biomasse gebunden wird ($X_{P,BM}$) ist über das Jahr relativ konstant. Dies wird auch durch die vergleichbaren Werte im Rahmen des Eluattests bestätigt.

Mit der Fällmitteldosierung zur Flockung der Pulveraktivkohle in der MV-Stufe wird der im Ablauf der Nachklärung vorhandene Phosphor grösstenteils chemisch gefällt ($X_{P,FällMV}$). Der Anteil an Phosphor im Ablauf der ARA ($C_{P,A}$) ist dadurch sehr gering. Mit dem im Schlammwasser aus der MV-Stufe in die Belebungsbecken zurückgeführten Fällmittel wird ein weiterer Teil des Phosphors chemisch gefällt ($X_{P,FällBB}$).

Übrig bleibt der Anteil an Phosphor, welcher durch die biologische Phosphorelimination gebunden wird ($X_{P,BioP}$). In den Wintermonaten zeigt die Anlage trotz kälterer Abwassertemperaturen eine ausgeprägte BioP-Elimination. In den Sommermonaten ist die BioP-Elimination reduziert. Als möglicher Grund wird ein höherer Vorabbau von leicht abbaubaren Kohlenstoffen in der Kanalisation und das damit verbundene Fehlen dieser Kohlestoffquellen in der BioP-Stufe vermutet.

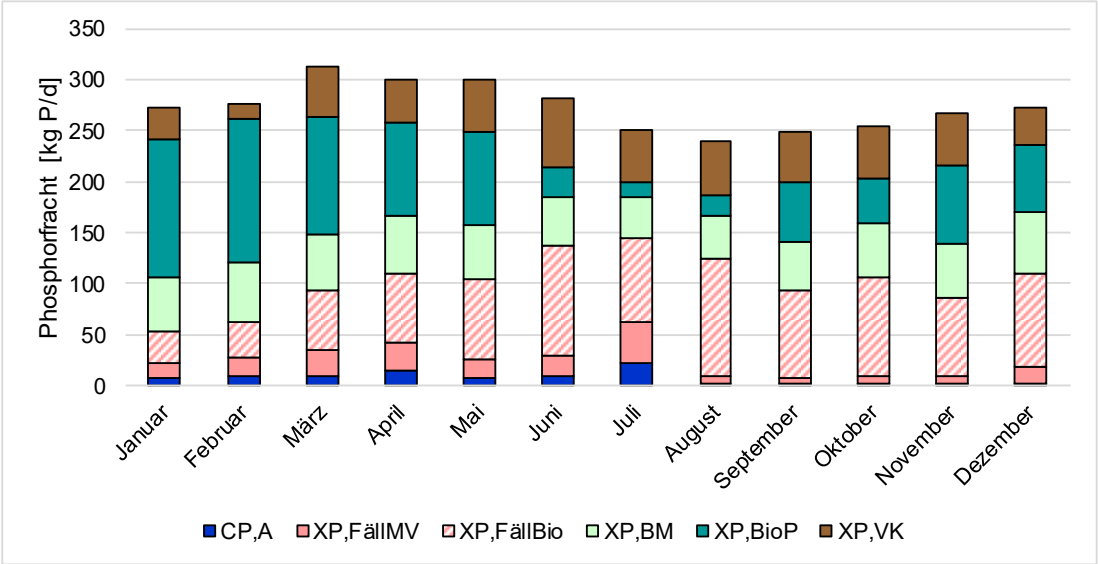


Abbildung 3: P-Fraktionierung nach DWA-ATV, Daten 2020

Die mit dem zweiten Ansatz durchgeführten Eluattests erlauben eine weitergehende Beurteilung der Phosphor Fraktionen. Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Zusammensetzungen im Primär- und Überschussschlamm nur leicht unterscheiden. Demgegenüber zeigt sich im Vergleich des Frischschlammes, berechnet aus Primär- und Überschussschlamm, mit dem Faulschlamm eine deutliche Veränderung (siehe Abbildung 4). Während der Faulung reduziert sich der organisch gebundene Phosphoranteil von rund 30% auf 10%. Dafür nimmt der Anteil an gelöstem Phosphat sowie der "nicht extrahierter P" (Vermutlich Eisenphosphat und Apatit) zu. Dies lässt darauf schliessen, dass bei einem Rückgewinnungsverfahren aus Frischschlamm voraussichtlich mit einfacheren Methoden eine höhere Rückgewinnungsquote erreicht werden kann als bei Faulschlamm als Inputstrom.

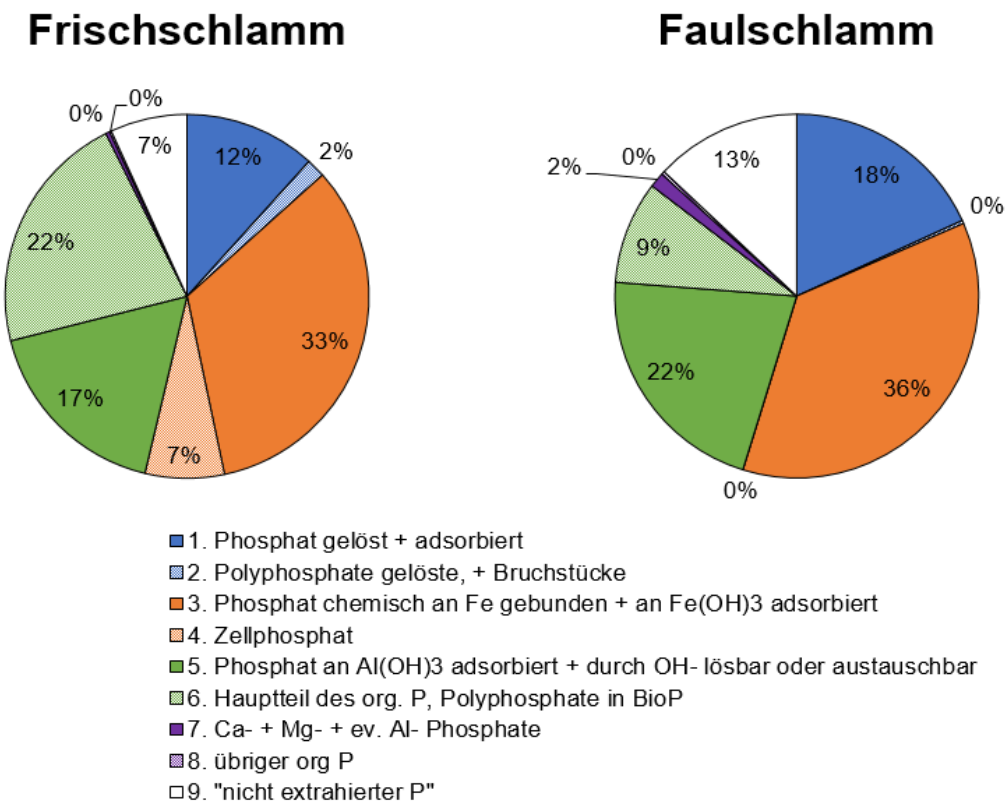


Abbildung 4: Anteile der Phosphorfraktionen gemäss Eluattests Mai 2021

Für den Vergleich der beiden Ansätze wurde die Zusammensetzung des Frischschlamms ausgewertet (siehe Anhang 3). Dabei zeigt sich, dass beim Eluattest vom Mai 2021 der BioP-Anteil verglichen mit der DWA Auswertung etwas geringer ausfällt und der durch Eisen gefällte Phosphor Anteil höher liegt. Die Fraktionen des physikalisch eliminierten sowie des in die Biomasse inkorporierten Phosphors sind vergleichbar. Im Rahmen der Weiterführung des Projektes können Eluattests im Schlamm einer Anlage mit Eisenfällung interessante Aspekte für die Eignung von Schlammverfahren liefern. Zudem sollte zur Beurteilung der Relevanz der jahreszeitlichen Schwankungen, welche mit dem DWA-Ansatz aufgezeigt werden konnten, Eluattests in verschiedenen Monaten durchgeführt werden.

Aufgrund der Auswertung der Phosphor-Fraktionierung ist davon auszugehen, dass die angegeben Rückgewinnungsquoten der Schlammverfahren gemäss Literatur für die ARA Thunersee überschätzt werden, da der BioP-Anteil durch die Eisendosierung in der MV-Stufe reduziert wird. Wird ein Schlammverfahren realisiert muss daher die Eisendosierung dahingehend optimiert werden, dass der BioP-Anteil so hoch wie möglich ist, um die Rückgewinnung zu erhöhen. Im Gegensatz dazu kann bei der Wahl eines Alternativverfahrens der leicht verfügbare Phosphor aus der BioP-Elimination einfacher zurückgewonnen werden und so die Quote erhöhen.

3.3 SCHADSTOFFE IM KLÄRSCHLAMM

Mineralischer Phosphor ist immer auch mit geogenen Schadstoffen befrachtet, wobei die jeweilige Zusammensetzung von der Lagerstätte abhängt. Ebenso können Phosphate aus Abfallströmen mit Schadstoffen belastet sein. In mineralischem Recyclingdünger aus Klärschlammen sind dies vor allem Schwermetalle aus dem Abwasser, welche im Schlamm in

aufkonzentrierter Form vorliegen. Gemäss Art. 15 VVEA [21] sind in den Rückgewinnungsverfahren Schadstoffe nach dem Stand der Technik zu entfernen. Weiter muss der zurückgewonnene Phosphor die Anforderungen gemäss Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4 ChemRRV [23] einhalten, wenn dieser für die Herstellung eines Düngers verwendet wird (siehe Kapitel 2.2.2). Entsprechend müssen Rückgewinnungsverfahren dahingehend optimiert werden, dass ein möglichst geringer Teil dieser Schwermetalle aufgeschlossen wird, oder dass die unterwünschten Schwermetalle über Abscheidemethoden aus dem Phosphor-Rezyklat entfernt werden.

Um auffällige Schadstoffkonzentrationen im Klärschlamm der ARA Thunersee aufzuzeigen, wurden im Rahmen dieser Studie die vorhandenen Schadstoffanalysen mit zusätzlichen Analysen ergänzt und ausgewertet (siehe Anhang 4).

Zum einen wurden die Schadstoffkonzentrationen mit den Median- und Maximal-Werten Schweizer Klärschlämme [1], [5], [18], [27] verglichen. Die Tabelle 1 zeigt, dass die Schwermetallkonzentrationen des Faulschlamms der ARA Thunersee generell im Bereich der Medianwerte liegen und der typischen Rangordnung (Zink > Kupfer > Chrom > Nickel > Cadmium) entsprechen [1], [5]. Die Schwermetalle Arsen, Nickel und Quecksilber liegen hingegen über den Medianwerten und sind daher auffällig. Der Arsen- und Nickel-Wert liegt jedoch deutlich unter den Maximalwerten von 80 mg As/kg TR respektive 67 mg Ni/kg TR in Klärschlämmen von anderen ARAs [1]. Bei Quecksilber wurde bereits im Rahmen der EAWAG Studie [5] in der Probe der ARA Thunersee die höchsten Werte (1.4 mg/kg) gemessen. Die hohen Quecksilbereinträge deuten auf eine punktuelle Quelle hin. Im Einzugsgebiet der ARA Thunersee ist ein Unternehmen angesiedelt, welches Quecksilberabfälle aus ganz Europa aufbereitet. Es ist davon auszugehen, dass die vergleichsweise hohen Konzentrationen daher stammen.
Bei der organischen Belastung liegt die PCB und PAK Belastung unter dem Medianwert. Bei einer Analyse lag die Dioxine/Furane-Konzentration mit 910 ng I-TEQ/kg TS rund 100-fach über dem Medianwert der Literatur. Mit der zweiten Bestimmung des Parameters wurde diese hohe Belastung nicht bestätigt. Die Konzentration der zweiten Analyse lag im Bereich des Mediawertes. Es wird davon ausgegangen, dass es bei der ersten Analyse zu einer Fehlmessung kam. Entsprechend wurde der zweite Messwert im Rahmen dieser Studie berücksichtigt und muss bei der Weiterführung des Projekts verifiziert werden.

Tabelle 1: Konzentrationen Schwermetalle im Faulschlamm der ARA Thunersee im Vergleich mit Schweizer Medianwerten

mg/kg TR	Median Literatur Schweiz	Median Faulschlamm ARA
Arsen [1]	3	**6 ***
Blei [1]	38	33
Cadmium [1]	1.4	1.0
Chrom [1]	46	28
Kupfer [1]	301	235
Nickel [1]	13	**21**
Quecksilber [2]	0.7	**1.2**
Zink [1]	1'000	738
PAK [3]	6.7	0.64 **
PCB [3]	0.094	0.023 **
PCDD/F [4]	0.00001	0.00001 ***

[1] [25], [2] [6], [3] [18], [4] [27],
*** Einzelanalyse März 2021, ** Einzelanalyse März + Juni 2021, *** Einzelanalyse Juni 2021)**

Weiter wurde die spezifische Belastung [mg Schadstoff / kg Phosphor] ausgewertet (siehe Tabelle 2). Dies erlaubt den Vergleich der Schadstoffkonzentrationen im Klärschlamm mit den Grenzwerten für mineralischer Recyclingdünger gemäss Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4. ChemRRV [23] und gibt einen Hinweis auf mögliche Problematiken beim Rückgewinnungsverfahren und der Absatzfähigkeit des Rezyklats.

Die Schadstoffe Cadmium, Chrom, Nickel und PAK liegen im Faulschlamm im Bereich des Grenzwertes. Bei Arsen, Blei, Kupfer und Zink sowie PCB und PCDD/F finden sich rund doppelt so hohe Konzentrationen im Vergleich zum Grenzwert. Auch bei der Konzentration in Relation zu Phosphor ist der Quecksilber-Wert mit einer 18-fach höherer Wert als der Grenzwert am auffälligsten.

Tabelle 2: Schadstoffkonzentrationen im Faulschlamm der ARA Thunersee im Vergleich mit MinRec Grenzwerten

mg/kg P	Grenzwert MinRec [1] Schweiz	Median Faulschlamm ARA
Arsen	100	**175 ***
Blei	500	**950**
Cadmium	25	**29**
Chrom	1'000	821
Kupfer	3'000	**6'761**
Nickel	500	**626**
Quecksilber	2	**36**
Zink	10'000	**22'110**
PAK	25	19 **
PCB	0.25	**0.66 ****
PCDD/F	0.00012	**0.00027 *****

[1] Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4 ChemRRV [23],
*** Einzelanalyse März 2021, ** Einzelanalyse März + Juni 2021, *** Einzelanalyse Juni 2021)**

Grundsätzlich sind bei der Herstellung eines Düngers aus dem Klärschlamm der ARA Thunersee bezüglich der Schadstoffentfernung mit den gleichen Herausforderungen zu rechnen, wie bei den anderen Kläranlagen der Schweiz. Einzig beim Quecksilber zeigt sich im Vergleich eine deutlich höhere Belastung, welche spezifisch berücksichtigt werden muss.

4 LITERATURRECHERCHE ZU PHOSPHORRÜCKGEWINNUNGSVERFAHREN

4.1 FOKUS UND RAHMENBEDINUNGEN

Obwohl bereits einige Studien zum Thema Phosphorrückgewinnung in der Schweiz veröffentlicht wurden (siehe Kapitel 2.3), hat sich die ARA Thunersee entschieden eine erweiterte Literaturrecherche in Auftrag zu geben.

Grund hierfür ist, dass der Fokus der vergangenen Studien vor allem auf den Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche lag. Die ARA Thunersee ist aber eine der wenigen BioP-Anlagen in der Schweiz. Diese Betriebsführung macht die P-Rückgewinnung aus dem Schlamm respektive dem Zentrat der Schlammentwässerung möglich und attraktiv. Um herauszufinden, mit welchen Verfahren Phosphor direkt auf der ARA zurückzugewonnen werden kann, wurden in dieser Studie neben den Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche (Alternativverfahren) auch die Verfahren zur P-Rückgewinnung aus dem Frisch- oder Faulschlamm (Schlammverfahren) berücksichtigt.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde ein Überblick über die aktuell möglichen und für die Schweiz relevanten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm gewonnen. Folgende Rahmenbedingungen wurden zu Beginn der Recherche festgelegt:

- Deutschsprachiger Raum mit Fokus auf die Schweiz und Deutschland
- Eingrenzung des Untersuchungszeitraumes für
    - Wissenschaftliche Studie: nicht älter als 2015
    - Verfahren in der Praxis: nicht älter als 2010

4.2 VORGEHENSWEISE UND AUSWAHLKRITERIEN

Die Literaturrecherche gliedert sich in zwei Arbeitspakete (Abbildung 5). Im ersten Arbeitspaket wird die vorhandene Literatur anhand der definierten Rahmenbedingungen erfasst. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist die sogenannte Longlist (siehe Kapitel 4.3).

Für die Erstellung der Longlist wurden zu Beginn der Recherche Verfahrenseigenschaften definiert, welche für die spätere Beurteilung relevant und hilfreich sind. Neben allgemeineren Informationen zum Verfahren und zum Rezyklat wurden ebenfalls technologische Informationen zusammengetragen (siehe Abbildung 5, Teil A). Für die weitergehende Recherche werden zu jedem Verfahren zusätzliche Informationen bezüglich vorhandener Literatur aufgeführt und die Tabelle mit Links zu den entsprechenden Internetseiten versehen.

Im zweiten Arbeitspaket wird die Longlist Schritt für Schritt auf eine finale Shortlist reduziert (siehe Kapitel 4.4). Für die Erarbeitung der Shortlist, wurden im Rahmen von ARA-internen Diskussionsrunden und einem Workshop zusammen mit Vertretern der HOLINGER AG spezifische Auswahlkriterien für die Schlamm- und für die Alternativverfahren definiert (Tabelle 3 und Tabelle 4).

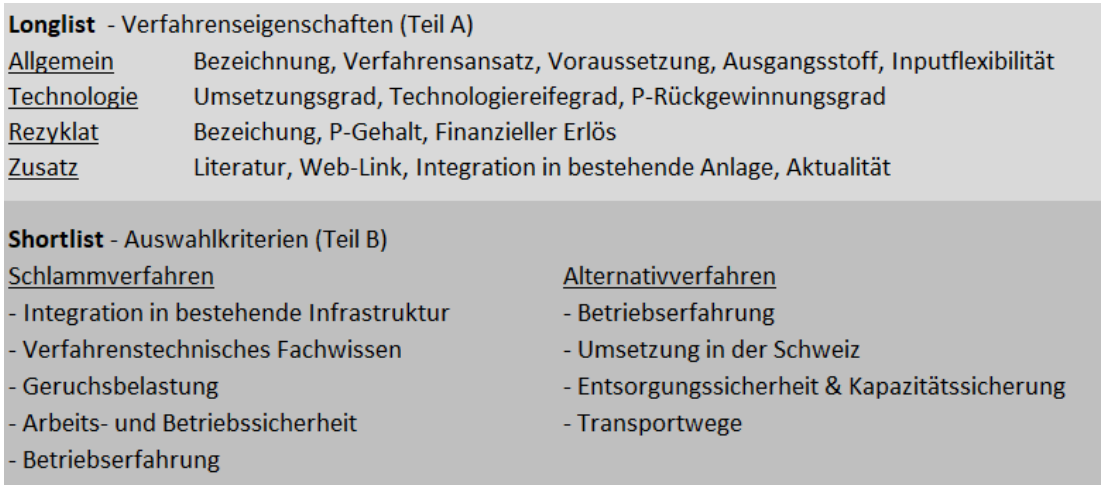


Abbildung 5: Übersicht über Vorgehensweise in der Literaturrecherche

Bei der Wahl der Kriterien wurde der Fokus auf die technische Machbarkeit und die Nachhaltigkeit gelegt. Auf die Bewertung der Wirtschaftlichkeit, sprich die Investitions- und Betriebskosten, sowie das Vorhandensein eines Absatzmarktes für das Rezyklat und den möglichen Erlös wurde zu diesem frühen Projektzeitpunkt bewusst verzichtet. Zum einen stehen für die meisten Verfahren keine halb- oder grosstechnischen Anlagen zur Verfügung, sodass weder verlässliche Investitions- noch Betriebskosten ermittelt werden können. Zum anderen sind die für den Produktabsatz massgebenden Grenzwerte für Recyclingdünger in Deutschland und der Schweiz unterschiedlich, sodass auch hier keine brauchbare Kostenbasis vorliegt. Des Weiteren sollte vermieden werden, dass innovative Verfahren mit einem gewissen Entwicklungspotential wegen der Wirtschaftlichkeit bereits in dieser frühen Phase ausgeschlossen werden.
Die Kombination mehrerer Technologien zur Erreichung der gesetzlich geforderten P-Rückgewinnungsquote ist für die ARA Thunersee eine mögliche Option. Aus diesem Grund wurden auch die Rückgewinnungsquoten der einzelnen Technologien bei der Auswahl der Shortlist nicht als Ausschlusskriterium genutzt, sondern als Orientierungswert verwendet.

Unter Schlammverfahren werden die Technologien zusammengefasst, welche Phosphor aus einem den Stoffströmen Frischschlamm, Faulschlamm oder Zentrat der Schlammentwässerung zurückgewinnen. Für die Auswahl geeigneter Schlammverfahren wurden untenstehende Kriterien definiert (Tabelle 3).

Tabelle 3: Auswahlkriterien für die Schlammverfahren

Schlammverfahren		Ausschluss von
Integration in bestehende Infrastruktur	Die ausgewählte Technologie muss in die bestehende Infrastruktur der ARA Thunersee integriert werden können.	Verfahren mit Rückgewinnung aus Klärschlammasche
Verfahrenstechnisches Fachwissen	Der Betrieb und die Wartung sollen durch das Personal der ARA durchgeführt werden können.	Elektrochemische Verfahren
Geruchsbelastung	Die ARA Thunersee liegt in direkter Nachbarschaft zur Wohnbebauung, weshalb Geruchsemission vermieden werden sollen.	Thermische Verfahren

Arbeits- und Betriebssicherheit	Die ausgewählte Technologie benötigt keine kritischen Betriebsmittel und gewährleistet daher einen gefahrlosen Betrieb und eine einfache Wartung der Anlage.	Verfahren mit starken Säuren und Laugen oder Ozon.
Betriebserfahrung	Die ausgewählte Technologie sollte mindestens als Pilotanlage in der späteren Einsatzumgebung getestet worden sein.	Verfahren mit TRG < 6

Unter Alternativverfahren werden die Technologien zusammengefasst, welche Phosphor an einem externen Standort aus monoverbranntem Klärschlamm zurückgewinnen. Für die Auswahl geeigneter Alternativverfahren wurden untenstehende Kriterien definiert (Tabelle 4).

Tabelle 4: Auswahlkriterien für die Alternativverfahren

Alternativverfahren		Ausschluss von
Betriebserfahrung	Für das Alternativverfahren wird eine Praxiserfahrung von mind. 2 Jahren im kontinuierlichen Betrieb vorausgesetzt (TRG > 7).	Verfahren welche durch die Anbieter nicht weiterentwickelt werden.
Umsetzung in der Schweiz	Das Verfahren wird in der Schweiz umgesetzt.	Verfahren welche in der Schweiz nicht geplant werden .
Entsorgungssicherheit & Kapazitätssicherung	Die Entsorgungssicherheit für den anfallenden Faulschlamm der ARA Thunersee muss langfristig gegeben sein. Die Kapazitäten bezüglich Monoverbrennung und P-Rückgewinnung müssen innerhalb des aktuellen Planungshorizonts gewährleistet sein.	Verfahren welche ausschliesslich Kapazität für den eigenen Klärschlamm aufweisen.
Transportwege	Die Entfernung zwischen der ARA Thunersee, der Klärschlammverbrennung und der P-Rückgewinnung soll minimiert werden.	Verfahren welche weiter entfernt sind als andere zur Verfügung stehende.

4.3 ERKENNTNISSE AUS DER LONGLIST

Die finale Longlist ist im Anhang 5 dargestellt und umfasst 46 verschiedene Verfahren zur Phosphorrückgewinnung auf der kommunalen ARA aus den Stoffströmen Abwasser, Frischschlamm (1), Faulschlamm (2), Zentrat (3) und Klärschlammasche (4). In Abbildung 6 ist ein vereinfachtes Verfahrensschema einer kommunalen ARA abgebildet, in welcher die Stellen zur Phosphorrückgewinnung eingezeichnet sind.

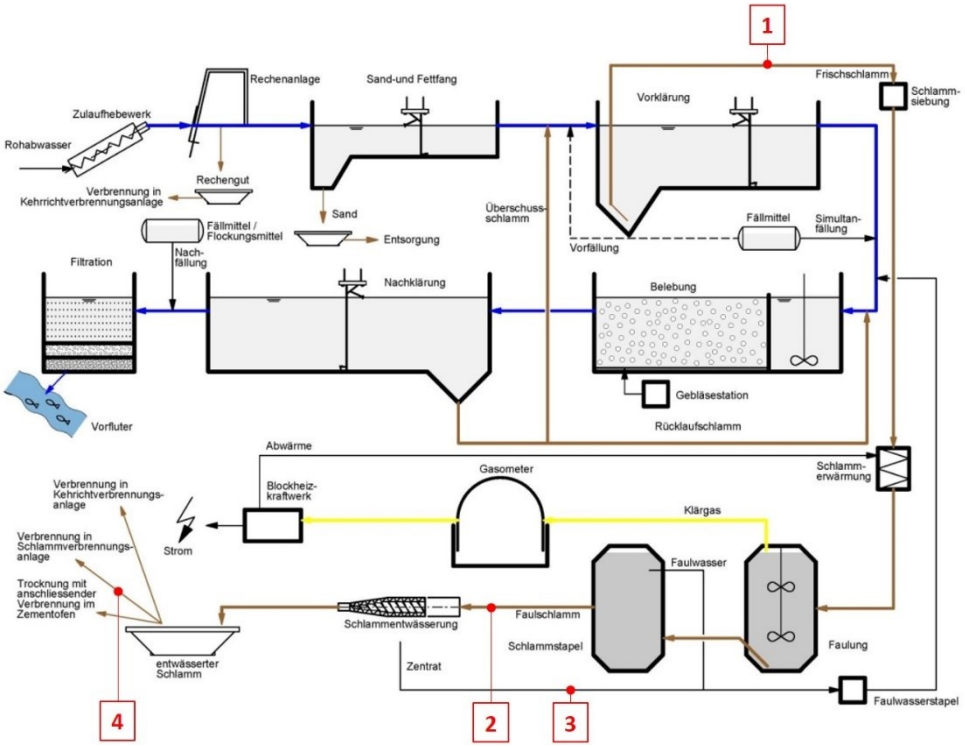


Abbildung 6: Möglichkeit zur Phosphorrückgewinnung auf einer kommunalen ARA mit P-Fällung

Bei drei von 46 Verfahren wird Phosphor aus dem Abwasser zurückgewonnen. Dabei handelt es sich um die Behandlung von sehr geringen Wassermengen wie es beispielsweise bei Klein-ARAs, einer Teilstrombehandlung oder der Aufbereitung von separiertem Urin der Fall ist. Aufgrund des grossen Volumenstroms und der gleichzeitig geringen P-Konzentration im Rohzulauf kommunaler ARAs, stellen diese Verfahren jedoch keine relevanten Technologien zur Phosphorrückgewinnung resp. für die ARA Thunersee dar.

Deutlich interessanter sind die Rückgewinnungsverfahren über die Stoffströme Frischschlamm, Faulschlamm, Zentrat der Schlammentwässerung und Klärschlammasche (siehe Abbildung 7). Zwei Drittel (30 von 46) der Verfahren verfolgen die Phosphorrückgewinnung aus der Schlammlinie einer ARA, während ein Drittel (13 von 46) die Klärschlammasche als Ausgangsstoff verwendet. Die Anzahl der existierenden Schlammverfahren zeigt, dass es zielführend ist, den Fokus zu Beginn der Recherche nicht nur auf einen bestimmten Stoffstrom zu richten.

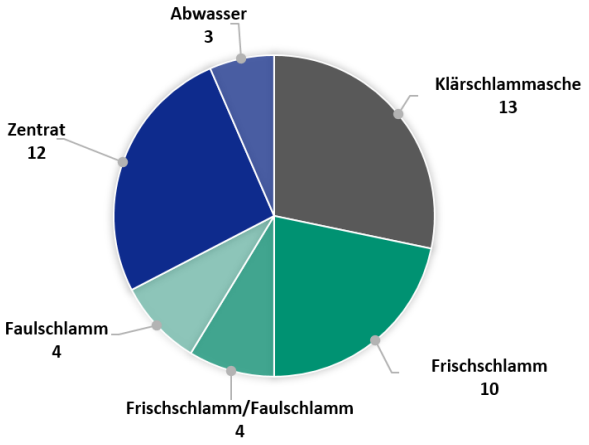


Abbildung 7: Verfahren der Longlist gruppiert nach Stoffstrom

Je nachdem aus welchem Stoffstrom Phosphor zurückgewinnen werden soll, kommen unterschiedliche Verfahrensansätze in Betracht. 39 der 46 recherchierten Technologien können den verfahrenstechnischen Grundprozessen: Extraktion, Karbonisierung, Kristallisation und Aufschluss zugeordnet werden. Sieben der 46 Technologien verfolgen einen speziellen Verfahrensansatz und sind unter der Gruppe Sonderverfahren zusammengefasst. In Abbildung 8 sind die recherchierten Technologien der Longlist nach Verfahrensansatz sortiert und dargestellt.

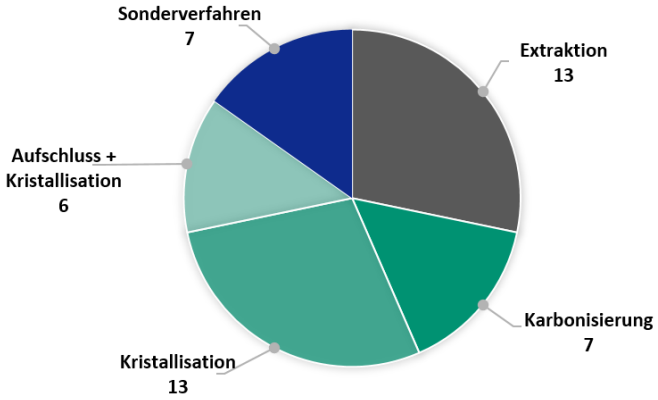


Abbildung 8: Verfahren der Longlist gruppiert nach Verfahrensansatz

Für die Rückgewinnung von Phosphor aus dem **Frischschlamm** werden meist Verfahren mit Aufschluss und Kristallisation eingesetzt. Aus dem **Faulschlamm** kann Phosphor mithilfe von Kristallisation oder Karbonisierung zurückgewonnen werden. Aus **Abwasser** oder **Zentrat** kann Phosphor mithilfe von Adsorptions-, Kristallisations- oder Sonderverfahren zurückgewonnen werden. Extraktionsverfahren werden ausschliesslich für die Behandlung von **Klärschlammasche** angewendet. Je nach eingesetzten Chemikalien oder Prozessbedingungen kann zwischen nasschemischer, thermochemischer und biologischer Extraktion unterschieden werden. Eine genauere Beschreibung der verfahrenstechnischen Grundprozesse ist in Anhang 6 zu finden.

Einige Sonderverfahren verfolgen einen innovativen Ansatz um Phosphor aus dem Abwasser zurückzugewinnen. Die Sonderverfahren ePhos®, ViviMag, PHOSIEDI und P-Bac / PRiL werden im Anhang 7 näher beschrieben.

4.4 HERLEITUNG DER SHORTLIST

4.4.1 Schlammverfahren

In einem ersten Schritt wurde die Longlist aufgrund der definierten Auswahlkriterien: Integration, Fachwissen, Geruchsbelastung sowie Betriebs- und Arbeitssicherheit reduziert. In Tabelle 5 ist die Reduzierung der Longlist-Technologien von 46 auf 16 Verfahren schrittweise aufgelistet. Mit dem Kriterium Betriebserfahrung werden Verfahren ausgeschlossen, welche einen TRG von kleiner 6 aufweisen. Das Verfahren LysoPhos® wurde trotz eines TRG von < 6 weiterhin mitberücksichtigt, da es auf den bereits etablierten Verfahren PONDUS®, der thermisch-chemischen Hydrolyse, sowie dem Kristallisationsschritt des CalPrex®-Verfahrens basiert, welche beide einen TRG von > 6 aufweisen. Entsprechend wurden mit diesem Kriterium keine Verfahren ausgeschlossen.

Tabelle 5: Reduktion der Schlammverfahren anhand definierter Auswahlkriterien

Kriterium	Reduktion von …	auf … Verfahren.
Integration in bestehende Anlage	46	24
Verfahrenstechnisches Fachwissen	24	22
Geruchsbelastung	22	17
Betriebs- und Arbeitssicherheit	17	16
Betriebserfahrung	16	16

Die verbliebenen Technologien können wie folgt gruppiert werden: Aufschluss und Kristallisation im Frischschlamm oder im Faulschlamm, Kristallisation im Faulschlamm oder im Zentrat, sowie Sonderverfahren (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Reduktion der Longlist basierend auf Auswahlkriterien

Verfahrensansatz	Stoffstrom	Verfahren
Aufschluss + Kristallisation	Frisch-schlamm	**CalPrex®, LysoPhos®, PhosForce, FIX-Phos**
	Faulschlamm	**ExtraPhos®, FIX-Phos**
Kristallisation	Faulschlamm	**AirPrex®Macro, EloVac®-P**
	Zentrat	ANPHOS®, NASKEO, NuReSys, NutriTec®, Ostara Pearl®, Phosphogreen, P-RoC, Struvia®
Sonderverfahren	Faulschlamm	ViviMag

Acht der 16 verbliebenen Technologien sind Verfahren, welche Phosphor durch Kristallisation aus dem Zentrat der Schlammentwässerung entfernen. Diese Verfahren weisen in fast allen Fällen einen hohen TRG auf und sind bereits heute auf dem Markt etabliert. Einen grösseren Bekanntheitsgrad haben vor allem die Verfahren Ostara Pearl®, Phosphogreen und Struvia®, welche von den grossen Unternehmen der Abwasserentsorgungs-Branche angeboten werden. Anwendungsschwerpunkt dieser Verfahren ist die Vermeidung resp. Verringerung von Ausfällungen während und nach der Faulung und den damit einhergehenden Betriebsproblemen durch Ablagerungen. Für die Phosphorrückgewinnung sind diese Technologien jedoch nicht optimal, da sie einerseits nicht auf hohe Rückgewinnungsquoten optimiert sind und andererseits in einem Stoffstrom (Zentrat) ansetzen, welcher im Vergleich zur gesamten Phosphormenge auf einer ARA einen relativ geringen Anteil (auf der ARA Thunersee rund 50 kg/d von 310 kg/d im Zulauf der Schlammentwässerung, siehe Kapitel 3.2) aufweist.

Eine Weiterentwicklung dieser Technologien im Hinblick auf die Erhöhung der P-Rückgewinnung stellen die Verfahren dar, welche mit einem zusätzlichen Prozessschritt (Aufschluss) im Frischschlamm oder im Faulschlamm arbeiten. Diese Technologien verknüpfen die Vorteile beider Prozesse. Entsprechend wurden die Technologien mit Kristallisation im Zentrat, ohne vorgängigem Aufschluss, nicht mit in die Shortlist aufgenommen.

Das Sonderverfahren ViviMag, welches zur magnetischen Abtrennung von Eisenphosphat

aus Faulschlamm verwendet wird, könnte auf der ARA Thunersee gegebenenfalls als zusätzliche Option zur Behandlung des externen Faulschlammes angewendet werden. Als Hauptverfahren wird es aber in der Shortlist nicht weitergeführt.

Anhand der Auswahlkriterien und der oben genannten Überlegungen wurde die Longlist von 46 auf die sieben Schlammverfahren, dargestellt in der Tabelle 8, reduziert.

4.4.2 Alternativverfahren

In der Longlist befinden sich 20 Alternativverfahren, mit welchen Phosphor aus dem getrockneten Klärschlamm (7) respektive aus Klärschlammasche (13) an einem externen Standort zurückgewonnen werden kann. Bei den Verfahren handelt es entweder um eine Verbrennung des Klärschlamms unter Sauerstoffmangel (Pyrolyse) oder um die nasschemische (10 Verfahren), thermochemische (2 Verfahren) oder mikrobielle (1 Verfahren) Extraktion von Phosphor aus Klärschlammasche.

Um ein geeignetes Alternativverfahren zu bestimmen, wurden definierte Auswahlkriterien angewendet (Tabelle 4) und damit die Longlist von 20 auf zwei Verfahren reduziert (Tabelle 7). Zu Beginn der Studie wurde das Auswahlkriterium Betriebserfahrung für das Alternativverfahren auf einen Technologiereifegrad (TRG) > 7 festgelegt (Betriebserfahrung I). Während der Recherche wurde jedoch festgestellt, dass es bisher noch keine Alternativverfahren im erprobten Betrieb gibt. Das Kriterium wurde daher auf einen TRG > 6 herabgesetzt (Betriebserfahrung II).

Tabelle 7: Reduktion der Alternativverfahren anhand definierter Auswahlkriterien

Kriterium	Reduktion von …	auf … Verfahren.
Betriebserfahrung II	20	8
Umsetzung in der Schweiz	8	5
Entsorgungssicherheit & Kapazitätssicherung	5	3
Transportwege	3	2

Eine detaillierte Beschreibung aller Shortlist-Verfahren sind im Anhang 8 zu finden. Im Kapitel 5 wird die technische Umsetzbarkeit der einzelnen Verfahren auf der ARA Thunersee überprüft und bewertet.

Tabelle 8: Shortlist der Schlamm- und Alternativverfahren

Technologie	Verfahren	Rezyklat	Anbieter / Umsetzung
AirPrex®Macro	Schlammverfahren Aufschluss + Kristallisation	Struvit	CNP CYCLES GmbH, DE
CalPrex®	Schlammverfahren Aufschluss + Kristallisation	Brushit	CNP CYCLES GmbH, DE
EloVac®-P	Schlammverfahren Kristallisation	Struvit	ELIQUO STULZ, DE
ExtraPhos®	Schlammverfahren Aufschluss + Kristallisation	Struvit / Brushit	REMONDIS AG, DE
FIX-Phos	Schlammverfahren Kristallisation	P-haltiges Silikat	TU Darmstadt, DE

LysoPhos®	Schlammverfahren Aufschluss + Kristallisation	Struvit / Brushit	CNP CYCLES GmbH, DE
PhosPhorce	Schlammverfahren Aufschluss + Kristallisation	Struvit / Brushit	Veolia, DE
EuPhoRe®	Alternativverfahren Karbonisierung	P-haltiges Granulat	ERZO, Oftringen, CH
Phos4Life®	Alternativverfahren Extraktion	Phosphorsäure	KEBAG, Zuchwil, CH

5 TECHNISCHE UMSETZBARKEIT DER VERFAHREN GEMÄSS SHORTLIST

5.1 INTEGRATION DER VERFAHREN AUF DER ARA THUNERSEE

Die technische Umsetzbarkeit auf der ARA wurde bereits zu einem grossen Teil bei der Definition des Kriterienkatalogs der Shortlist berücksichtigt. So decken vor allem die Kriterien Integration in bestehende Anlage, Geruchsbelastung sowie Arbeits- und Betriebssicherheit die wichtigsten Punkte ab und führen zum Ausschluss von Verfahren.

Um die Integration der Shortlist-Schlammverfahren in den Betrieb der ARA Thunersee zu visualisieren, wurden für jede Technologie ein Verfahrensschema erstellt (siehe Anhang 9).

Die Alternativverfahren EuPhoRe® sowie Phos4Life® werden an einem externen Standort umgesetzt. Dementsprechend haben diese Verfahren keinen direkten Einfluss auf den Betrieb der Kläranlage. Bezüglich der Entsorgungssicherheit müssten bei einer externen Rückgewinnung sowie thermischen Verwertung jedoch genügend Kapazitäten vorhanden sein sowie eine Annahme des Schlammes der ARA Thunersee durch vertragliche Vereinbarungen gewährleistet werden.

5.2 ENTWICKLUNGSSTAND / WEITERENTWICKLUNG VERFAHREN

Im Rahmen der Abklärungen bezüglich des Entwicklungsstandes der Verfahren wurden die Entwickler und Pateninhaber der Verfahren kontaktiert.

Die Firma ELIQUO STULZ bietet das Verfahren EloVac®-P zur Vakuumentgasung von Faulschlamm mit integrierter Phosphatfällung an. Dabei liegt der Fokus auf der Verbesserung der Entwässerung, der Reduktion von Struvit-Ablagerungen und der Reduktion der Phosphat-Rückbelastung. Die Firma sieht nicht vor, das Verfahren mit einer Abtrennung der Struvit-Kristalle zu ergänzen, um es auch für die P-Rückgewinnung kommerziell anzubieten.

Das FIX-Phos Verfahren wurde während einer Dissertation entwickelt und pilotiert. Das Verfahren wurde jedoch im Anschluss nicht weiterverfolgt und wird entsprechend auch nicht weiterentwickelt.

Aktueller Inhaber des ExtraPhos®-Verfahrens ist die REMONIDS Aqua GmbH & Co. Die Firma REMONDIS hat das Patent von der Chemische Fabrik Budenheim KG übernommen. Mit der Übernahme des Patentes wird der Fokus der Anwendung des Verfahrens neu auf die Intensivlandwirtschaft und Gülleaufbereitung gelegt. Dies aufgrund der geringen Abreicherungsgrade, welche die geltenden Grenzwerte in Deutschland nicht erreichen (siehe Kapitel 2.2.1). Für die P-Rückgewinnung bietet die Firma das Ascheverfahren TetraPhos® an.

Die Firma CNP CYCLES GmbH ist der Anbieter der Verfahren AirPrex®Macro, CalPrex® und LysoPhos®. Das Verfahren AirPrex®Macro wurde entwickelt, um Struvit-Ablagerungen in der Schlammbehandlung zu reduzieren. Um die Phosphorrückgewinnung zu forcieren wurde das Verfahren CalPrex® entwickelt. Zur Optimierung des Verfahrens in Hinblick auf die geforderten Abreicherungsgrade entwickelt die Firma nun eine Kombination des CalPrex®-Verfahrens mit einer vorgeschalteten thermisch-chemischen Hydrolyse (PONDUS®-Verfahren). Sowohl das PONDUS®, wie auch das CalPrex®-Verfahren sind auf Anlagen umgesetzt und in Betrieb. Für die Verfahrenskombination sind derzeit Abklärungen am Laufen und im Jahr 2022 sollen Pilotversuche durchgeführt werden.

Das, auf dem gleichen Verfahrensansatz wie CalPrex®, entwickelte Verfahren PhosForce

wird durch VEOLIA angeboten. Aktuell wird das Verfahren, vor allem die biologische Vorversäuerung, im Hinblick auf die Erhöhung der Anreicherung im Rahmen von Labor- und Pilotversuchen weiterentwickelt.

Basierend auf diesen Abklärungen ist davon auszugehen, dass die Firmen / Entwickler folgende Schlammverfahren der Shortlist in Hinblick auf die P-Rückgewinnung weiterhin anbieten und weiterentwickeln:

- LysoPhos® mit dem Verfahren CalPrex® als Grundlage
- PhosForce

Beide Alternativverfahren in der Shortlist (EuPhoRe® und Phos4Life®) befinden sich aktuell auf dem Stand eines Vorprojektes. Generelle offene Fragen, vor allem in den Bereichen Finanzierung und Absatzfähigkeit der Rezyklate, führen dazu, dass die Projekte aktuell stillstehen oder sogar sistiert wurden. Die Grundlagen zu diesen Fragen werden aktuell unter anderem im Rahmen der Weiterführung des Projektes «SwissPhosphor» erarbeitet.

5.3 ABTRENNUNG REZYKLAT

Bei den Verfahren FIX-Phos, AirPrex®Macro und EloVac®-P wird die Kristallisation direkt im Schlamm durchgeführt. Eine Abtrennung der gebildeten Kristalle wird bei diesen Verfahren nicht mitangeboten oder ist nur zu einem geringen Teil möglich. Diese Verfahren sind jedoch nur für ARAs attraktiv, welche a) ihren Klärschlamm weiterhin in die Landwirtschaft ausbringen dürfen oder b) die Phosphorrückgewinnung über eine Abreicherung der P-Konzentration im Abgabeschlamm definiert ist. Daher können diese Verfahren auf Schweizer ARA nicht als Phosphorrückgewinnungsverfahren umgesetzt werden.

5.4 SCHADSTOFFBELASTUNG DER PHOSPHOR-REZYKLATE

Mit den Verfahren der Shortlist, werden fünf verschiedene Rezyklate herstellt:

- **Struvit** (Ammoniummagnesiumphosphat)
  Kann direkt als MinRec-Dünger, als Zusatz für Bodenverbesserer oder als Rohmaterial für weitere Phosphorprodukte verwendet werden.
  Verfahren: AirPrex®Macro, EloVac®-P, LysoPhos®, LysoPhos®, ExtraPhos®
- **Brushit** (Calciumhydrogenphosphat)
  Kann direkt als MinRec-Dünger, als Zusatz für Bodenverbesserer oder als Rohmaterial für weitere Phosphorprodukte verwendet werden.
  Verfahren: CalPrex®, PhosForce, LysoPhos®, ExtraPhos®
- **P-Beladenes Calcium-Silikat-Hydrat** (CSH)
  Kann als MinRec-Dünger verwendet werden
  Verfahren: FIX-Phos
- **P-haltige Asche**
  Kann als MinRec-Dünger verwendet werden
  Verfahren: EuPhoRe®
- **Phosphorsäure 75%**
  Verschiedenste Verwendungsmöglichkeiten
  Verfahren: Phos4Life®

Werden die Phosphor-Rezyklate zur Schliessung des P-Kreislaufes in der Schweiz als mineralische Recyclingdünger (MinRec-Dünger) eingesetzt, müssen diese die Grenzwerte gemäss Anhang 2.6 Ziffer 2.2.4. ChemRRV [20] erfüllen (siehe Kapitel 2.2.5).
Wird das Phosphor-Rezyklat anderweitig stofflich verwertet (z. B. als Phosphorsäure), ergeben sich die Vorgaben bezüglich Schadstoffentfernung aus den jeweiligen marktseitigen, für den Verwendungszweck spezifischen Anforderungen.

Im Rahmen einer Studie von Agroscope [1] wurden die Schadstoffbelastung von Phosphor-Rezyklate der drei Verfahrenskategorien:

1. Fällung aus Abwasser oder Klärschlamm
2. Nasschemischer Aufschluss von Aschen
3. Thermochemischer Aufschluss

untersucht.

In der Studie wird deutlich, dass mit steigender Phosphorrückgewinnungsquote auch die Schwermetallkonzentration im Phosphor-Rezyklat ansteigt. Das bedeutet konkret, dass Rezyklate, welche nasschemisch oder thermochemisch gewonnen werden, die höchsten spezifischen Schwermetallkonzentrationen aufweisen. So wurde unter anderem auch im Rahmen der Pilotierung des EuPhoRe®-Verfahrens bei der ERZO gezeigt, dass kein Zufriedenstellendes Rezyklat hergestellt werden kann [12].

Basierend auf den Untersuchungen von Agroscope [1] kann davon ausgegangen werden, dass die Frage der Schadstoffbelastung bei den betrachteten Schlammverfahren (Verfahren der Kategorie 1), weniger stark zu gewichten ist als bei den Alternativverfahren (Verfahren der Kategorie 2 und 3).

5.5 ENTSORGUNGSWEGE

Die Berechnung der mit der Entsorgung verbundenen Transportwege und die daraus resultierenden Tonnenkilometer sind im Anhang 10 dargestellt.

Aktuell wir der Klärschlamm in der rund 4 km entfernten KVA Thun thermisch verwertet und die Rückstände in einer Deponie in der Region entsorgt. Unter Berücksichtigung der Entsorgungsmenge ergeben sich aktuell rund 75'000 tkm.

Bei der Umsetzung eines Schlammverfahrens könnte der aktuelle Entsorgungsweg des Klärschlammes beibehalten werden. Durch die Phosphorrückgewinnung auf der ARA reduziert sich gemäss Angabe des Anbieters die Schlammenge und entsprechend die Tonnenkilometer leicht, auf rund 70'500 tkm (siehe Abbildung 9).

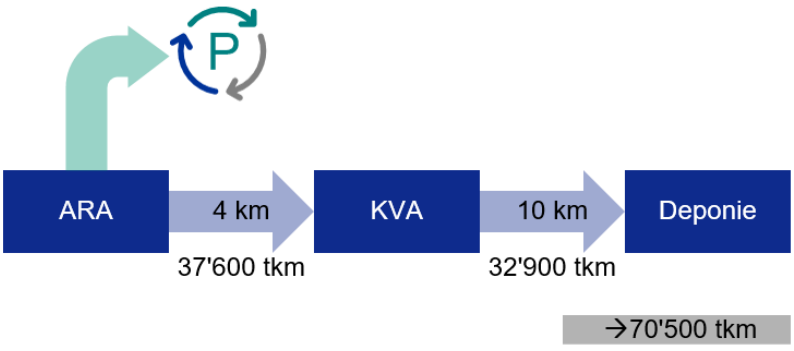


Abbildung 9: Entsorgungsweg Schlammverfahren mit Verwertung in der KVA

Alternativ wäre eine thermische Verwertung des abgereicherten Klärschlammes in einem Zementwerk, mit einer vorgängigen Schlammtrocknung, möglich. Dadurch fallen keine Rückstände an, welche deponiert werden müssen. Beim Beispiel in der Abbildung 10 wurde eine Schlammtrocknung am Standort der ARA Bern sowie eine thermische Verwertung im Zementwerk in Cornaux (Juracime SA) berücksichtig. Bei dieser Variante erhöhen sich die Tonnenkilometer auf rund 386'400.

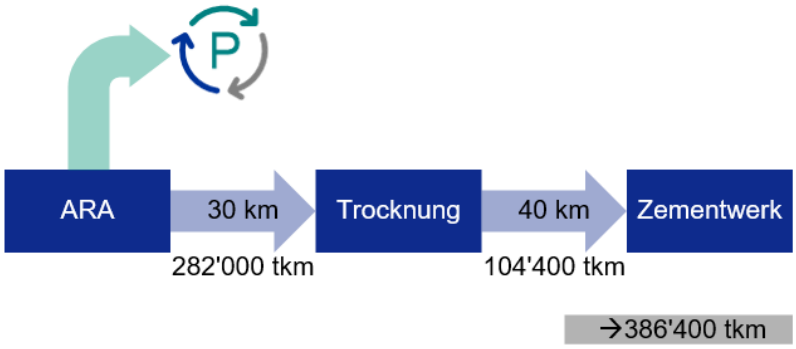


Abbildung 10: Entsorgungsweg Schlammverfahren mit Verwertung im Zementwerk

Bei der Umsetzung eines Alternativverfahrens würden sich die Transportwege deutlich erhöhen. Beim EuPhoRe®-Verfahren müsste der Klärschlamm rund 88 km zum Standort der ERZO in Oftringen transportiert werden, wo sowohl die Rückgewinnung wie auch die thermische Verwertung umgesetzt werden könnte. Unter Berücksichtigung der Deponierung der Klärschlammasche bei der Deponie Teuftal AG, ergeben sich mit diesem Verfahren für die Entsorgung 1'146'000 Tonnenkilometer (siehe Abbildung 11).

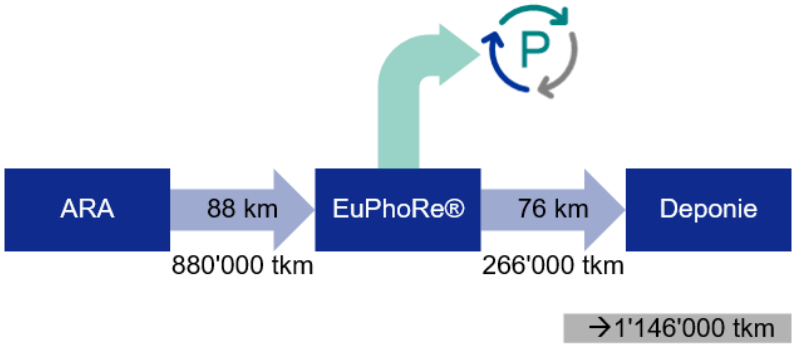


Abbildung 11: Entsorgungsweg Alternativverfahren EuPhoRe®

Mit noch längeren Transportwegen ist beim Phos4Life®-Verfahren zu rechnen, da an dessen Standort in Zuchwil keine Schlammverwertungsanlage (SVA) geplant ist. Der entwässerte Klärschlamm muss daher zuerst zur thermischen Verwertung zu einer SVA transportiert werden und die Klärschlammasche dann entsprechend zum Standort des Rückgewinnungsverfahrens. Die Variante mit den kürzesten Transportwegen wäre in diesem Fall eine Schlammverwertung bei der Saidef SA in Posieux. Die Klärschlammasche müsste dann im Anschluss zur KEBAG in Zuchwil transportiert werden. Darüber hinaus entstehen beim Phos4Life®-Verfahren grosse Mengen an Reststoffe in Form von Gips und Laugungsrückstände (285% bezogen auf den Inputstrom), welche in der Zementindustrie verwertet werden müssen und mit weiteren Transportkilometern zu Buche schlagen [13]. Daraus resultiert gemäss Abbildung 12 eine deutliche Erhöhung der Tonnenkilometer auf rund 1'438'600.

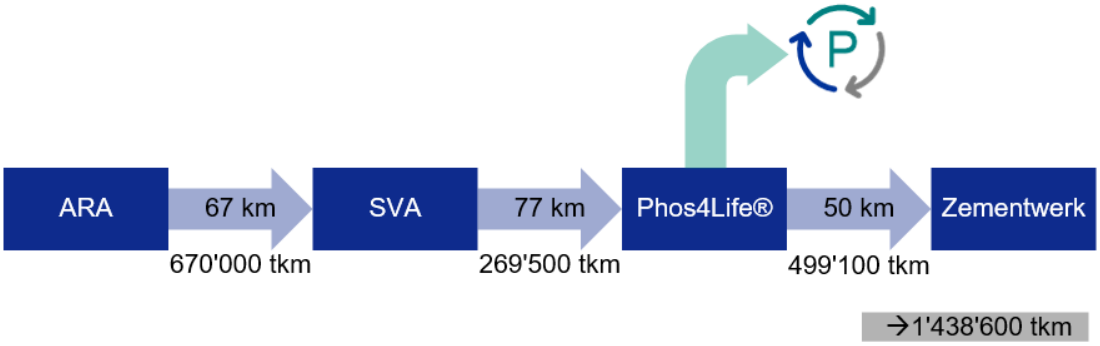


Abbildung 12: Entsorgungsweg Alternativverfahren Phos4Life®

5.6 UMGANG MIT FREMDSCHLAMM

Bei einigen Verfahren lassen sich die externen Faulschlämme (Fremdschlamm) mit behandeln. So kann beim ExtraPhos®-Verfahren auch der Fremdschlamm im Reaktor mit aufgeschlossen werden, da das Verfahren nicht explizit für Anlagen mit biologischer Phosphorelimination entwickelt wurde. Beim LysoPhos®-Verfahren wird durch die Integration des Rücklaufs aus dem DEMON ebenfalls ein Teil der Phosphorfraktion aus der Fremdschlammentwässerung zurückgewonnen. Die Rückgewinnungsquote aus dem Fremdschlamm wird jedoch gering ausfallen, da es sich dabei um den Verfahrensansatz Kristallisation im Zentrat ohne Vorbehandlung mit vergleichsweise tiefen Quoten handelt (siehe Kapitel 4.4.1).

Bei den Alternativverfahren kann der gesamte Schlamm nach der Faulschlammentwässerung (Eigen- und Fremdschlamm) zur Rückgewinnung und thermischen Verwertung transportiert werden.

6 BEST-VERFAHREN FÜR DIE ARA THUNERSEE

Basierend auf der Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit werden in den nachfolgenden Kapiteln die Best-Verfahren definiert.

Die Verfahren mit einer direkten Kristallisation im Schlamm wurden aufgrund der geringen Rückgewinnungsquoten, sowie der zum Teil fehlenden technischen Machbarkeit der Kristallabtrennung nicht als Best-Verfahren ausgewählt. Dies ist auch der Grund, weshalb viele der Verfahren von den Anbietern nicht als Phosphorrückgewinnungsverfahren angeboten werden, da sie die geforderten Grenzwerte nicht einhalten können. Entsprechend kommen die Verfahren AirPrex®Macro, FIX-Phos und EloVac®-P bei der Wahl der Best-Verfahren nicht in Frage.

Das ExtraPhos® wird trotz des derzeitigen Entwicklungsstopp durch den Anbieter als ein Best-Verfahren aufgenommen. Das Verfahren wurde für Anlagen unabhängig von der Art der Phosphorelimination, biologisch oder chemisch, entwickelt. Entsprechend ist dieser Verfahrensansatz für die ARA Thunersee interessant, da zum einen trotz BioP die an Eisen gebundene Phosphorfracht auf der ARA Thunersee nicht zu vernachlässigen ist (siehe Kapitel 3.2) und zum anderen auch der Fremdschlamm mit chemische gefälltem Phosphor mitbehandelt werden kann.

Gegenüber dem CalPrex® und PhosForce Verfahren wird das Rückgewinnungspotential beim LysoPhos®-Verfahren höher bewertet, da durch die thermo-chemische Hydrolyse der Phosphor im Schlamm für die Rückgewinnung besser aufgeschlossen wird, als vergleichsweise bei der biologischen Vorversäuerung. Die Firma CNP CYCLES GmbH gibt für das Verfahren LysoPhos® eine doppelt so hohe Rückgewinnungsquote an als für das CalPrex®-Verfahren.
Das LysoPhos®-Verfahren wurde noch nicht pilotiert. Es basiert jedoch auf der Kombination der bereits etablierten Verfahren PONDUS®, der thermisch-chemischen Hydrolyse, sowie dem Kristallisationsschritt des CalPrex®-Verfahrens. Gemäss Anbieter kann für die ARA Thunersee von eine Rückgewinnungsquote von rund 30% ausgegangen werden. Dabei ist der im Vergleich zu anderen BioP-Anlagen hohe Anteil an Eisen gebundenem Phosphor (siehe Kapitel 3.2) mitberücksichtigt. Um die Rückgewinnungsquote weiter zu erhöhen, besteht zum einen bei der Optimierung der biologischen Phosphorelimination ein Potential: Bei der Rückführung des mit Eisen versetzten Schlammwassers der MV-Stufe (siehe Kapitel 2.1) soll bei Weiterverfolgen des Projekts geprüft werden, ob eine Rückführung am Ende der biologischen Stufe zu einer Erhöhung des BioP-Anteils führen kann. Weiter könnte durch die Zugabe von Zitronensäure die Rückgewinnung des an Calcium gebundenen Phosphats, welches durch die Zuführung der Rückläufe in den Kristallisationsreaktor gelangt, die Rückgewinnungsquote erhöht werden. Dabei würde auch vom Zentrat der Fremdschlammentwässerung eine höhere Menge an Phosphor zurückgewonnen werden.

Grundsätzlich wären beide Alternativverfahren für die Umsetzung geeignet. Aufgrund der Problematik der hohen Schwermetallbelastung des Phosphor-Rezyklats im EuPhoRe®-Verfahren und der damit verbunden Sistierung des Projektes [12], wird dieses Verfahren bei den Best-Verfahren jedoch nicht berücksichtigt. Das Phos4Life®-Verfahren wird am vielversprechendsten bewertet. Für diese Verfahren wurde bereits eine Ökobilanzierung [13] durchgeführt, welche für die Gegenüberstellung der Best-Verfahren betreffend Nachhaltigkeit im nachfolgenden Kapitel 7 als Grundlage verwendet werden kann.

Zusammengefasst werden für die ARA Thunersee die Verfahren gemäss Tabelle 9 als Best-Verfahren definiert und in der ökologischen Beurteilung einander gegenübergestellt:

Tabelle 9: Best-Verfahren der ARA Thunersee

Technologie	Verfahren	Rezyklat	Anbieter / Umsetzung
ExtraPhos®	Schlammverfahren Aufschluss + Kristallisation	Struvit / Brushit	REMONDIS AG, DE
LysoPhos®	Schlammverfahren Aufschluss + Kristallisation	Struvit / Brushit	CNP CYCLES GmbH, DE
Phos4Life®	Alternativverfahren Extraktion	Phosphorsäure	KEBAG, Zuchwil, CH

7 ÖKOLOGISCHE BEURTEILUNG

7.1 METHODIK UND VORGEHEN

Für die ökologische Beurteilung der Best-Verfahren wurde eine separate Studie [11] basierend auf der Methode der Ökobilanzierung durchgeführt. Bei der Ökobilanzierung werden der gesamte Lebensweg sowie eine Vielzahl von Umweltauswirkungen wie beispielsweise Beeinträchtigung von Ökosystemen, menschliche Gesundheit, Klimaauswirkungen oder Ressourcennutzungen berücksichtigt. Für die Bewertung wurde die Methode der ökologischen Knappheit (MöK) 2021 [14] angewendet.

Bei den beiden Schlammverfahren LysoPhos® und ExtraPhos® können je nach eingesetztem Fällmittel unterschiedliche Phosphor-Rezyklate hergestellt werden. Um die Unterschiede dieser beiden Best-Verfahren in der ökologischen Beurteilung herauszuarbeiten, wurde beim LysoPhos®-Verfahren das Rezyklat Struvit und beim ExtraPhos®-Verfahren das Rezyklat Brushit berücksichtigt.

Als Vergleichsbasis wurde einerseits 1 kg Recyclingdünger mit einem äquivalenten Düngerpotential von 46% P_2O_5 bzw. 1 kg Phosphorsäure verwendet. Bei der Vergleichsbasis Recyclingdünger wurden die agronomische Effizienz der Rezyklate Struvit und Brushit mit der Effizienz von Tripelsuperphosphat-Dünger gleichgesetzt.

Die Systemgrenze wurde zur Verbesserung der Aussagekraft der Resultate eng gewählt. So wurden nur die Verfahren selbst sowie deren Einfluss auf den bestehenden Betrieb der ARA und der zusätzliche Nutzen, welche aus den Verfahren resultiert, berücksichtigt.

7.2 RESULTATE

7.2.1 Ökologische Auswirkung der Verfahren

Die Rückgewinnung von Phosphor hat unabhängig von der Art des Rezyklats eine deutlich geringere Umweltauswirkung als die durchschnittlich auf dem globalen Markt verfügbare Phosphorsäure oder der daraus hergestellte Phosphordünger (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14). Werden die Rezyklate den Phosphorprodukten aus der EU (Best-Case) gegenübergestellt, zeigen sich die deutlich geringeren Umweltauswirkungen nur noch bei der Düngerherstellung. Die Umweltauswirkungen der importierten Phosphorsäure liegen im Best-Case im Bereich der Rückgewinnungsverfahren.

Weiter zeigen die Resultate beim Betrachten der zwei unterschiedlichen Vergleichsbasen, dass eine möglichst direkte Verwertung der Rezyklate zu bevorzugen ist. Wird zum Beispiel die Vergleichsbasis Phosphordünger betrachtet und somit ein Dünger als Zielprodukt definiert, verursacht die Rückgewinnung auf der ARA Thunersee gegenüber dem Phos4Life®-Verfahren geringere Umweltauswirkungen.

Unabhängig vom Zielprodukt zeigt die Studie, dass die eingesetzten Hilfsstoffe einen relevanten Einfluss auf die Resultate der Ökobilanzierung haben. Dies zeigt sich vor allem beim Vergleich der Verfahren LysoPhos® und ExtraPhos®, bei welchen sich die Unterschiede nicht durch die Verfahren ergeben, sondern durch die verwendeten Hilfsstoffe.

Wie die Bewertung der Entsorgungswege im Kapitel 5.5 zeigt, fallen die Transportwege je nach Wahl des Verfahrens sehr unterschiedlich aus. In der Ökobilanzierung haben die berücksichtigten Transportwege jedoch keinen relevanten Einfluss. Der Grund dafür ist, dass die Belastungen nur anteilsmässig verrechnet werden. So müssen, am Beispiel des Phos4Life®-Verfahrens, pro kg gewonnener Phosphorsäure rund 40 kg Schlamm in einem

LKW mit einer durchschnittlichen Nutzlast von 10 t transportiert werden. Dies entspricht einem anteilsmässigen Transportweg von rund 260 m LKW-Fahrt. Der Energieinhalt des Treibstoffes, welcher dafür benötigt wird, ist weniger als die Hälfte der Energie, welche für das Entwässern des Klärschlammes benötigt wird.

Abbildung 13: Umweltfussabdruck (MöK 2021) der Phosphordüngerproduktion [11]

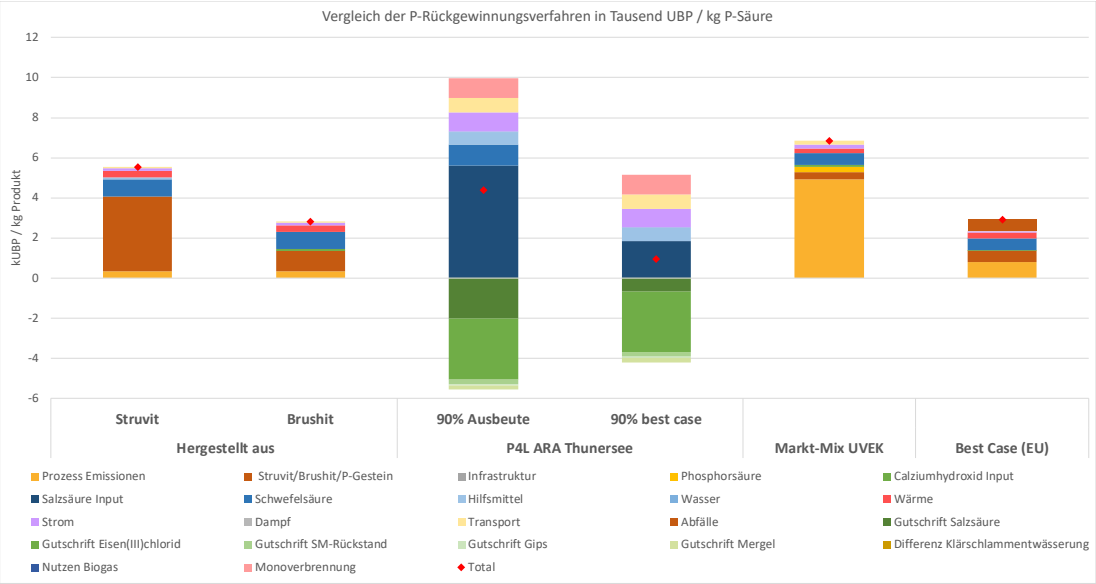


Abbildung 14: Umweltfussabdruck (MöK 2021) der Phosphorsäureproduktion [11]

7.2.2 Ökologische Gutschrift der Verfahren

Die Schlammverfahren LysoPhos® und ExtraPhos® haben einen direkten Einfluss auf den Betrieb der ARA. Beim LysoPhos®-Verfahren ergibt sich durch den Verfahrensschritt der Hydrolyse in der nachfolgenden Faulung ein höheren Klärgasertrag. Diese ökologische Gutschrift reduziert die Belastung durch das Verfahren um rund 50%. Zusätzlich wird bei beiden Verfahren durch die Reduktion der Phosphorfracht im Rücklauf eine Reduktion des Fällmittelbedarfs erwartet. Als weiterer Vorteil für den Betrieb führen diese Verfahren zu einem reduzierten Risiko von Struvitablagerungen in der nachfolgenden Verfahrensstufe der Schlammbehandlung. Letzteres wurde in der Ökobilanzierung nicht berücksichtigt.

Im Gegenzug kann beim Phos4Life®-Verfahren zusätzlich zur Phosphorsäureherstellung eine Rückgewinnung des Fällmittels Eisenchlorid realisiert werden. Daraus ergibt sich eine relevante ökologische Gutschrift.

7.2.3 Umweltnutzen

Der Nutzen der Rückgewinnungsverfahren ergibt sich aus der Differenz zwischen der Umweltauswirkung bei der Produktion der Rezyklaten und der konventionellen Herstellung aus Rohphosphat (siehe Abbildung 15). Dabei zeigt sich, dass der gesamte jährliche Umweltnutzen der Schlammverfahren, trotz der geringeren Umweltauswirkungen pro kg Phosphordünger, gegenüber dem Phos4Life®-Verfahren geringer ausfällt. Dies hängt im Wesentlichen von der Rückgewinnungsquote ab, welche mit 90% beim Phos4Life®-Verfahren deutlich höher ist, als die zu erwartende Rückgewinnungsquote von 30-35% bei den Schlammverfahren.

Zudem zeigt die Abbildung 15 die hohe Unsicherheit der Resultate. Dies hängt damit zusammen, dass alle Verfahren noch nicht grosstechnisch realisiert sind und entsprechend mit verschiedenen Annahmen gerechnet werden musste. Falls bei allen Verfahren optimale Annahmen verwendet werden (Best Case), so hat das Phos4Life®-Verfahren den höchsten Umweltnutzen. Falls dagegen mit pessimistischen Annahmen gerechnet wird (Worst Case), so ist der Umweltnutzen des Phos4Life®-Verfahrens tiefer als der Nutzen der betrachteten Schlammverfahren.

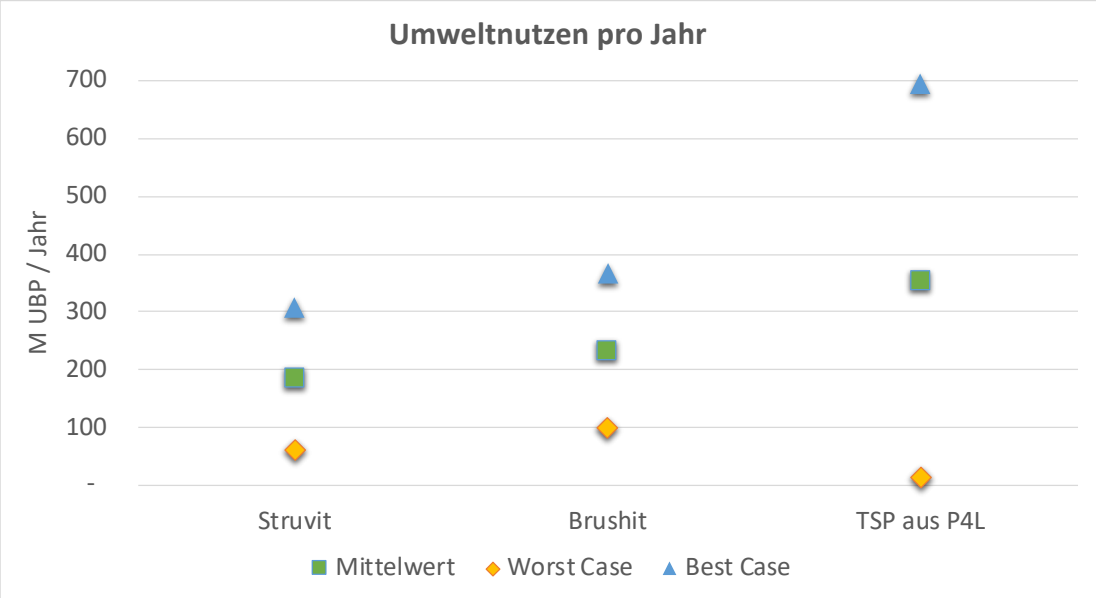


Abbildung 15: Umweltnutzen der Phosphorrückgewinnung pro Jahr [11]

8 REGIONALE P-RÜCKGEWINNUNGSSTRATEGIE

8.1 LANDKARTE «SWISSPHOSPHOR»

Von «SwissPhosphor» wurde die Landkarte "Phosphorrecycling Schweiz 2026" (siehe Abbildung 16) ausgearbeitet. Die Landkarte stellt einen Lösungsvorschlag dar, wie die Phosphorrückgewinnung in der Schweiz dereinst umgesetzt werden könnte. Die Karte dient der schweizweiten Koordination und als Orientierungshilfe. Es handelt sich dabei um eine Momentaufnahme.

Gemäss der Landkarte (Stand: Januar 2021) ist für das Einzugsgebiet Bern/Jura (knapp 20'000 t TS/Jahr) folgende Umsetzung geplant: Schlammverwertung und P-Rückgewinnung in einem noch nicht zugewiesenen Zementwerk. Das Verfahren zur P-Rückgewinnung ist noch offen (nass-chemisch oder thermo-chemisch).
Die Umsetzung hätte eine Aufhebung der Trocknungen an den Standorten ara region bern ag, MÜWE (Biel) und SEPE (Porrentruy) zur Folge. Zusätzlich kämen die Schlämme aus der KVA-Verwertung bei der AVAG (Thun) und VADEC (la Chaux-de-Fonds) hinzu.

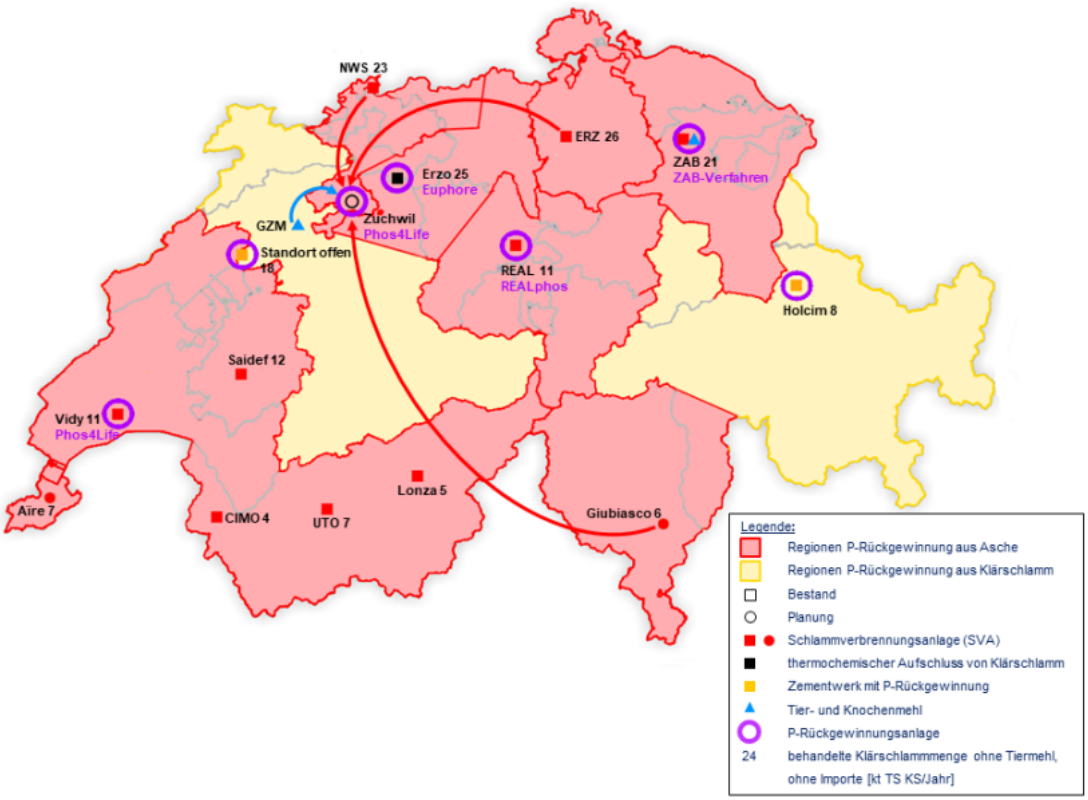
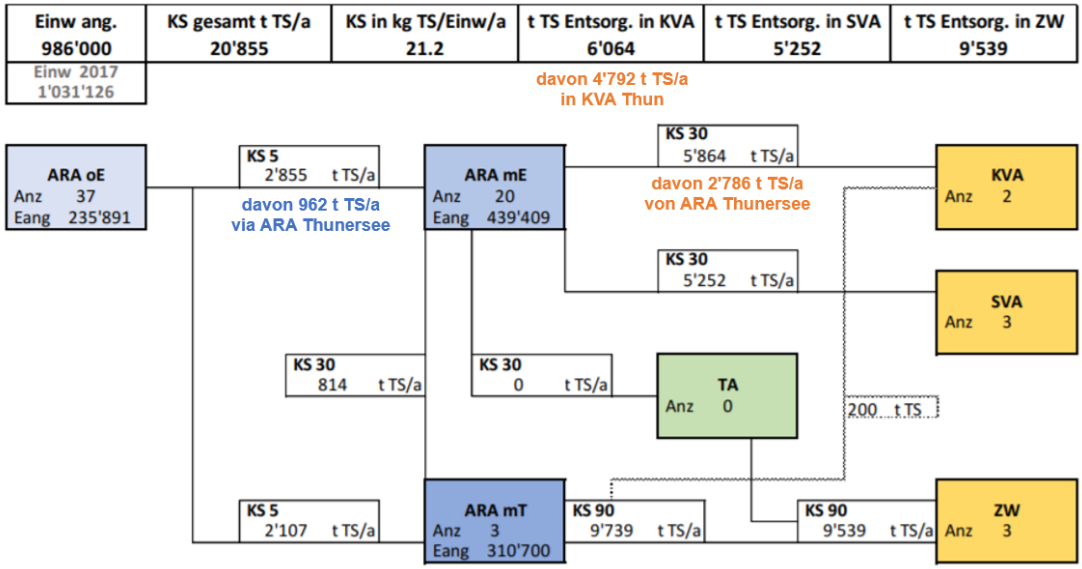


Abbildung 16: Landkarte "Phosphorrecycling Schweiz 2026" von «SwissPhosphor», Stand Januar 2021 [7]

8.2 KLÄRSCHLAMMMENGEN UND PHOSPHOR-FRAKTIONEN KANTON BERN

In Hinblick auf die Rückgewinnung von Phosphor wurden die Klärschlammmengen in der Schweiz und deren Entsorgungspfade basierend auf den Daten 2017 ausgewertet [15] sowie der Anteil an BioP auf Berner ARAs beurteilt [5].

Die Abbildung 17 zeigt die Bilanzierung der Klärschlammentsorgung im Kanton Bern.



ARA =Kläranlage, KVA = Kehrichtverwertungsanlage, SVA = Schlammverwertunganlage, ZW = Zementwerk
oE = ohne Entwässerung, mE = mit Entwässerung, mT = mit Trocknung

Abbildung 17: Klärschlammentsorgung im Kanton Bern, Stand 2017 [15]

Im Jahr der Datenerhebung haben 8 ARAs ihren Klärschlamm auf der ARA Thunersee entwässern lassen mit total 962 t TR/a. Im Jahr 2020 betrug die Menge noch 492 t TR von 7 ARAs. Der Rückgang ist vor allem auf die ARA Mittleres Emmental zurückzuführen, welche im Jahr 2017 noch 426 t TR über die ARA Thunersee entwässert und entsorgt hat und nun über eine eigene Klärschlammentwässerung verfügt.

In der KVA der AVAG Thun wurden im Erhebungsjahr 4'792 t TR energetisch verwertet (rund 20% der Klärschlammenge des Kantons). Davon betrug der Anteil der ARA Thunersee 2'786 t TR (2020: 2'501 t TR, Reduktion aufgrund Wegfall ARA Mittleres Emmental). Unter der Annahme einer Phosphorkonzentration von 33 kg/t TR fallen in der Region jährlich rund 160 Tonnen an Phosphor an. In der Abbildung 18 sind die Kläranlagen der Region und deren Klärschlammentsorgungswege dargestellt.

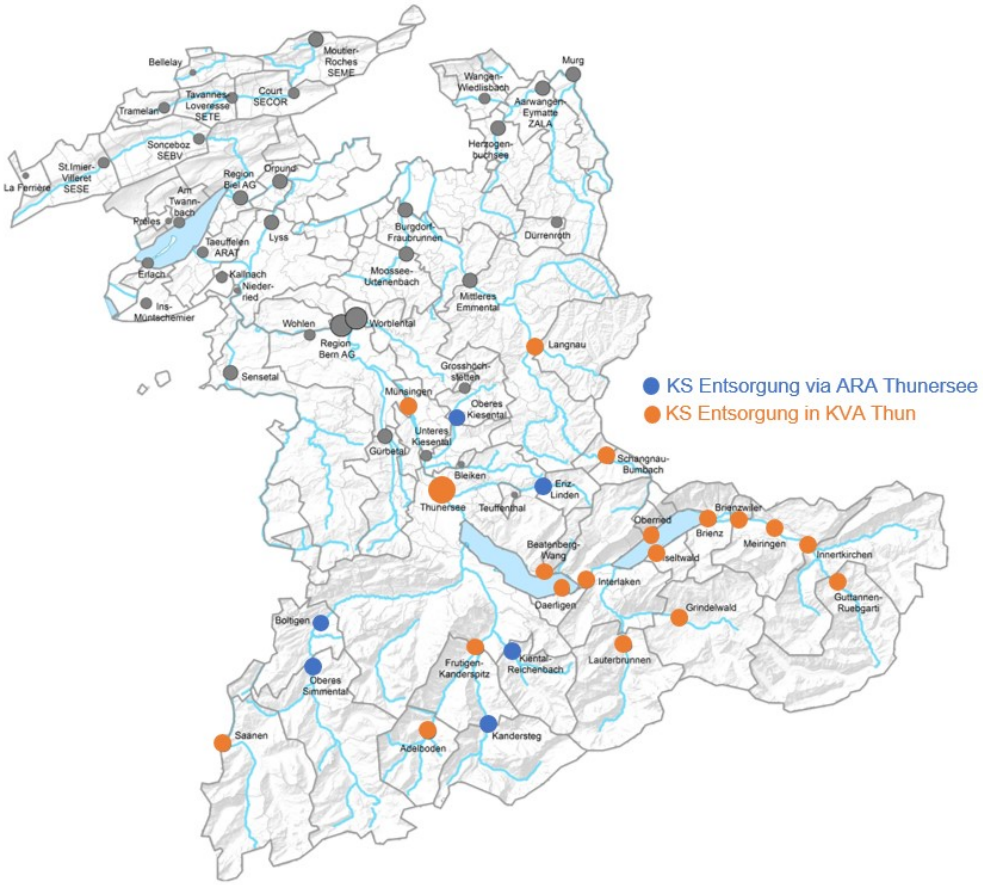


Abbildung 18: Klärschlammentsorgung Region

Für die Beurteilung des Anteiles der verschiedenen P-Fraktionen auf Berner ARAs wurde in Anlehnung an die Methode von ATV-DWA [2] Berechnungen (analog Kapitel 3.2) durchgeführt. Für die Hochrechnung auf den ganzen Kanton Bern (Tabelle 10) wurde für die Fraktionen Physikalische P-Elimination (Mechanische Elimination in der Vorklärung) und Inkorporation auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. Der Anteil BioP wurde für jede ARA im Kanton, basierend auf Denitrifikationsraten und Einwohnerwerte, abgeschätzt und der verbleibende Anteil, welcher nicht durch Messwerte im Zulauf- und Ablauf quantifizierbar war, der chemischen P-Elimination zugeschrieben.

Tabelle 10: Hochrechnung Kanton Bern. Gezeigt sind die Anteile der P-Fraktionen an Pges-Zulauf [5]

P-Fraktionen		Anteil Pges Zulauf (%)	Tonnen (t)
Physikalische P-Elimination		13	87
Biologische P-Elimination	Inkorporation	30	201
	BioP	22	147
Chemische P-Elimination		27	181
Nicht eliminiert (P Ablauf)		8	54
Pges Zulauf		100	670

8.3 REGIONALE VERWERTUNG PHOSPHOR-REZYKLAT

Die VVEA verpflichtet die ARA-Betreiber einerseits zur Rückgewinnung des im Klärschlamm vorhandenen Phosphors, andererseits muss dieser auch stofflich verwertet werden.

Es steht ausser Frage, dass eine Rückgewinnung des Phosphors nur dann Sinn macht, wenn der zurückgewonnen Phosphor auch wieder stofflich verwertet wird nur so ist eine Kreislaufwirtschaft möglich.

Wie für alle anderen Akteure auch besteht somit die Herausforderung nicht nur in der Rückgewinnung des Phosphors, sondern auch darin den Phosphor in ein marktreifes Produkt zu überführen. In Zusammenarbeit mit der AVAG, die in Spiez ein Biomassezentrum betreibt, hat die ARA Thunersee ein Forschungsprojekt initiiert. Ziel dieses Projektes ist es herauszufinden, ob das gut pflanzenverfügbare, aber schlecht wasserlösliche Struvit in den Kompostierungsprozesse den Biomassezentrums aufgeschlossen werden kann und somit zu einer Verbesserung der Kompostqualität führt.

Wäre dies möglich, könnte das auf der ARA Thunersee gewonnene phosphorreiche Struvit in ein nachhaltiges Produkt überführt werden. Im Gegensatz zu jedem anderen Phosphorrückgewinnungs-Ansatz wäre dies sogar regional möglich, was auch dem Nachhaltigkeitsgedanken der Kreislaufwirtschaft entsprechen würde.

8.4 INTERESSE UND PFLICHTEN DER AKTEURE

Bei der Phosphorrückgewinnung sind viele Akteure involviert, welche unterschiedliche Interessen und Pflichten haben. Im nachfolgenden Abschnitt werden verschiedenste Aspekte und deren Akteure aufgezeigt.

Rückgewinnungsverfahren am Standort ARA Thunersee

Akteure: ARA Thunersee, Kanton

Mit der Umsetzung eines Phosphor Rückgewinnungsverfahren auf der ARA Thunersee würde diese, als Inhaberin der Rückgewinnungsanlage, gemäss Vollzugshilfe [9] nachweispflichtig. Fällt die Wahl auf ein Schlammverfahren ist das Erreichen der geforderten Rückgewinnungsquote von 50% herausfordernd und ggf. nicht gegeben. Diese Thematik muss mit dem Kanton diskutiert werden.

Externes Rückgewinnungsverfahren

Akteure: ARA Thunersee, Externe Anlagenbetreiber, Kanton

Fällt die Wahl auf ein externes Verfahren zur Phosphorrückgewinnung, muss für die Entsorgung des Klärschlammes eine Abnahmegarantie vorhanden sein, so dass die ARA Thunersee ihren Schlamm gesichert entsorgen kann. Der Entsorgungsweg muss in den kantonalen Klärschlamm-Entsorgungsplan aufgenommen werden. Da die Deponiekapazitäten in den einzelnen Kantonen mitunter sehr limitiert sind, ist zu prüfen, ob Reststoffe aus der Phosphorrückgewinnung ggf. wieder in den Ursprungskanton zurückgeführt und dort abgelagert werden müssen.

Fremdschlamm auf der ARA Thunersee

Akteure: Umliegende ARAs, ARA Thunersee, Kanton

Fällt die Wahl auf ein Schlammverfahren auf der ARA Thunersee kann mit dem ExtraPhos®-Verfahren unter Umständen auch der aktuell auf der ARA Thunersee entwässerte Fremdschlamm mitbehandelt werden. Beim LysoPhos®-Verfahren geschieht dies, durch die Integration des Zentrats, nur zu einem sehr geringen Anteil.
Beim Phos4Life Verfahren kann die gesamte Fremdschlammmenge weiterhin auf der ARA Thunersee entwässert und zusammen mit dem eigenen Faulschlamm zu einer Monoverbrennungsanlage transportiert werden.

Klärschlamm der Region

Akteure: ARAs in der Region, Kanton

Der entwässerte Klärschlamm der umliegenden ARAs, welcher aktuell direkt in der KVA Thun entsorgt wird, kann bei der Wahl eines Schlammverfahrens auf der ARA Thunersee nicht mit behandelt werden.
Diese ARAs müssen unabhängig von der Wahl des Verfahrens der ARA Thunersee einen alternativen Entsorgungsweg finden.

Marktpotential resp. Verwendung des gewonnen Phosphor-Rezyklats

Akteure: Kanton, Düngeindustrie, Landwirtschaft, Biomassezentrum

Nach Aussage der Düngerindustrie ist eine nachhaltige und kontinuierliche Absatzmöglichkeit von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm nur möglich, wenn das Phosphat zu einem wasserlöslichen Tripelsuperphosphat (TSP) aufgeschlossen wird [16]. Eine Übersichtsarbeit zeigt jedoch, dass zum Beispiel Struvit im Bereich der Pflanzenverfügbarkeit eine Effizienz in einem vergleichbaren Bereich wie TSP aufweisen kann [17].
In jedem Fall ist es für die Etablierung eines Schlammverfahrens auf der ARA Thunersee (oder jeden anderem ARA) entscheidend, dass das phosphorreiche Substrat als Produkt – und nicht als Abfall – von der ARA abgeführt werden kann. Des Weiteren ist es wichtig, dass das phosphorreiche Substrat/Produkt sinnvoll weiterverarbeitet werden kann. Um dies zu ermöglichen ist einerseits der Vollzug gefordert, die analog zum Baustoffrecycling Lösungen zur Wertstoffextraktion mittragen muss. Andererseits ist Düngeindustrie und Landwirtschaft gefordert, die diese Wertstoffe wohlwollend in den Kreislauf zurückbringen muss.

Thermische Verwertung

Akteure: Kanton, KVA Thun, Monoverbrennungsanlagen, Zementindustrie

Getrockneter Klärschlamm kann als CO_2-neutraler Brennstoff thermisch verwertet werden. Aktuell geschieht dies auf der KVA Thun. Wird die Phosphorrückgewinnung an einem externen Standort durchgeführt, kann die KVA Thun den Schlamm nicht mehr thermisch verwerten. Beim der Wahl eines Schlammverfahrens wäre dies weiterhin möglich. Alternativ könnte bei einem Schlammverfahren die thermische Verwertung auch in der Zementindustrie erfolge. Dies hätte den Vorteil, dass die Rückstände direkt in den Zement integriert und nicht mehr auf Deponien entsorgt werden müssten, was der strategischen Ausrichtung des Kantons entspricht.

Finanzierung

Akteure: ARA, Bund, Einwohner im Einzugsgebiet

Im Bereich der Finanzierung der Phosphorrückgewinnung sind zentrale Fragen bzgl. der Machbarkeit und Marktfähigkeit offen. Diese betreffen sowohl die potenziellen Abnehmer als auch die Einwohner im Einzugsgebiet, welche nach dem Verursacherprinzip für die Kosten aufkommen müssen [9]. Aktuell sind jedoch keine Abgaben analog der Abgabe zur Finanzierung der Stufen zur Elimination von Mikroverunreinigungen vorgesehen. Gemäss Vollzugshilfe muss der Kanton für einen wirtschaftlichen Betrieb der Abfallanalgen sorgen. Diese Thematik der Finanzierung wird aktuell im Rahmen des Projektes «SwissPhosphor» bearbeitet.

9 FAZIT

Die Studie zeigt, dass auf der Basis der Schlammverwertung für die Umsetzung der Phosphorrückgewinnung auf der ARA Thunersee momentan kein marktfähiges Verfahren existiert. Auch bei der Beurteilung der Alternativverfahren ergeben sich noch viele offene Fragen. Dass aktuell vielversprechendste Verfahren (Phos4Life®) ist ebenfalls noch nicht betriebsfähig und muss weiterentwickelt werden. Entsprechend liegt aktuell kein Verfahren vor, welches direkt umgesetzt werden kann.

Grundlagen zu den offenen Punkten rund um die Umsetzung, die Finanzierung, die Technik sowie die Absatzfähigkeit der Phosphorrezyklate werden im Rahmen der Weiterführung des Projektes «SwissPhosphor» erarbeitet (siehe Kapitel 2.4). Dabei wird der Fokus weiterhin auf den Ascheverfahren liegen.

Die ökologische Betrachtung zeigt aber, dass für die Bereitstellung von mineralischem Recyclingdünger ein Verfahren vor Ort gegenüber dem betrachteten Ascheverfahren Phos4Life® in Punkto Nachhaltigkeit besser bewertet wird. Zum einen wird dies bei der ökologischen Beurteilung gemäss Kapitel 7, aber auch bei der Beurteilung der Entsorgungswege gemäss Kapitel 5.5 ersichtlich. Weiter bietet ein Verfahren vor Ort die Möglichkeit, dass mit der Verwertung des abgereicherten Klärschlammes in der Zementindustrie am Ende keine Reststoffe deponiert werden müssen und der Stoffkreislauf geschlossen werden könnte.

Basierend auf diesen Erkenntnissen ist es sinnvoll die offenen Fragestellungen rund um die beiden Best-Verfahren auf der ARA (Schlammverfahren) weiter zu verfolgen.
Beim ExtraPhos®-Verfahren sollen mit der Firma REMONDIS Gespräche betreffend der Gründe für die Aufgabe des Verfahrens geführt, sowie patentrechtliche Aspekte geklärt werden. Da das Verfahren jedoch von der Firma in Hinblick auf die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm nicht weiterentwickelt wird, kann erwartet werden, dass eine entsprechende Unterstützung nur schwierig zu bekommen ist.
Daher soll das innovative Verfahren LysoPhos® im Rahmen von Labor- und Pilotversuchen weiterverfolgt werden. In einem ersten Schritt sollen die Berechnungen zum Potential des Verfahrens mithilfe von spezifischen Laborversuchen untermauert und detaillierter ausgewertet werden. In einem zweiten Schritt können die beiden etablierten Verfahren PONDUS® und CalPrex® in einer Pilotanlage kombiniert betrieben werden, um die offenen Fragestellungen rund um die Verfahrenskombination zu klären. In einer Pilotanlage kann zudem die Fällung dahingehend untersucht werden, ob eine Brushitfällung zusätzliche technische Vorteile bringt und inwiefern die Zugabe von Hilfsstoffen reduziert werden kann, da hierbei ein Potential zur weiteren Reduktion der Umweltbelastung besteht (siehe Kapitel 7.2).

Parallel dazu soll das Projekt zur Verwertung des Rezyklats in der Region (gemäss Kapitel 8.3) weitergeführt werden. Können die erfolgreichen Voruntersuchungen bestätigt werden, hätte man mit diesem Verwertungsweg des Rezyklats ein Potential für Gewinnung eines nachhaltigen Produktes. Dieses Projekt sollte mit der Prüfung eines alternativen Absatzmarktes ergänzt werden.

Kann mit diesen Untersuchungen die Machbarkeit des Schlammverfahrens sowie die Verwertung des Rezyklats bestätigt werden, sollten der nachhaltige, regional geschlossene Phosphorkreislauf weiterverfolgt und in einem nächsten Schritt die Fragestellungen rund um die finanziellen und rechtlichen Aspekte sowie der Zuständigkeit angegangen werden.

10 AUSBLICK

10.1 ERHEBUNG DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEN

Um die Datengrundlage der ARA zu verifizieren, sollten in Zukunft die Empfehlung des VSA [26] berücksichtigt werden und die erstellten Bilanzen (gemäss Kapitel 3.1) auch in den Folgejahren erstellt werden. Dies bedingt vor allem die regelmässigere Analyse der Eisenkonzentration in den Schlämmen der ARA. Ansonsten ist das aktuelle Messprogramm für die Bilanzierungen der ARA ausreichend.

Um die Übertragbarkeit von Resultaten von Laborversuchen und Pilotierungen auf andere ARAs zu überprüfen, würden weitere Fraktionierungsversuche (Eluattests, gemäss Kapitel 3.2) einer Anlage mit Eisenfällung interessante Aspekte liefern. Zudem sollte zur Beurteilung der Relevanz der jahreszeitlichen Schwankungen Eluattest in verschiedenen Monaten durchgeführt werden. Die umfangreichen Eluattest nach Uhlmann können dabei ggf. an den in Frage kommenden Verfahren angepasst werden.

Bei der Schadstoffbelastung ist die Datengrundlage bei Arsen sowie den organischen Parameter mit einer bzw. zwei Analysen sehr gering (siehe Kapitel 3.3). Bei einer Weiterführung des Projektes sollten diese Parameter, vor allem der Parameter Dioxin /Furan wegen voraussichtlicher Fehlanalyse bei der ersten Messung, mit weiteren Analysen verifiziert werden.

10.2 LABORVERSUCHE UND PILOTIERUNG

Für die weitere Beurteilung der Schlammverfahren sollen in einem nächsten Schritt Labor- und Pilotversuche durchgeführt werden:

- ExtraPhos®:
  Mit der Firma REMONDIS muss geklärt werden, welche Gründe dazu geführt haben, dass das Verfahren nicht weiterentwickelt wird und inwieweit die interessanten Aspekte des Verfahrensansatzes für ARAs doch noch weiterverfolgt werden könnten.
- LysoPhos®:
  In Absprache mit CNP CYCLES GmbH sollen offenen Fragestellungen rund um die Verfahrenskombination PONDUS® und der Kristallisation gemäss dem CalPrex®-Verfahren zusammengetragen werden. Mit spezifischen Laborversuchen mit dem Klärschlamm der ARA Thunersee soll die spezifische Eignung des Verfahrens für die ARA Thunersee geprüft werden. Liefern diese Versuche vielversprechende Resultate, muss im Anschluss mit einer Pilotierung vor Ort die Integration des Verfahrens in den Betrieb der ARA Thunersee getestet und das Betriebspersonal mit der neuen Verfahrenstechnik vertraut gemacht werden.

Weiter sollen die Versuche im Rahmen des Parallelprojektes zur Verwertung des Phosphorrezyklats im Biomassezentrum weitergeführt werden. Basierend auf der Empfehlung der Ökobilanzierung [11] sollte im Rahmen dieser Versuche die Pflanzenverfügbarkeit und die agronomische Effizienz von Struvit und Brushit vertieft abgeklärt werden.

10.3 ABKLÄRUNGEN MIT AKTEUREN

Die Analyse der Interessen der Akteure (siehe Kapitel 8.3) zeigt, dass beim Thema Phosphorrückgewinnung noch viele Fragen ungeklärt sind.

Überregionale Aspekte werden ihm Rahmen des Projektes «SwissPhosphor» ausgearbeitet. Dabei stehen gemäss Kapitel 2.4 die Themen Planung, Finanzierung, Technik und Produkte

im Vordergrund.

Zur Klärung der offenen Fragen betreffend der regionalen Aspekte sind mit den relevanten Akteuren und unter Einbezug des Kanton Berns gezielte Gespräche zu führen. Dabei sollen vor allem die umliegenden ARAs und die KVA Thun beigezogen werden und mit dem Kanton die Aspekte einer etwaigen Rückführung von Reststoffen aus anderen Kantonen sowie bei der Verwertung des Rezyklats im Biomassezentrum diskutiert werden.

Bern, 07. März 2022

Verfasser: Selina Jörg, Isabell Köpping

HOLINGER AG

Selina Jörg
Projektleiterin
selina.joerg@holinger.com
+41 31 370 30 55

Patrick Graf
Projektleiter
patrick.graf@holinger.com
+41 41 368 99 46

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Agroscope (2017): Entwicklung agronomischer und ökologischer Anforderungen an die Mindestqualität von Mineralischen Recyclingdüngern (MinRec)

[2] ATV-DWA (2011): Ermittlung und Bewertung der biologischen und chemischen Phosphorelimination bei der Simultanfällung. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.2 "Abwasserreinigung durch Fällung und Flockung". Fachbeitrag Korrespondenz Abwasser, Abfall 2011 (58) Nr. 5, 456- 464

[3] ATV-DWA (2011): Arbeitsblatt DWA-A202. Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser

[4] AWA Kanton Bern (2020): P-Recycling aus Klärschlamm – Statusbericht per 1.9.2020

[5] AWA Kanton Bern (2021): Bericht – BioP auf Berner ARAs

[6] Berg, M. et al. (2021): Quecksilber im Schweizer Abwasser: Konzentrationen, Massenflüsse, Speziierung und Rückhalt. Aqua & Gas 1/2021, 14-20

[7] Bundesamt für Umwelt, BAFU, Abteilung für Abfall und Rohstoffe (Juli 2019): Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung, Aktualisierte Bewertung von Technologien für die Schweiz

[8] Bundesamt für Umwelt, BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe (Januar 2020): Grundlagenbericht SwissPhosphor

[9] Bundesamt für Umwelt BAFU (2020): Phosphorreiche Abfälle. Ein Modul der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug, 19 S.

[10] Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe (Februar 2021): Planung 2.1 "SwissPhosphor", Entscheidungshilfe für die Umsetzung des Phosphorrecyclings in der Schweiz

[11] Carbotech AG (Januar 2022): Verfahren zur P-Rückgewinnung auf der ARA Thunersee – Teilbericht: Ökobilanz

[12] Erzo Entsorgung Region Zofingen (8. Dezember 2021): Information Phosphorrecycling: Zusammenarbeit erzo - Holcim

[13] ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwissenschaften (2018): Studie zum ökologischen Vergleich der Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche mittels Phos4life-Verfahren mit der Primärproduktion von P-Säure aus Rohphosphat – Endbericht

[14] Frischknecht, R. et al. (2021). Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz (S. 200).

[15] Gaussen-Freidl, B., VBSA (2019): Klärschlammentsorgung in der Schweiz in Hinblick auf die Rückgewinnung von Phosphor, Erhebung der Daten 2017 im Auftrag des Bundesamts für Umwelt

[16] Kopp, Chr. Agricura Plattform (2020): Verwertung von Recycling Phosphor in der Landwirtschaft. 3. Fachkonferenz «Phosphorrecycling aus Abwasser & Klärschlamm», 11. November 2020

[17] Kratz, S. et al. (2018): Pflanzenverfügbarkeit und agronomische Effizienz von klärschlammbasierten Phosphor (P)-Recyclingdüngern. Berliner Klärschlammkonferenz 5./6.

[18] Kupper, T. (2008): Belastung und Quellen organischer Schadstoffe im Klärschlamm und ihre

Bedeutung im Zusammenhang mit dem Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung in der Schweiz. Österr Wasser- und Abfallw 60, 45–54

[19] Psenner, R. et al. (1984): Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten. Arch. Hydrobiol./Suppl. 70, 111-155

[20] Uhlmann, D. et al. (1990): A simple method to distinguish between polyphosphate and other phosphate fractions of activated sludge. Wat. Res. 24(11), 1355-1360

[21] Verordnung vom 04. Dezember 2015 (Stand am 01. Januar 2021) über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (SR 814.600; nachfolgend: Abfallverordnung, VVEA)

[22] Verordnung vom 10. Januar 2001 (Stand am 01. Januar 2019) über das Inverkehrbringen von Düngern (SR 916.171; nachfolgend: Dünger-Verordnung, DüV)

[23] Verordnung vom 18. Mai 2005 (Stand am 01. Juni 2021) zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (SR 814.81; nachfolgend: Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV)

[24] Verordnung vom 27. September 2017 (Stand am 02. Oktober 2017) über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (nachfolgend: Klärschlammverordnung, AbfKlärV)

[25] Vriens, B. et al. (2018): Spurenelemente in Schweizer Abwasser: Aktuelle Konzentrationen und Frachten. Aqua & Gas 1/2018, 40–46

[26] VSA (2020): Analytikdaten in ARA – Empfehlung

[27] Zennegg M. et al. (2013): Temporal trends of persistent organic pollutants in digested sewage sludge (1993–2012). Environment International 60, 202–208

ANHANG 1

STOFFSTRÖME UND BILANZEN

ANHANG 1 - STOFFSTRÖME UND BILANZEN

ZUSAMMENFASSUNG

Phosphorfrachten der Ströme

Basierend auf den Daten 2020

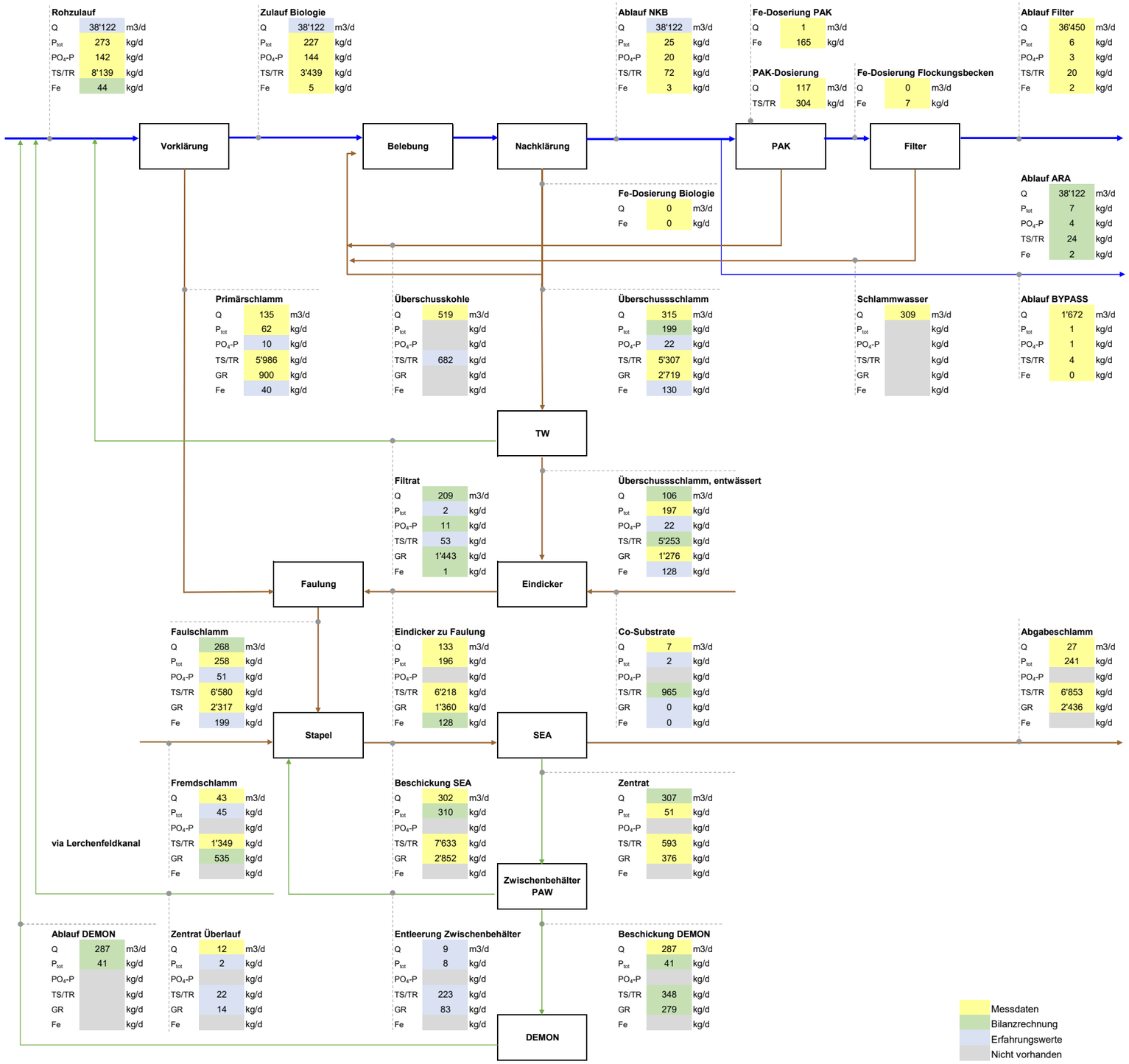
	Frachten	
	kg P/d	Anteil von Rohzulauf
Rohzulauf	275	100%
Zulauf Biologie	225	82%
Ablauf Nachklärung	25	9%
Überschusskohle & Schlammwasser	20	7%
Ablauf ARA	5	2%
Primärschlamm	60	22%
Überschussschlamm, entwässert	200	73%
Faulschlamm	260	95%
Fremdschlamm	45	16%
Beschickung SEA	310	113%
Abgabeschlamm	240	87%
Zentrat	50	18%
Rücklauf	40	15%

Wiedersprüche Bilanzen

	2019	2020	Bemerkungen
Eisen			Für die Eisenbilanz liegen keine Analysen im Schlamm aus den Jahren 2019 / 2020 vor. Entsprechend wurden für die Bilanz Erfahrungswerte verwendet, welche auf Einzeluntersuchen aus dem Jahr 2021 basieren. Bei der Bilanzierung der Biologie+MV-Stufe zeigt sich der Einfluss der zeitlich verschobenen Analytik. In den Jahren 2019 / 2020 wurde gegenüber der aktuellen Verfahrensweise noch deutlich mehr Eisen in der MV-Stufe zudosiert. Entsprechend ist anzunehmen, dass mit der Eisenkonzentration im Überschussschlamm mit dem Erfahrungswert 2021 einen zu tiefen Wert berücksichtigt wurde. In der Fe-Bilanz der Faulung zeigt sich in beiden Jahren eine höhere Fracht im
Biologie+MV-Stufe	17%	25%	
Faulung	-28%	-18%	
Glührückstand			Auch bei der Bilanz des Glührückstandes über die Faulung kommt es zu einem Minderbefund im Frischschlamm. Die entsprechende Bilanzierung der Daten 2020 sowie der gesamten Schlammbehandlung zeigt jedoch keinen signifikanten Wiederspruch auf.
Faulung	-12%	-6%	
Schlammbehandlung	-1%	-4%	
Phosphor			Die Phosphorbilanz des Jahres 2019 zeigt bei der Biologie+MV-Stufe, sowie bei der Schlammbehandlung ein Wiederspruch. Die übrigen P-Bilanzen liegen innerhalb der Zielgrösse. Ensprechend werden die Online- sowie die Messdaten des Jahres 2020 als Grundlage für die Studie verwendet.
Gesamtanlage	1%	9%	
VKB	-9%	-5%	
Biologie+MV-Stufe	-12%	1%	
Schlammbehandlung	12%	6%	

ANHANG 1 - STOFFSTRÖME UND BILANZEN

STOFFSTRÖME 2020

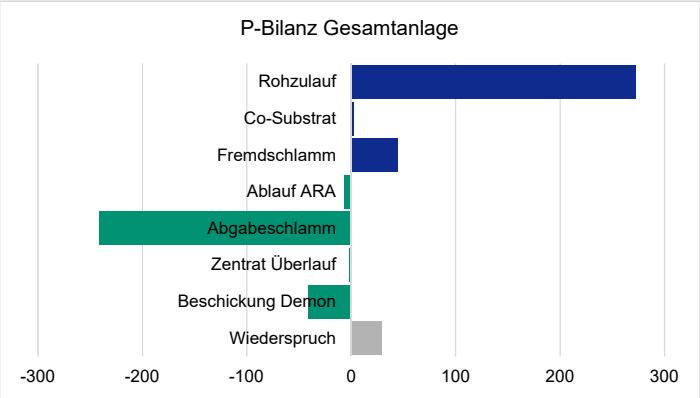


ANHANG 1 - STOFFSTRÖME UND BILANZEN

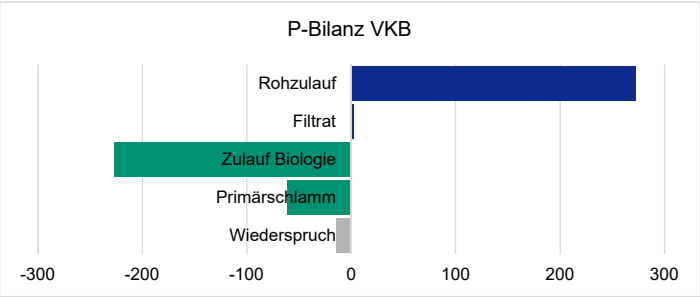
BILANZEN 2020

Phosphor-Bilanzen 2020

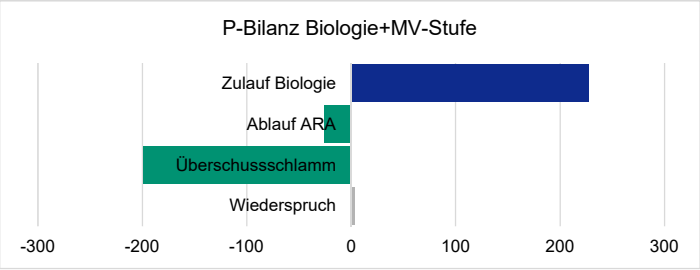
Gesamtanlage	kg_P/d
Rohzulauf	273
Co-Substrat	2
Fremdschlamm	45
Ablauf ARA	-7
Abgabeschlamm	-241
Zentrat Überlauf	-2
Beschickung Demon	-41
Wiederspruch	29
	9%



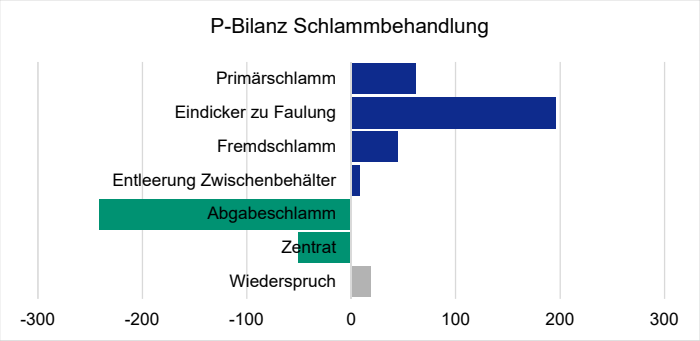
VKB	kg_P/d
Rohzulauf	273
Filtrat	2
Zulauf Biologie	-227
Primärschlamm	-62
Wiederspruch	-14
	-5%



Biologie+MV-Stufe	kg_P/d
Zulauf Biologie	227
Ablauf ARA	-25
Überschussschlamm	-199
Wiederspruch	3
	1%

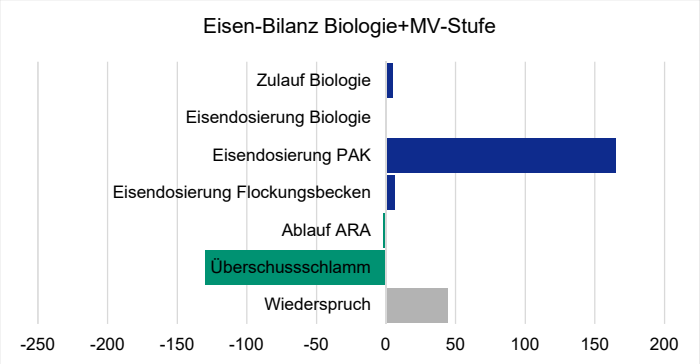


Schlammbehandlung	kg_P/d
Primärschlamm	62
Eindicker zu Faulung	196
Fremdschlamm	45
Entleerung Zwischenbehälter	8
Abgabeschlamm	-241
Zentrat	-51
Wiederspruch	18
	6%

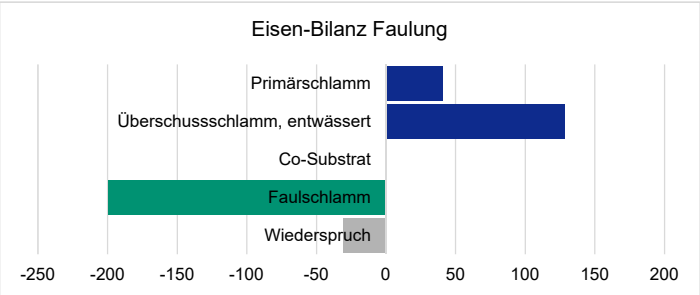


Eisen-Bilanzen 2020

Biologie+MV-Stufe	kg_{Fe}/d
Zulauf Biologie	5
Eisendosierung Biologie	0
Eisendosierung PAK	165
Eisendosierung Flockungsbecken	7
Ablauf ARA	-2
Überschussschlamm	-130
Wiederspruch	44
	25%

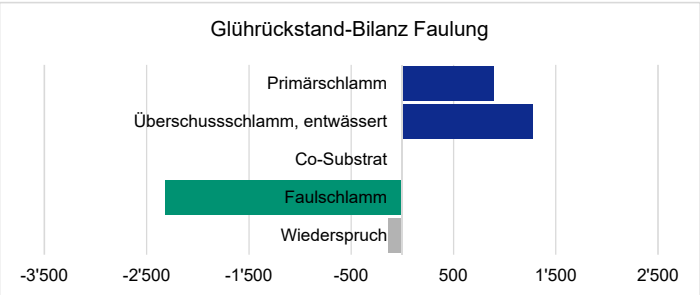


Faulung	kg_{Fe}/d
Primärschlamm	40
Überschussschlamm, entwässert	128
Co-Substrat	0
Faulschlamm	-199
Wiederspruch	-30
	-18%

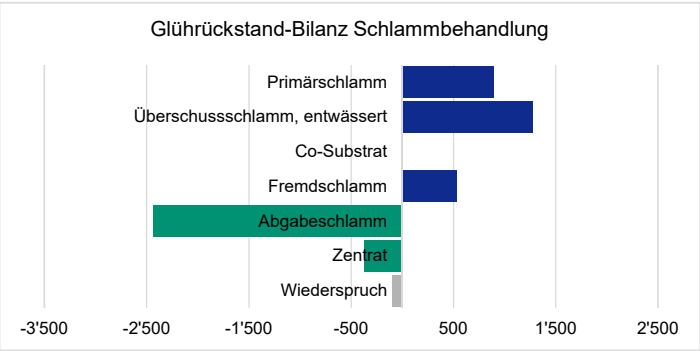


Glührückstand-Bilanzen 2020

Faulung	kg_{GR}/d
Primärschlamm	900
Überschussschlamm, entwässert	1'276
Co-Substrat	0
Faulschlamm	-2'317
Wiederspruch	-141
	-6%

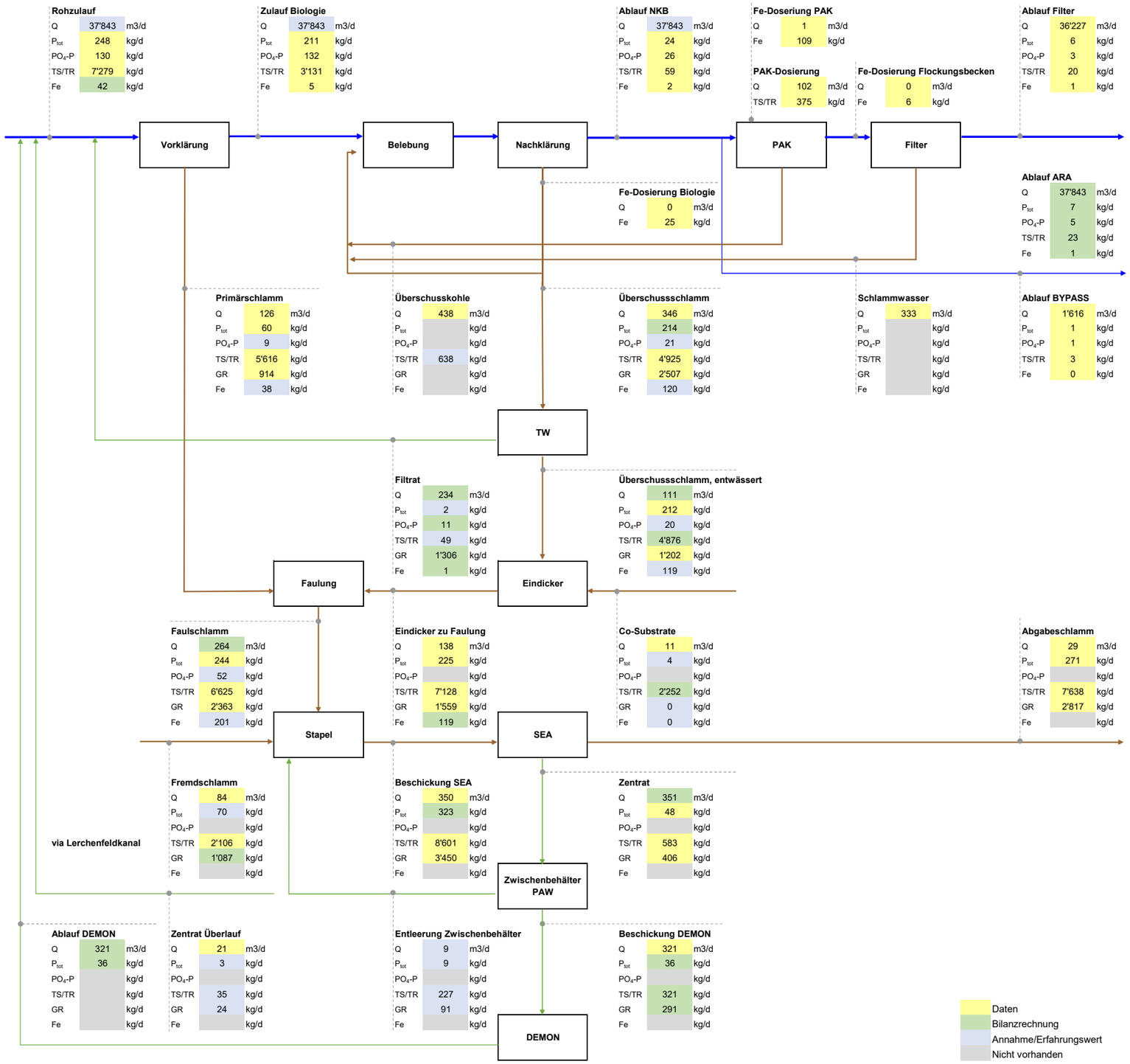


Schlammbehandlung	kg_{GR}/d
Primärschlamm	900
Überschussschlamm, entwässert	1'276
Co-Substrat	0
Fremdschlamm	535
Abgabeschlamm	-2'436
Zentrat	-376
Wiederspruch	-100
	-4%



ANHANG 1 - STOFFSTRÖME UND BILANZEN

STOFFSTRÖME 2019

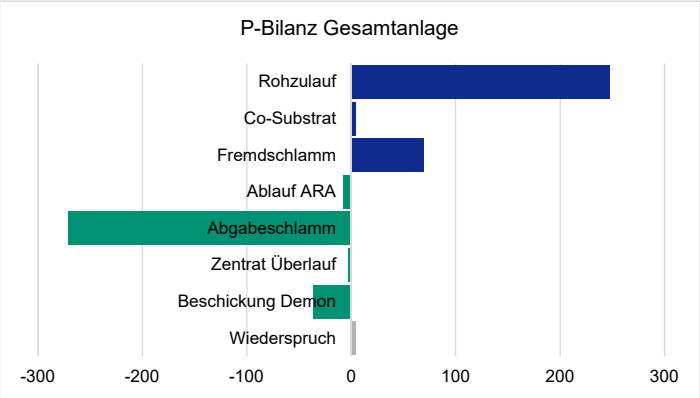


ANHANG 1 - STOFFSTRÖME UND BILANZEN

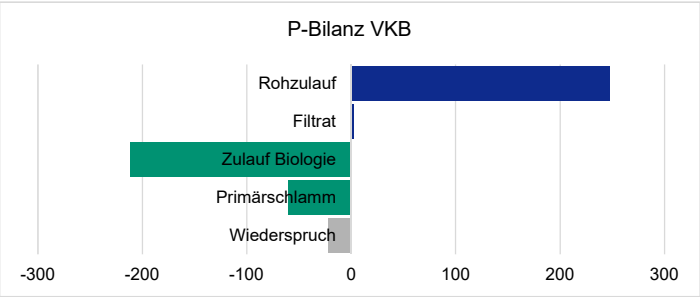
BILANZEN 2019

Phosphor-Bilanzen 2019

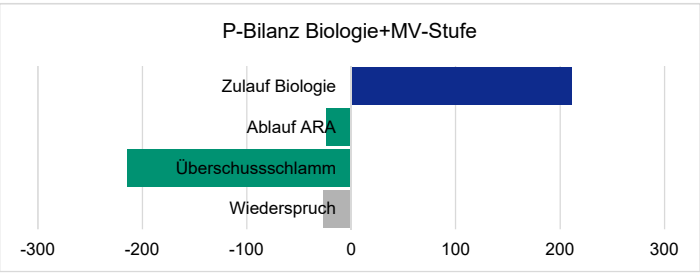
Gesamtanlage	kg_P/d
Rohzulauf	248
Co-Substrat	4
Fremdschlamm	70
Ablauf ARA	-7
Abgabeschlamm	-271
Zentrat Überlauf	-3
Beschickung Demon	-36
Wiederspruch	4
	1%



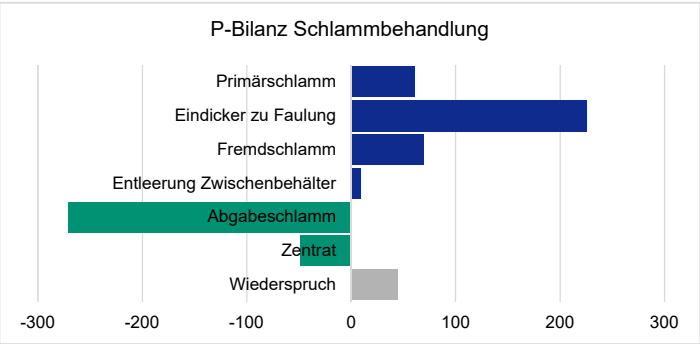
VKB	kg_P/d
Rohzulauf	248
Filtrat	2
Zulauf Biologie	-211
Primärschlamm	-60
Wiederspruch	-21
	-9%



Biologie+MV-Stufe	kg_P/d
Zulauf Biologie	211
Ablauf ARA	-24
Überschussschlamm	-214
Wiederspruch	-26
	-12%

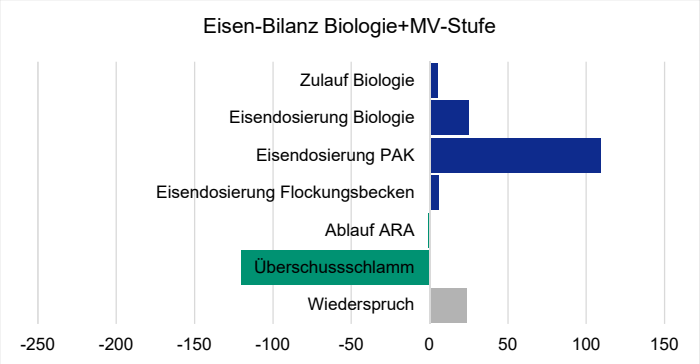


Schlammbehandlung	kg_P/d
Primärschlamm	60
Eindicker zu Faulung	225
Fremdschlamm	70
Entleerung Zwischenbehälter	9
Abgabeschlamm	-271
Zentrat	-48
Wiederspruch	45
	12%

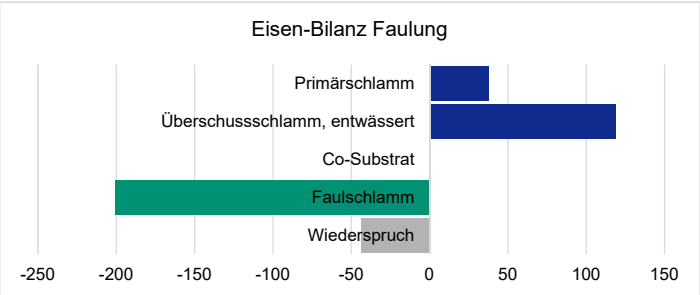


Eisen-Bilanzen 2019

Biologie+MV-Stufe	kg_{Fe}/d
Zulauf Biologie	5
Eisendosierung Biologie	25
Eisendosierung PAK	109
Eisendosierung Flockungsbecken	6
Ablauf ARA	-1
Überschussschlamm	-120
Wiederspruch	24
	17%

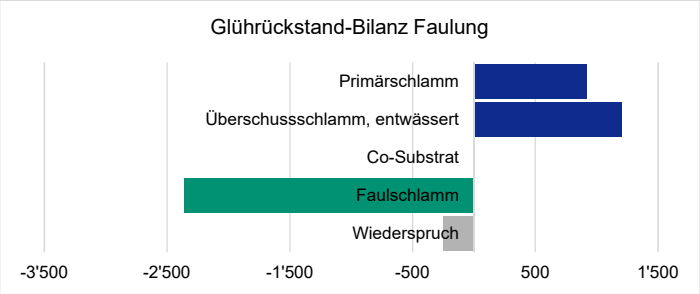


Faulung	kg_{Fe}/d
Primärschlamm	38
Überschussschlamm, entwässert	119
Co-Substrat	0
Faulschlamm	-201
Wiederspruch	-43
	-28%

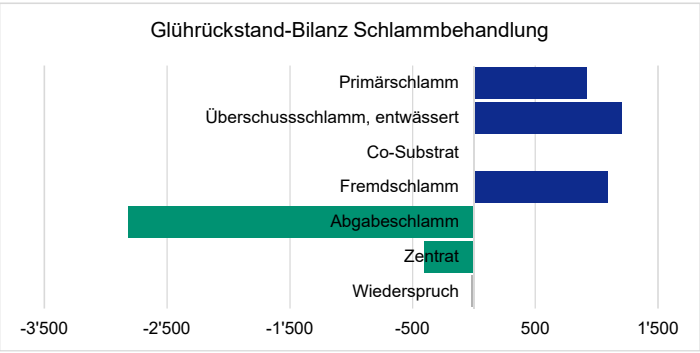


Glührückstand-Bilanzen 2019

Faulung	kg_{GR}/d
Primärschlamm	914
Überschussschlamm, entwässert	1'202
Co-Substrat	0
Faulschlamm	-2'363
Wiederspruch	-247
	-12%



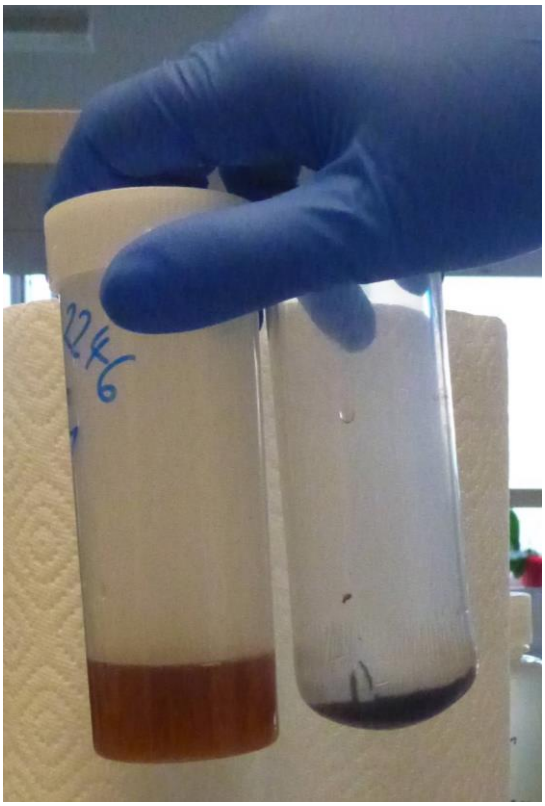
Schlammbehandlung	kg_{GR}/d
Primärschlamm	914
Überschussschlamm, entwässert	1'202
Co-Substrat	0
Fremdschlamm	1'087
Abgabeschlamm	-2'817
Zentrat	-406
Wiederspruch	-20
	-1%



ANHANG 2

BERICHT ELUATVERSUCHE MIT KLÄRSCHLAMMPROBEN

Phosphor-Fraktionierung



Eluatversuche mit Klärschlammproben

Zofingen, 29.06.2021

Gemeindeverband ARA Thunersee

ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, CH-4800 Zofingen
Telefon +41 (0)62 745 70 50
www.envilab.ch, info@envilab.ch

Version	Datum	Dokumentname	Autor	Freigabe
1.0	25.06.2021	P-Fraktionierung	Suzanne Mettler	Magali Christ
1.1	29.06.2021	P-Fraktionierung	Suzanne Mettler	Magali Christ

INHALTSVERZEICHNIS

1 AUSGANGSLAGE UND FRAGESTELLUNG 1

1.1 Hintergrund 1

1.2 Fragestellung 1

2 METHODEN 2

2.1 P-Fraktionierung 2

2.2 Durchführung der Eluate 3

3 RESULTATE 4

3.1 Charakterisierung der Schlammproben 4

3.2 P-Fraktionierung 4

3.3 Elementkonzentrationen bei der Fraktionierung 7

4 FAZIT 10

ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Ergebnisse der P-Fraktionierungsversuche. 5

Abbildung 2: Konzentrationen der bei den Fraktionierungsversuchen freigesetzten Elemente 9

TABELLEN

Tabelle 1: Eluat-Schritte der P-Fraktionierung nach (D. Uhlmann, 1990) 2

Tabelle 2: Charakterisierung der untersuchten Schlammproben 4

ANHANG

Anhang 1 Analysenberichte ENVILAB AG

1 AUSGANGSLAGE UND FRAGESTELLUNG

1.1 Hintergrund

Der Gemeindeverband ARA Thunersee beauftragte HOLINGER Bern mit der Machbarkeitsstudie Phosphorrecycling. Die Machbarkeitsstudie soll verfahrenstechnische Lösungen identifizieren, die sich betrieblich gut in die heutigen Verfahrens- und Entsorgungsstufen integrieren lassen.

Diese umfassen eine konventionelle Belebtschlamm-Biologie mit biologischer Phosphor-Elimination, an der eine vierte Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen angeschlossen ist. Der anfallende Schlamm wird in einer mesophilen Schlammfaulung stabilisiert. Entsorgt wird der Schlamm schliesslich nach einer Entwässerung durch thermische Verwertung in der KVA Thun.

ENVILAB AG ist als fachliche Unterstützung für die chemische Analytik am Projekt beteiligt.

1.2 Fragestellung

Im Rahmen der Studie werden die Phosphorfrachten über die Verfahrensstufen, insbesondere die Stufen Biologie, Elimination der Mikroverunreinigungen und Faulung, quantifiziert. Nebst der absoluten Phosphorfrachten interessiert zudem, wie der Phosphor jeweils vorliegt, als gelöstes Phosphat oder als organisch oder noch mineralisch gebundener Phosphor im Klärschlamm.

Zum einen dienen diese Angaben für die Plausibilisierung der Faktoren Bio-P und Beta-Wert nach DWA, welche die biologische Phosphorelimination beschreiben. Zum anderen soll die Kenntnis über die Phosphorverteilung helfen, geeignete Rückgewinnungsverfahren auf die vorliegenden Phosphorfraktionen abzustimmen.

2 METHODEN

2.1 P-Fraktionierung

Zur Differenzierung der verschiedenen Phosphorfraktionen im Klärschlamm wurde die Methode nach (D. Uhlmann, 1990) verwendet. Sie wurde für die Charakterisierung von P-Fraktionen in Klärschlammproben basierend auf eine bereits für Sedimente verwendete Phosphorfraktionierung weiterentwickelt (R. Psenner, 1984). Sie wurde später mehrfach für die Charakterisierung von Klärschlämmen angewendet (Eschenhagen, 2004; Zimmermann, 2010).

Die Methode beruht auf einer aufeinanderfolgenden Abfolge von vier Eluaten, wobei die Eluat-Lösungen und teilweise die Eluat-Bedingungen jeweils ändern. Am Ende des jeweiligen Eluat-Schritts wird der Feststoff durch Zentrifugation abgetrennt. Der Feststoffrückstand wird anschliessend mit dem nächsten Eluat-Reagenz versetzt. In allen Eluat-Überständen werden der Gesamtphosphor und das Phosphat, nach nochmaligem Filtrieren (0.45 µm), bestimmt.

Relevant für die Interpretation sind die Phosphatkonzentrationen, welche als *gelöste reaktive Phosphat-Fraktionen* bezeichnet werden (PO_4-P). Demgegenüber stehen die Konzentrationen des restlichen Phosphors (Rest-P), welche aus der Differenz zwischen Gesamtphosphor und Phosphat berechnet werden. Dieser Restphosphor soll jeweils *organischer Phosphor-Fraktionen* entsprechen.

In Tabelle 1 sind die einzelnen Eluate mit den jeweiligen Reagenzien und Eluat-Bedingungen sowie die daraus gewonnenen Fraktionen zusammengefasst.

Tabelle 1: Eluat-Schritte der P-Fraktionierung nach (D. Uhlmann, 1990)

Eluat-Schritt	Reagenz	Bedingungen	Ergebnis P-Fraktionen
1	Wasser	20°C, 15 Min	*PO_4-P*: gelöst und locker adsorbiertes Phosphat *Rest-P*: gelöste Polyphosphate und Polyphosphatbruchstücke aus Absterben und Lyse der Zelle
2	$NaHCO_3$ (0.11 M) + Dithionit ($Na_2S_2O_4$, 0.11 M)	40°C, 30 Min.	*PO_4-P*: an Eisen chemisch gebundenes oder an Eisenhydroxiden adsorbiertes Phosphat *Rest-P*: Wahrscheinlich Zellphosphat, das bei der höheren Temperatur hydrolysiert und aus den Zellen herausgelöst wird.
3	NaOH (1M)	20°C, 16 h	*PO_4-P*: An Aluminiumoxide gebundenes Phosphat und durch Hydroxid (OH^-) lösliche Phosphorverbindungen *Rest-P*: Hauptteil des organischen Phosphors
4	HCl 0.5 M)	20°C, 16 h	*PO_4-P*: Calcium- und Magnesium-Phosphate, Apatite, evtl. Struvit *Rest-P*: Restgehalt an organischen Phosphaten

Um weitere Informationen über die im Klärschlamm vorkommenden Phosphorverbindungen zu erhalten, welche während den Eluaten aufgelöst werden, wurden zusätzlich in den Eluaten die Gesamtgehalte an Eisen, Aluminium, Calcium, Magnesium und Schwefel bestimmt.

2.2 Durchführung der Eluate

Die P-Fraktionierung wurde mit drei Klärschlammproben durchgeführt:

(1) Faulschlamm aus dem Faulraum 1,

(2) Primärschlamm aus dem Vorklärbecken 1

(3) Überschussschlamm aus dem Eindicker 1

Die Durchführung der Eluate erfolgte mit den frischen Klärschlammproben. Die Proben waren nicht älter als 48 Stunden und wurden bis zum Beginn der Experimente kühl gelagert (<10 °C).

Nebst der P-Fraktionierungsversuche wurden die Schlammproben durch die Bestimmung der nachfolgenden Parameter charakterisiert:

- Trockensubstanz
- CSB gesamt
- Gesamtgehalte Phosphor, Eisen, Aluminium, Calcium und Schwefel.

Da die Proben einen sehr hohen Wasseranteil hatten (die Trockensubstanz lag zwischen 2.5% und 4.4%), wurden beim ersten Eluat-Schritt den Klärschlammproben kein zusätzliches Wasser zugegeben, sondern sie wurden direkt zentrifugiert. In den nachfolgenden Eluat-Schritten wurde der Feststoffrückstand im Verhältnis von 1:20 zur Reagenzlösung vorgelegt, um zu gewährleisten, dass das Reagenz im Überschuss vorlag.

3 RESULTATE

3.1 Charakterisierung der Schlammproben

Die Zusammensetzung der Schlammproben ist in Tabelle 2 dargestellt.

Beim organischen Material (CSB gesamt) zeigen die Ergebnisse zuerst eine Zunahme an organischem Gehalt vom Primär- zum Überschussschlamm, während im Faulschlamm eine Abnahme festgestellt wird. Dies ist naheliegend, da der Überschussschlamm aus der biologischen Stufe der ARA stammt, in der die Biomasse sich ausgebildet. Während der Faulung verliert dagegen der Schlamm einen Teil des organischen Materials durch die Vergärung und der damit verbundenen Bildung von Methan und Kohlendioxid.

Bei den Elementen findet allgemein eine Aufkonzentrierung vom Primär- über den Überschussschlamm zum Faulschlamm statt, welche im zunehmenden Schlammalter begründet sein könnte. Von allen drei Schlämmen enthält also der Faulschlamm am meisten Phosphor. Ebenfalls liegen im Faulschlamm die anderen Elemente in höchsten Konzentrationen vor, darunter Eisen, das eine ähnlich hohe Konzentration aufweist wie Phosphor.

Tabelle 2: Charakterisierung der untersuchten Schlammproben

Parameter	Einheit	Primärschlamm	Überschussschlamm	Faulschlamm
Trockensubstanz	%	4.04	4.42	2.45
CSB gesamt	g O2 / kg TS	1.8	2.3	0.66
Phosphor	g P / kg TS	11	38	43
Eisen	g Fe / kg TS	5.6	24	30
Aluminium	g Al / kg TS	3.0	3.3	6.1
Calcium	g Ca / kg TS	25	21	47
Magnesium	g Mg / kg TS	2.3	7.0	6.3
Schwefel	g S / kg TS	4.1	7.0	9.5

3.2 P-Fraktionierung

Die Ergebnisse der Fraktionierungsversuche für die drei Schlammproben sind in der Abbildung 1 oben (in g Phosphor / kg TS) und unten (in kg Phosphor / Tag) dargestellt. Die Fehlerbalken entsprechen ca. 7% und wurden sowohl aus den Duplikaten wie auch den Einwaage- und Rückwaageunterschiede geschätzt. Die vier Eluat-Schritte sind nach dem nachfolgenden Farbschema dargestellt, der Rest-Phosphor jeweils schraffiert:

- Blau: wässriges Eluat
- Orange: Eluat mit dem Reduktionsmittel Natriumdithionit (0.11 M NaS_2O_4) und Bikarbonat (0.11 M $NaHCO_3$)
- Grün: Eluat mit verdünnter Natronlauge (1 M NaOH)
- Violett: Eluat mit verdünnter Salzsäure (0.5 M HCl)

- Weiss: Übriger durch die Fraktionierung nicht erfasster Phosphor (berechnet aus der Differenz zum Gesamtphosphor der Probe).

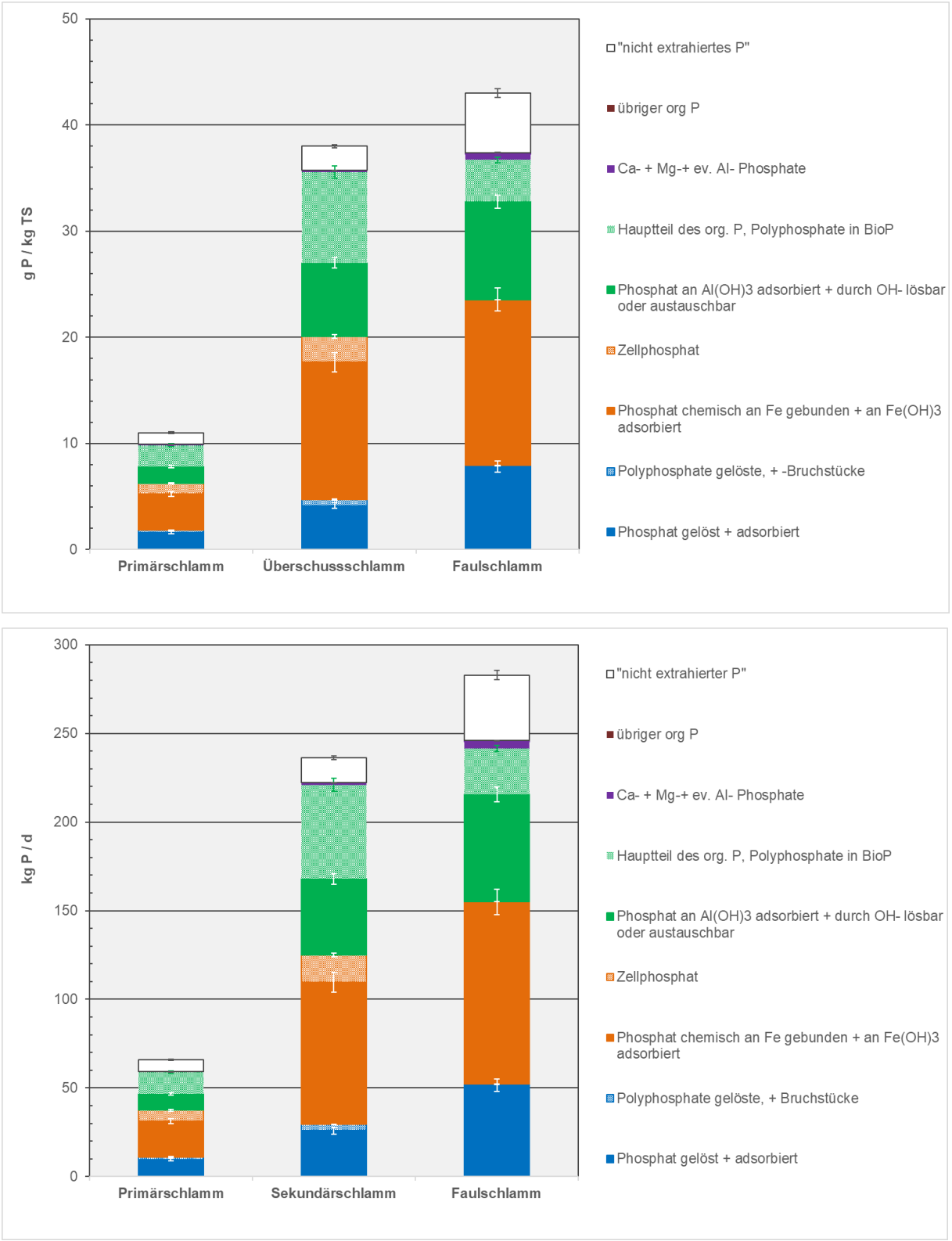


Abbildung 1: Ergebnisse der P-Fraktionierungsversuche. Konzentrationen bezogen auf die Schlammtrockenmasse (oben) und Schlammtagesfrachten (unten).

Die Ergebnisse lassen folgende Beobachtungen zu:

- In allen drei Klärschlammproben dominiert der Anteil des als Phosphat bestimmten Phosphors gegenüber dem Rest-Phosphor, der dem organischen Phosphor entspricht. Der Phosphat-Anteil betrug um die 60% im Primär- und Überschussschlamm und um die 77% im Faulschlamm.
- In Tagesfrachten umgerechnet entsprechen diese Phosphat-Anteile ca. 40 kg P/ d im Primärschlamm, 150 kg P/d im Überschussschlamm und ca. 220 kg P/d im Faulschlamm. Die grossen Unterschiede sind auf die Phosphorgesamtgehalte zurückzuführen, da der Überschussschlamm und der Faulschlamm drei bis vier Mal mehr Phosphor als der Primärschlamm enthalten. So betragen die Tagesfrachten an Gesamtphosphor 66 kg P/d im Primärschlamm gegenüber 236 kg P/d resp. 283 kg P/d im Überschuss- und Faulschlamm.
- Der Phosphat-Anteil lässt sich unter den einzelnen Fraktionen weiter aufschlüsseln:
    - Etwa die Hälfte davon, ca. 30% bis 35%, wurde im Dithionit-Eluat als sogenanntes 'an Eisen oder Eisenhydroxid gebundenes Phosphat' freigesetzt.
    - Im Natriumhydroxid-Eluat, d.h. das als 'an Aluminiumhydroxid adsorbierte und durch Hydroxide lösbare oder austauschbare Phosphat', betrugen die Phosphat-Anteile ca. 15% im Primärschlamm und bis 20% im Überschuss- und im Faulschlamm.
    - Im wässrigen Eluat lag der Phosphatanteil zwischen 11%, resp. 14% im Überschuss- und Primärschlamm und bis 18% im Faulschlamm.
- Der Primärschlamm und der Überschussschlamm enthielten dagegen den höchsten Anteil an organisch gebundenem Phosphor, welcher bei 30% lag. Bezogen auf die Tagesfrachten liegt der Überschussschlamm mit 72 kg P/d gegenüber 20 kg P/d dem Primärschlamm allerdings voraus. Im Faulschlamm beträgt der Anteil organisch gebundener Phosphor gerade noch ca. 10%. Dies entspricht einer Tagesfracht von 28 kg P/d.
- Auch der organische Phosphor lässt sich weiter in Subfraktionen aufteilen:
    - Der im NaOH-Eluat extrahierte Rest-Phosphor gilt als Hauptteil des organischen Phosphors. Er betrug 18% und 22% im Primär- und Überschussschlamm, 9% im Faulschlamm.
    - Die Subfraktionen Zellphosphate aus dem Dithionit-Eluat betrugen 9% im Primärschlamm und 6% im Überschussschlamm. Im Faulschlamm waren solche nicht zu finden (0%).
    - Die Polyphosphate aus dem wässrigen Eluat lagen in tiefen Prozentbereichen: 0% im Faulschlamm, bis 1%- 2% im Überschuss- und Primärschlamm.
- Der übrige von der Fraktionierung 'nicht extrahierter Phosphor' liegt im Bereich von 6% im Überschussschlamm bis 10% resp. 13% im Primär- und Faulschlamm bezogen auf den gesamten Phosphor. In Tagesfrachten umgerechnet ist diese Fraktion im Faulschlamm mit 37 kg P/ d am bedeutendsten.

Im Überschussschlamm (14 kg P/ d) und Primärschlamm (6.5 kg P/ d) sind sie tiefer.

- Es fällt auf, dass die P-Fraktionierung im Überschussschlamm den grössten Anteil Phosphor zu extrahieren vermochte, also in denjenigen Schlammproben in der am meisten organischen Phosphor vorgefunden wurde. Demgegenüber war in der Faulschlammprobe der Anteil an organisch gebundenen Phosphor am niedrigsten, dafür der 'nicht extrahierbare Phosphor' Anteil am höchsten.

3.3 Elementkonzentrationen bei der Fraktionierung

Abbildung 2 stellt die bei den Eluat-Schritten jeweils freigesetzten Konzentrationen der Elemente Eisen, Aluminium, Calcium und Magnesium dar (die Auswertung der Schwefelkonzentrationen war durch die Zugabe des Schwefel-haltigen Eluat-Reagenz im 2. Eluat-Schritt erschwert und sind hier deshalb nicht dargestellt). Diese Elemente binden das Phosphat in mineralischen Verbindungen, so dass deren gleichzeitige Freisetzung auf mögliche Phosphorzusammensetzung in der Klärschlammprobe hinweisen können. Auch bei diesen Elementen wurde mittels Eluat-Abfolge der P-Fraktionierung nicht der komplette Elementgesamtgehalt wiedergefunden, wie es der Anteil 'nicht extrahiert' zeigt. Ausserdem zeigen die Abbildung 2 sowie die Tabelle 2, dass sich die Schlammproben in Bezug auf die Elementzusammensetzung deutlich unterscheiden (s. auch Abschnitt 3.1).

Aus der Abbildung können die nachfolgenden Informationen herausgelesen werden:

- Im wässrigen Eluat wurden vorwiegend Calcium-, jedoch keine Aluminium- und nur wenige Eisen- und Magnesium Verbindungen gelöst. In Verbindung mit Phosphat könnte es sich dabei um gut lösliche Calciumphosphate handeln.
- Das Dithionit-Eluat war am effizientesten, um Calcium-, Magnesium und Eisenverbindungen zu lösen. Die dabei freigesetzten Eisenmengen bestätigen, dass wahrscheinlich Eisenphosphate und Eisenhydroxide und die damit verbundenen Phosphate herausgelöst wurden, wie es die Methoden beschreiben (D. Uhlmann, 1990) (R. Psenner, 1984). Überraschend sind die hohen Calcium- und Magnesiummengen, die dabei ebenfalls freigesetzt wurden. Auf das Phosphat bezogen könnte es sich dabei um Calciumphosphate und Magnesiumphosphate handeln. Dabei könnte das Bikarbonat aus dem Eluat-Reagenz (0.1 M $NaHCO_3$) helfen, das Calcium und das Magnesium aus den Phosphaten herauszulösen. Auch ein Teil des Struvits ($(NH_4)Mg(PO_4)x6H_2O$) könnte in diesem Eluat-Schritt freigesetzt werden.
- Die Aluminiumverbindungen wurden ausschliesslich im Natronlauge-Eluat gelöst. Dabei wurden sehr wahrscheinlich auch Aluminiumphosphate aufgelöst.
- Das Salzsäure-Eluat setzte nur geringe Mengen der Elemente frei. Am meisten in der Faulschlammprobe, dabei handelte es sich um Eisen- und Calciumverbindungen.
- In der Faulschlammprobe fällt auf, dass grössere Mengen an Eisen und Calcium nicht extrahiert werden konnten. Gleichzeitig wurden in dieser Probe die grössten Mengen an nicht extrahierbarem Phosphor gefunden. Dies legt nahe, dass

zumindest ein Teil dieses nicht extrahierbaren Phosphors mit diesen Elementen, darunter Eisenphosphate und die Apatite, verbunden ist.

- Schwefel wurde im wässrigen und vom Salzsäure-Eluat nur in tiefen Mengen freigesetzt. Die in diesen Eluaten freigesetzten Schwefelmengen betrugen ca. 2% bis 7% des Gesamtschwefels (im Dithionit-Eluat und im Natronlauge-Eluat waren die Schwefelkonzentrationen durch die Zugabe des Dithionit-Eluats gestört).

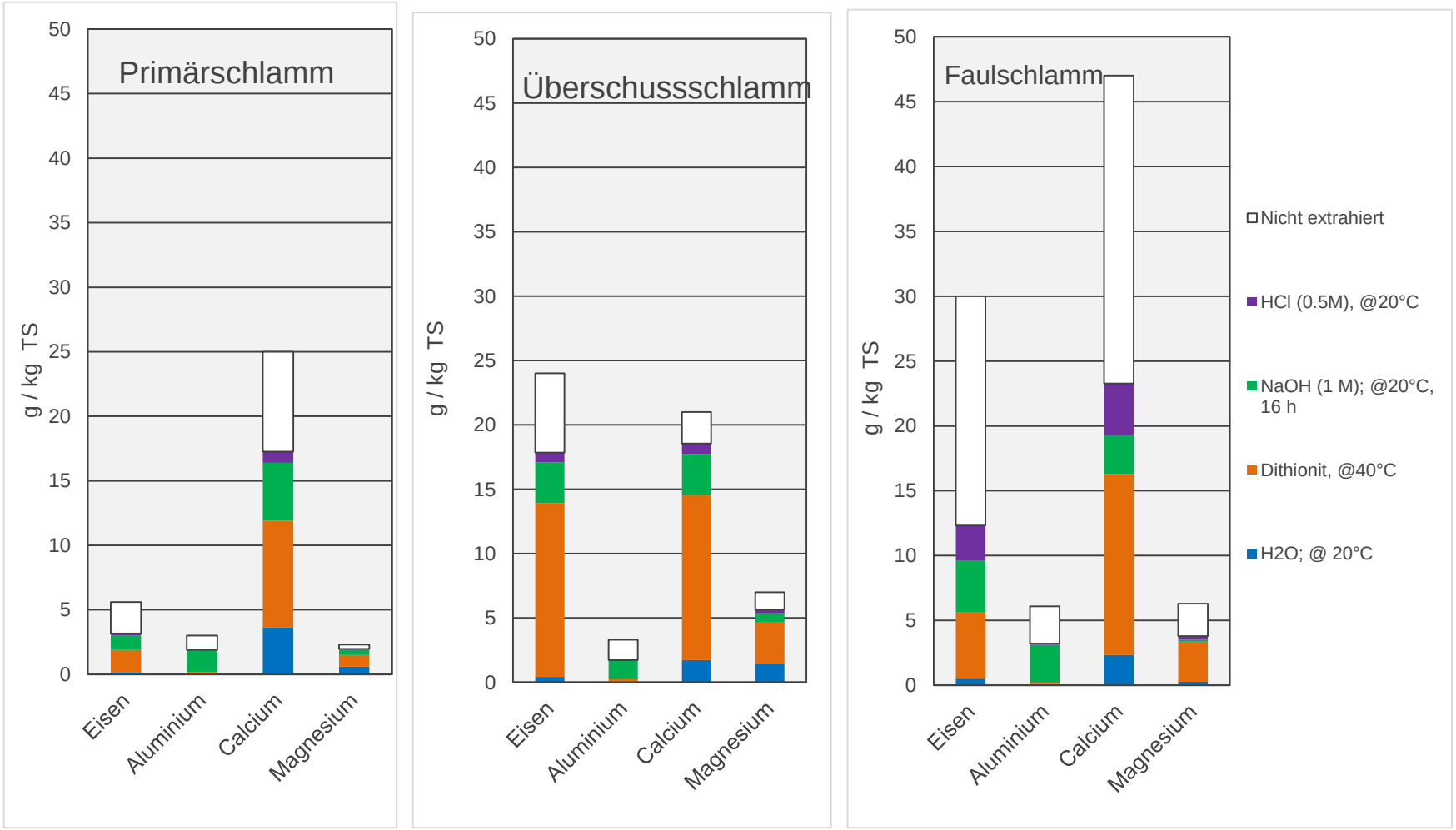


Abbildung 2: Konzentrationen der bei den Fraktionierungsversuchen freigesetzten Elemente Eisen, Aluminium, Calcium und Magnesium.

4 FAZIT

Ein wichtiges Ziel der P-Fraktionierungsversuche war die Bestimmung des organischen und anorganischen Anteils des Phosphors in den Klärschlammproben. Dabei überraschte, dass in allen drei Klärschlammproben der anorganische Phosphoranteil überwiegte. Er betrug zwischen 60% im Primär- und Überschussschlamm und um die 77% im Faulschlamm. Diese Werte entsprechen ca. 40 kg P/ d im Primärschlamm, 150 kg P/d im Überschussschlamm und ca. 220 kg P/d im Faulschlamm.

Der organisch gebundene Phosphoranteil lag jeweils bei 30% im Primär- und Überschussschlamm, wobei der Überschlussschlamm mit 72 kg P/d gegenüber 20 kg P/d im Primärschlamm am meisten Phosphor enthielt. Im Faulschlamm betrug der Anteil organisch gebundener Phosphor gerade noch ca. 10%. Dies entspricht einer Tagesfracht von 28 kg P/d. Der Grossteil dieses organischen Phosphors wurde als Rest-Phosphors im NaOH-Eluat erfasst.

Zuletzt blieb ein Anteil Phosphor übrig, der durch die Fraktionierung nicht extrahiert werden konnte. Dieser lag im Bereich von 6% im Überschussschlamm und erreichte 10% resp. 13% im Primär- und Faulschlamm. Dieser nicht extrahierbare Phosphor war somit im Faulschlamm mit 37 kg P/ d am höchsten. Im Überschussschlamm (14 kg P/ d) und Primärschlamm (6.5 kg P/d) lag der nicht extrahierbare Phosphor tiefer. Aus dem Vergleich mit den bei den Eluat-Schritten freigesetzten Elementen wird vermutet, dass der nicht extrahierbare Phosphor vorwiegend als Eisenphosphat und Apatit vorliegt.

Eine mögliche Erklärung für den überwiegend anorganischen Phosphor im Überschuss- und im Faulschlamm könnten die in doch hohen Konzentrationen vorliegenden Elemente Eisen, Calcium und Aluminium sein, welche Phosphat mineralisch einbinden und ihn der Biologie ein Stück weit entziehen.

ENVILAB AG Bearbeitung:
Suzanne Mettler

Anhang 1

Analysenberichte ENVILAB AG

envilab
ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT
ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
+41 (0)62 745 70 50, info@envilab.ch
www.envilab.ch
Akkreditiert ISO 17025

ANALYSENBERICHT NR. Z2962 - L03 / 21

Schlamm-Untersuchung (ARA Thunersee)

Auftraggeber, Ort:	HOLINGER AG, Bern
Projektnummer:	B8251.100
Probeentnahme durch:	ARA Thunersee, Adrian Baumann
Eingang der Probe(n):	27.04.2021 / 05.05.2021

Probennummer:	Probenbezeichnung Kunde:	Probenahme vom:
2246	Faulraum 1	26.04.2021
2397	VKB 1	04.05.2021
2398	ED 1	04.05.2021

Analysenresultate

Parameter	Probennummer			Best.-grenze	Einheit	Methode/ Verfahren
	2246	2397	2398			
Trockensubstanz	2.45	4.04	4.42	0.1	%	Gravimetrie
CSB_{gesamt}	27'000	45'000	53'000	5	mg O_2/L	Fotometrie
Gesamtgehalte						
Phosphor	43'000	11'000	38'000	1	mg P/kg TS	ICP-OES
Eisen	30'000	5'600	24'000	0.1	mg Fe/kg TS	ICP-OES
Aluminium	6'100	3'000	3'300	0.1	mg Al/kg TS	ICP-OES
Calcium	47'000	25'000	21'000	0.5	mg Ca/kg TS	ICP-OES
Magnesium	6'300	2'300	7'000	0.05	mg Mg/kg TS	ICP-OES
Schwefel	9'500	4'100	7'000	1	mg S/kg TS	ICP-OES

geprüft: Dr. Suzanne Mettler
Zofingen, 11. Mai 2021

SachbearbeiterIn: Christian Steiner

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die Prüfgegenstände. Ohne schriftliche Genehmigung der ENVILAB AG darf der Bericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden.
Detailinformationen zum Messverfahren sowie zu Messunsicherheiten und Prüfdaten sind auf Anfrage erhältlich.

envilab
ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT
ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
+41 (0)62 745 70 50, info@envilab.ch
www.envilab.ch
Akkreditiert ISO 17025

ANALYSENBERICHT NR. Z2962 - L04 / 21

Schlamm-Untersuchung (Faulschlamm, ARA Thunersee)

Auftraggeber, Ort:	HOLINGER AG, Bern
Projektnummer:	B8251.100
Probeentnahme durch:	ARA Thunersee, Adrian Baumann
Eingang der Probe(n):	27.04.2021

Probennummer:	Probenbezeichnung Kunde:	Probenahme vom:
2246	Faulraum 1	26.04.2021

Zentrifugatenummer:	Bezeichnung Labor:	Erstellt am:
2246-A1	Wasserextrakt-1	28.04.2021
2246-A2	Wasserextrakt-2	28.04.2021
2246-B1	Dithionitextrakt-1	28.04.2021
2246-B2	Dithionitextrakt-2	28.04.2021
2246-C1	Natronlaugenextrakt-1	29.04.2021
2246-C2	Natronlaugenextrakt-2	29.04.2021
2246-D1	Salzsäurenextrakt-1	30.04.2021
2246-D2	Salzsäurenextrakt-2	30.04.2021

Resultate siehe Folgeseite

envilab
ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT
ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
+41 (0)62 745 70 50, info@envilab.ch
www.envilab.ch
Akkreditiert ISO 17025

Parameter	P-Fraktionierung - Analytik										
Extraktionsschritt	H_2O; @ 20°C		$NaHCO_3$ (0.11 M) + Dithionit (0.11 M); @40°C, 30 Min.		NaOH (1 M); @20°C, 16 h		HCl (0.5 M); @20°C, 16 h		Best.-	Einheit	Methode/
Zentrifugatenummer	2246-A1	2246-A2	2246-B1	2246-B2	2246-C1	2246-C2	2246-D1	2246-D2	grenze		Verfahren
Analytik											
Phosphat	770	740	300	330	150	170	120	130	0.03	mg PO_4^{3-}/L	Fotometrie
Gesamtgehalte											
Phosphor	250	250	96	100	73	76	48	51	0.1	mg P/L	ICP-OES
Eisen	16	17	37	30	23	22	170	210	0.01	mg Fe/L	ICP-OES
Aluminium	3.3	3.4	1	0.5	17	16	7.6	7.3	0.01	mg Al/L	ICP-OES
Calcium	74	74	91	92	17	17	270	290	0.05	mg Ca/L	ICP-OES
Magnesium	8.5	8.4	18	23	0.80	0.80	19	22	0.005	mg Mg/L	ICP-OES
Schwefel	18	18	6900 *	6900 *	340	350	13	13	0.1	mg S/L	ICP-OES

* Schwefel-Hintergrundkonzentration, 7'050 mg S/L

Auswertung	Einheit			
Gesamteinwaage Schlamm	g	172	186	Gravimetrie
Einwaage Schlamm trocken	g TS	4.2	4.5	berechnet

Zentrifugat-Nummer		2246-A1	2246-A2	2246-A MV	2246-A StD	2246-B1	2246-B2	2246-B1 MV	2246-B2 StD	2246-C1	2246-C2	2246-C1 MV	2246-C2 StD	2246-D1	2246-D2	2246-D1 MV	2246-D2 StD	TOTAL	Gemessen
Verhältnis Einwaage zu Rückstand dee vorh		1.00	1.00			0.21	0.20			0.19	0.17			0.19	0.17				
Menge (Vol) Zentrifugat	ml=g	134.1	144.5			146.1	127.8			137.4	139.6			60.8	63.6				
Phosphat	mg P /g TS	8.0	7.7	7.8	0.22	15.9	15.4	15.6	0.37	8.5	10.0	9.2	1.1	0.56	0.59	0.58	0.021	33	-
Rest-Phosphor	mg P /g TS	-0.03	0.28	0.12	0.22	-0.3	-1.1	-0.7	0.56	4.17	3.69	3.9	0.33	0.13	0.12	0.12	0.005	3.5	-
Phosphor	mg P /g TS	7.9	7.9	7.9	0.001	15.6	14.3	14.9	0.93	12.6	13.7	13.1	0.73	0.69	0.71	0.70	0.02	37	43
Eisen	mg Fe /g TS	0.5	0.54	0.52	0.02	6.0	4.28	5.14	1.2	3.98	3.95	3.97	0.018	2.4	2.9	2.7	0.35	12	30
Aluminium	mg Al /g TS	0.10	0.11	0.11	0.002	0.16	0.07	0.12	0.064	2.94	2.87	2.91	0.047	0.11	0.10	0.11	0.005	3.2	6.1
Calcium	mg Ca /g TS	2.4	2.4	2.4	0.000	14.8	13.1	14.0	1.2	2.94	3.05	3.00	0.080	3.9	4.1	4.0	0.12	23	47
Magnesium	mg Mg /g TS	0.27	0.27	0.27	0.002	2.92	3.28	3.10	0.25	0.14	0.14	0.14	0.004	0.27	0.31	0.29	0.024	3.8	6.3
Schwefel	mg S /g TS	0.57	0.57	0.57	0.000	nb	nb	-	-	59	63	61	2.9	0.19	0.18	0.18	0.004	62	9.5

MV = Mittelwert der Dupplikate
StD = Standardabweichung der Dupplikate

geprüft: Dr. Suzanne Mettler
Zofingen, 21. Juni 2021

SachbearbeiterIn: Magali Christ

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die Prüfgegenstände. Ohne schriftliche Genehmigung der ENVILAB AG darf der Bericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden.
Detailinformationen zum Messverfahren sowie zu Messunsicherheiten und Prüfdaten sind auf Anfrage erhältlich.

envilab
ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT
ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
+41 (0)62 745 70 50, info@envilab.ch
www.envilab.ch
Akkreditiert ISO 17025

ANALYSENBERICHT NR. Z2962 - L05 / 21

Schlamm-Untersuchung (Faulschlamm, ARA Thunersee)

Auftraggeber, Ort:	HOLINGER AG, Bern
Projektnummer:	B8251.100
Probeentnahme durch:	ARA Thunersee, Adrian Baumann
Eingang der Probe(n):	05.05.2021

Probennummer:	Probenbezeichnung Kunde:	Probenahme vom:
2397	VKB 1	04.05.2021

Zentrifugatenummer:	Bezeichnung Labor:	Erstellt am:
2397-A1	Wasserextrakt-1	05.05.2021
2397-A2	Wasserextrakt-2	05.05.2021
2397-B1	Dithionitextrakt-1	05.05.2021
2397-B2	Dithionitextrakt-2	05.05.2021
2397-C1	Natronlaugenextrakt-1	06.05.2021
2397-C2	Natronlaugenextrakt-2	06.05.2021
2397-D1	Salzsäurenextrakt-1	07.05.2021
2397-D2	Salzsäurenextrakt-2	07.05.2021

Analysenresultate siehe Folgeseite

envilab
ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT
ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
+41 (0)62 745 70 50, info@envilab.ch
www.envilab.ch
Akkreditiert ISO 17025

Parameter	P-Fraktionierung - Analytik										
Extraktionsschritt	H_2O; @ 20°C		$NaHCO_3$ (0.11 M) + Dithionit (0.11 M); @40°C, 30 Min.		NaOH (1 M); @20°C, 16 h		HCl (0.5 M); @20°C, 16 h		Best.-	Einheit	Methode/
Zentrifugatenummer	2397-A1	2397-A2	2397-B1	2397-B2	2397-C1	2397-C2	2397-D1	2397-D2	grenze		Verfahren
Analytik											
Phosphat	244	255	104	109	24	24	7.7	9.0	0.03	mg PO_4^{3-}/L	Fotometrie
Gesamtgehalte											
Phosphor	92	97	45	45	18	18	3.7	4.1	0.1	mg P/L	ICP-OES
Eisen	6.6	7.2	18	18	5.9	5.4	6.7	7.2	0.01	mg Fe/L	ICP-OES
Aluminium	1.3	1.4	1.5	1.5	8.8	8.1	1.5	1.3	0.01	mg Al/L	ICP-OES
Calcium	180	190	85	85	23	22	39	43	0.05	mg Ca/L	ICP-OES
Magnesium	29	31	9.4	9.4	2.1	1.9	2.9	2.9	0.005	mg Mg/L	ICP-OES
Schwefel	14	15	7400 *	7400 *	360	330	14	13	0.1	mg S/L	ICP-OES

* Schwefel-Hintergrundkonzentration, 7'050 mg S/L

Auswertung	Einheit			
Gesamteinwaage Schlamm	g	180	194	Gravimetrie
Einwaage Schlamm trocken	g TS	7.3	7.8	berechnet

Zentrifugat-Nummer		2397-A1	2397-A2	2246-A MV	2246-A StD	2397-B1	2397-B2	2397-B1 MV	2397-B2 StD	2397-C1	2397-C2	2397-C1 MV	2397-C2 StD	2397-D1	2397-D2	2397-D1 MV	2397-D2 StD	TOTAL	Gemessen	Recovery %
Verhältnis Einwaage zu Rückstand dee vorh		1.00	1.00			0.22	0.20			0.11	0.10			0.09	0.08					
Menge (Vol) Zentrifugat	ml=g	141.5	153.3			153.5	153.0			161.2	164.1			157.8	155.2					
Phosphat	mg P /g TS	1.6	1.6	1.6	0.05	3.3	3.5	3.4	0.16	1.5	1.6	1.6	0.04	0.05	0.06	0.06	0.003	7	-	-
Rest-Phosphor	mg P /g TS	0.24	0.27	0.26	0.02	1.1	0.9	1.0	0.10	2.01	2.04	2.0	0.03	0.03	0.02	0.02	0.002	3.3	-	-
Phosphor	mg P /g TS	1.8	1.9	1.8	0.074	4.3	4.4	4.4	0.06	3.5	3.6	3.6	0.06	0.08	0.08	0.08	0.00	10	11	90.1%
Eisen	mg Fe /g TS	0.1	0.14	0.13	0.01	1.7	1.77	1.76	0.0	1.16	1.09	1.13	0.051	0.1	0.1	0.1	0.00	3	5.6	56%
Aluminium	mg Al /g TS	0.03	0.03	0.03	0.001	0.14	0.15	0.15	0.002	1.73	1.64	1.69	0.070	0.03	0.03	0.03	0.005	1.9	3.0	63%
Calcium	mg Ca /g TS	3.5	3.7	3.6	0.147	8.2	8.4	8.3	0.1	4.53	4.44	4.49	0.064	0.8	0.9	0.9	0.00	17	25	69%
Magnesium	mg Mg /g TS	0.57	0.61	0.59	0.029	0.91	0.93	0.92	0.01	0.41	0.38	0.40	0.021	0.06	0.06	0.06	0.004	2.0	2.3	85%
Schwefel	mg S /g TS	0.27	0.29	0.28	0.015	nb	nb	-	-	71	67	69	3.1	0.30	0.26	0.28	0.033	69	4.1	1692%

MV = Mittelwert der Dupplikate
StD = Standardabweichung der Dupplikate

geprüft: Dr. Suzanne Mettler

Sachbearbeiterin: Magali Christ

Zofingen, 21. Juni 2021

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die Prüfgegenstände. Ohne schriftliche Genehmigung der ENVILAB AG darf der Bericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden.
Detailinformationen zum Messverfahren sowie zu Messunsicherheiten und Prüfdaten sind auf Anfrage erhältlich.

envilab
ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT
ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
+41 (0)62 745 70 50, info@envilab.ch
www.envilab.ch
Akkreditiert ISO 17025

ANALYSENBERICHT NR. Z2962 - L06 / 21

Schlamm-Untersuchung (Faulschlamm, ARA Thunersee)

Auftraggeber, Ort:	HOLINGER AG, Bern
Projektnummer:	B8251.100
Probeentnahme durch:	ARA Thunersee, Adrian Baumann
Eingang der Probe(n):	05.05.2021

Probennummer:	Probenbezeichnung Kunde:	Probenahme vom:
2398	ED 1	04.05.2021

Zentrifugatenummer:	Bezeichnung Labor:	Erstellt am:
2398-A1	Wasserextrakt-1	05.05.2021
2398-A2	Wasserextrakt-2	05.05.2021
2398-B1	Dithionitextrakt-1	05.05.2021
2398-B2	Dithionitextrakt-2	05.05.2021
2398-C1	Natronlaugenextrakt-1	06.05.2021
2398-C2	Natronlaugenextrakt-2	06.05.2021
2398-D1	Salzsäurenextrakt-1	07.05.2021
2398-D2	Salzsäurenextrakt-2	07.05.2021

Analysenresultate siehe Folgeseite

envilab
ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT
ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
+41 (0)62 745 70 50, info@envilab.ch
www.envilab.ch
Akkreditiert ISO 17025

Parameter	P-Fraktionierung - Analytik										
Extraktionsschritt	H_2O; @ 20°C		$NaHCO_3$ (0.11 M) + Dithionit (0.11 M); @40°C, 30 Min.		NaOH (1 M); @20°C, 16 h		HCl (0.5 M); @20°C, 16 h		Best.-	Einheit	Methode/
Zentrifugatenummer	2398-A1	2398-A2	2398-B1	2398-B2	2398-C1	2398-C2	2398-D1	2398-D2	grenze		Verfahren
Analytik											
Phosphat	875	906	243	244	126	128	38.1	37.4	0.03	mg PO_4^{3-}/L	Fotometrie
Gesamtgehalte											
Phosphor	330	330	92	97	94	91	19	19	0.1	mg P/L	ICP-OES
Eisen	30	29	82	84	19	19	78	81	0.01	mg Fe/L	ICP-OES
Aluminium	0.85	0.84	1.4	1.4	8.9	8.2	6.2	6.6	0.01	mg Al/L	ICP-OES
Calcium	120	120	80	78	18	20	88	86	0.05	mg Ca/L	ICP-OES
Magnesium	100	100	20	20	4.0	4.0	31	31	0.005	mg Mg/L	ICP-OES
Schwefel	16	15	7600 *	7200 *	330	310	13	13	0.1	mg S/L	ICP-OES

* Schwefel-Hintergrundkonzentration, 7'050 mg S/L

Auswertung	Einheit			
Gesamteinwaage Schlamm	g	156	177	Gravimetrie
Einwaage Schlamm trocken	g TS	6.9	7.8	berechnet

Zentrifugat-Nummer		2398-A1	2398-A2	2246-A MV	2246-A StD	2398-B1	2398-B2	2398-B1 MV	2398-B2 StD	2398-C1	2398-C2	2398-C1 MV	2398-C2 StD	2398-D1	2398-D2	2398-D1 MV	2398-D2 StD	TOTAL	Gemessen	Recovery %
Verhältnis Einwaage zu Rückstand dee vorh		1.00	1.00			0.14	0.13			0.13	0.12			0.13	0.12					
Menge (Vol) Zentrifugat	ml=g	98.3	112.4			156.5	159.8			149.3	150.1			67.7	69.2					
Phosphat	mg P /g TS	4.1	4.2	4.2	0.12	12.9	12.9	12.9	0.04	6.9	7.0	6.9	0.1	0.12	0.11	0.11	0.010	24	-	-
Rest-Phosphor	mg P /g TS	0.64	0.50	0.57	0.10	2.1	2.8	2.5	0.52	8.86	8.20	8.5	0.46	0.06	0.06	0.06	0.003	11.6	-	-
Phosphor	mg P /g TS	4.7	4.7	4.7	0.023	15.0	15.7	15.4	0.49	15.7	15.2	15.4	0.41	0.19	0.17	0.18	0.01	36	38	94%
Eisen	mg Fe /g TS	0.4	0.42	0.42	0.01	13.4	13.61	13.51	0.2	3.18	3.16	3.17	0.012	0.8	0.7	0.7	0.04	18	24	74%
Aluminium	mg Al /g TS	0.01	0.01	0.01	0.000	0.23	0.23	0.23	0.001	1.49	1.37	1.43	0.088	0.06	0.06	0.06	0.002	1.7	3.3	52%
Calcium	mg Ca /g TS	1.7	1.7	1.7	0.009	13.1	12.6	12.9	0.3	3.01	3.33	3.17	0.225	0.9	0.8	0.8	0.07	19	21	88%
Magnesium	mg Mg /g TS	1.43	1.44	1.43	0.007	3.27	3.24	3.25	0.02	0.67	0.67	0.67	0.002	0.30	0.27	0.29	0.021	5.6	7.0	81%
Schwefel	mg S /g TS	0.23	0.22	0.22	0.009	nb	nb	-	-	55	52	53	2.6	0.13	0.11	0.12	0.009	54	7.0	768%

MV = Mittelwert der Dupplikate
StD = Standardabweichung der Dupplikate

geprüft: Dr. Suzanne Mettler

Sachbearbeiterln: Magali Christ

Zofingen, 21. Juni 2021

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die Prüfgegenstände. Ohne schriftliche Genehmigung der ENVILAB AG darf der Bericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden.
Detailinformationen zum Messverfahren sowie zu Messunsicherheiten und Prüfdaten sind auf Anfrage erhältlich.

ANHANG 3

AUSWERTUNG P-FRAKTIONIERUNG

ANHANG 3 - AUSWERTUNG P-FRAKTIONIERUNG

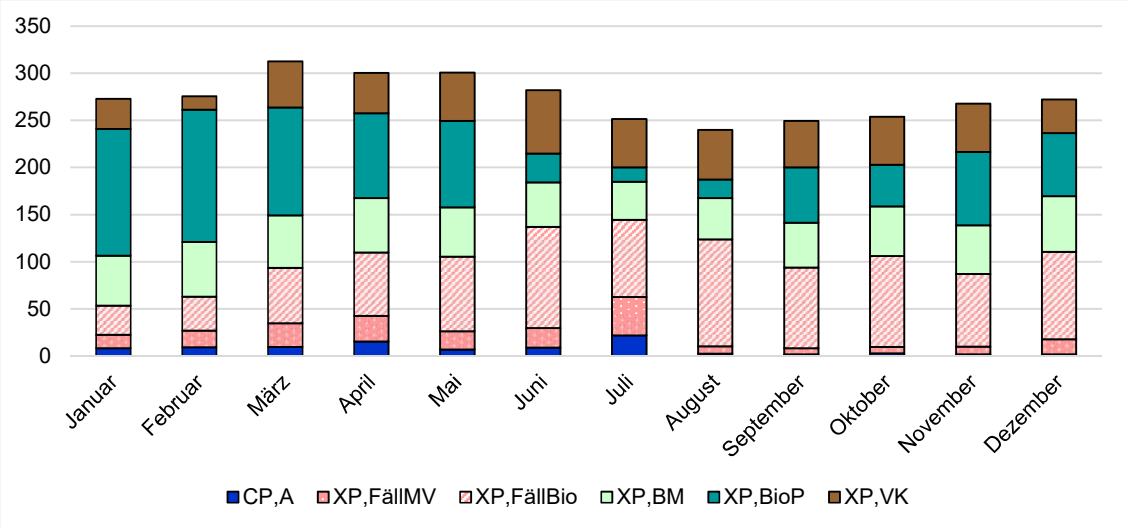
BERECHNUNGE GEMÄSS DWA-ATV (2011) - DATEN 2020

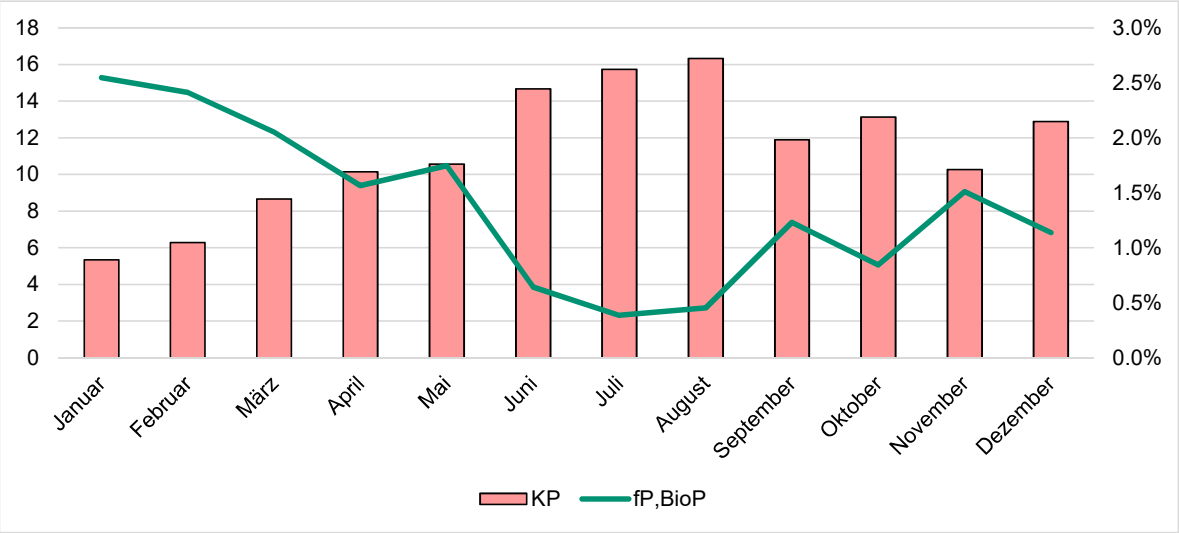
Daten ARA

	Zulauf ARA Pges	Zulauf Biologie		Ablauf NKB Pges	Ablauf ARA Pges	Fällmittel-dosierung	
	CSB		Pges				
	$C_{P,Z}$	$C_{CSB,ZB}$	$C_{P,ZB}$	$C_{P,AN}$	$C_{P,A}$	Q_{FM}	FM_d
	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	m³/M	mol/d
Januar	273	10'573	241	22	8	13	1'455
Februar	276	11'633	261	27	9	14	1'730
März	313	11'141	264	35	10	23	2'706
April	300	11'518	258	43	15	26	3'047
Mai	301	10'485	249	26	7	28	3'179
Juni	282	9'437	215	30	9	35	4'138
Juli	252	8'023	200	63	22	34	3'959
August	240	8'735	187	10	2	34	3'916
September	250	9'515	200	8	2	25	2'969
Oktober	254	10'521	203	10	3	29	3'333
November	268	10'317	217	10	2	23	2'748
Dezember	272	11'791	237	18	2	30	3'511
Mittelwert	273	10'307	228	25	8	26	3'057

Resultate (Annahme beta-Wert = 1)

	$X_{P,VK}$	$X_{P,BM}$	$X_{P,Fäll}$	$X_{P,FällMV}$	$X_{P,FällBio}$	$X_{P,BioP}$	K_P	$f_{P,BioP}$
Januar	32	53	45	14	31	135	5	2.5%
Februar	14	58	54	18	36	140	6	2.4%
März	49	56	84	25	59	114	9	2.1%
April	43	58	94	27	67	90	10	1.6%
Mai	51	52	99	20	79	92	11	1.7%
Juni	67	47	128	21	107	30	15	0.6%
Juli	51	40	123	41	82	15	16	0.4%
August	53	44	121	8	114	20	16	0.5%
September	50	48	92	7	86	59	12	1.2%
Oktober	51	53	103	7	96	44	13	0.8%
November	51	52	85	8	77	78	10	1.5%
Dezember	36	59	109	16	93	67	13	1.1%
Mittelwert	46	52	95	18	77	74	11	1.4%





Verwendete Formeln gemäss ATV-DWA (2011)

$$X_{P,VK} = C_{P,Z} - C_{P,ZB}$$

$$X_{P,BM} = 0.005 \times C_{CSB,ZB}$$

$$X_{P,Fäll} = \frac{FM_d \times 31}{\beta_{Fäll}}$$

$$FM_d = Q_{FM} \times \rho_{FM} \times C_{FM}$$

$$X_{P,FällMV} = C_{P,AN} - C_{P,A}$$

$$X_{P,FällBio} = X_{P,Fäll} - X_{P,FällMV}$$

$$X_{P,Bio-P} = C_{P,ZB} - X_{P,BM} - X_{P,FällBio} - C_{P,AN}$$

$$K_P = \frac{FM_d}{C_{P,Z}}$$

$$f_{P,Bio-P} = \frac{X_{P,Bio-P}}{0.5 \times C_{CSB,ZB}}$$

$$\beta_{Fäll} = 1$$

$$\rho_{FM} = 1.43\ kg/l$$

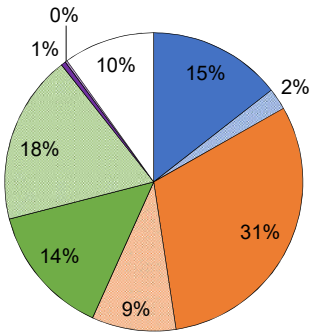
$$C_{FM} = 2.5\ mol/kg$$

ANHANG 3 - AUSWERTUNG P-FRAKTIONIERUNG

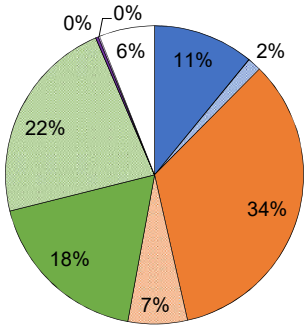
AUSWERUNG ELUATTESTS MAI 2021

Anteile Phosphorfraktionen Eluattests	Primär-schlamm	Überschuss-schlamm	Frisch-schlamm	Faul-schlamm
P-Fraktionen in kg P/d *(Berücksichtigtung der Feststofffracht Bilanz 2020)*				
1. Phosphat gelöst + adsorbiert	3%	9%	12%	17%
2. Polyphosphate gelöste, + Bruchstücke	1%	1%	2%	0%
3. Phosphat chemisch an Fe gebunden + an $Fe(OH)_3$ adsorbiert	7%	27%	33%	34%
4. Zellphosphat	2%	5%	7%	0%
5. Phosphat an $Al(OH)_3$ adsorbiert + durch OH- lösbar oder austauschbar	3%	14%	17%	20%
6. Hauptteil des org. P, Polyphosphate in BioP	4%	18%	22%	9%
7. Ca^{-} + Mg^{-} + ev. Al^{-} Phosphate	0%	0%	0%	1%
8. übriger org P	0%	0%	0%	0%
9. "nicht extrahierter P"	2%	5%	7%	12%

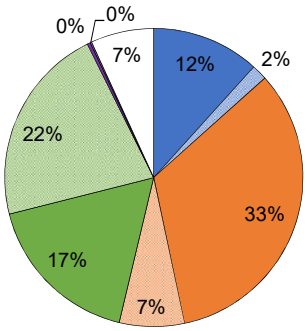
Primärschlamm



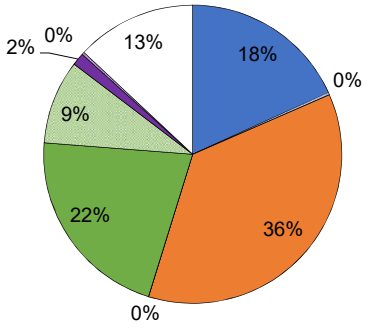
Überschussschlamm



Frischschlamm



Faulschlamm



1. Phosphat gelöst + adsorbiert
2. Polyphosphate gelöste, + Bruchstücke
3. Phosphat chemisch an Fe gebunden + an Fe(OH)3 adsorbiert
4. Zellphosphat
5. Phosphat an Al(OH)3 adsorbiert + durch OH- lösbar oder austauschbar
6. Hauptteil des org. P, Polyphosphate in BioP
7. Ca- + Mg- + ev. Al- Phosphate
8. übriger org P
9. "nicht extrahierter P"

ANHANG 3 - AUSWERTUNG P-FRAKTIONIERUNG

PLAUSIBILISIERUNG PROBEN ELUATTESTS MAI 2021

Zur Überprüfung der Verlässlichkeit der Resultate wurde eine Plausibilisierung der Eluattests anhand der Phosphor- und Eisenfrachten durchgeführt.

Daten Bilanz 2020	Primär-schlamm	Überschuss-schlamm	Faul-schlamm
Menge m3/d	135	133	268
Feststofffracht kg TR/d	5'986	6'218	6'580
P-Fracht kg/d	62	196	258
Fe-Fracht kg/d	40	128	202

Analyseresultate	Primär-schlamm	Überschuss-schlamm	Faul-schlamm
Konzentrationen *(Analyseresultate Envilab)*			
Trockensubstanz %	4.04	4.42	2.45
Phosphor mg P/kg TR	11'000	38'000	43'000
Eisen mg Fe/kg TR	5'600	24'000	30'000
Kontrollen			
Abweichung Trockensubstanz zu Bilanz 2020	-9%	-5%	0%
Abweichung Phosphor zu Bilanz 2020	6%	21%	10%
Abweichung Eisen zu Bilanz 2020	-16%	17%	-2%

Phosphor	Primär-schlamm	Überschuss-schlamm	Faul-schlamm
P-Fraktionen in mg P/g TS *(Analyseresultate Envilab)*			
1. Phosphat gelöst + adsorbiert	1.6	4.2	7.8
2. Polyphosphate gelöste, + Bruchstücke	0.3	0.6	0.1
3. Phosphat chemisch an Fe gebunden + an $Fe(OH)_3$ adsorbiert	3.4	12.9	15.6
4. Zellphosphat	1.0	2.5	0.0
5. Phosphat an $Al(OH)_3$ adsorbiert + durch OH- lösbar oder austauschbar	1.6	6.9	9.2
6. Hauptteil des org. P, Polyphosphate in BioP	2.0	8.5	3.9
7. Ca^{-} + Mg^{-} + ev. Al^{-} Phosphate	0.1	0.1	0.6
8. übriger org P	0.0	0.1	0.1
9. "nicht extrahierter P"	1.1	2.3	5.6
P-Fraktionen in kg P/d *(Berücksichtigtung der Feststofffracht Bilanz 2020)*			
1. Phosphat gelöst + adsorbiert	9.5	25.8	51.5
2. Polyphosphate gelöste, + Bruchstücke	1.5	3.5	0.8
3. Phosphat chemisch an Fe gebunden + an $Fe(OH)_3$ adsorbiert	20	80	103
4. Zellphosphat	6.0	15.3	0.0
5. Phosphat an $Al(OH)_3$ adsorbiert + durch OH- lösbar oder austauschbar	9.4	43.0	60.6
6. Hauptteil des org. P, Polyphosphate in BioP	12.1	53.0	25.9
7. Ca^{-} + Mg^{-} + ev. Al^{-} Phosphate	0.3	0.7	3.8
8. übriger org P	0.1	0.4	0.8
9. "nicht extrahierter P"	7	14	37
Kontrolle			
Summe P-Fraktionen kg P/d	66	236	283
Kontrolle zu P-Fracht Bilanz 2020	106%	121%	110%
Wiederspruch Proben			7%

Eisen	Primär-schlamm	Überschuss-schlamm	Faul-schlamm
Fe-Fraktionen in mg Fe/g TS (Analyseresultate Envilab)			
Wasserextrakt-1	0.1	0.4	0.5
Dithionitextrakt-1	1.8	13.5	5.1
Natronlaugenextrakt-1	1.1	3.2	4.0
Salzsäurenextrakt-1	0.1	0.7	2.7
Rest	2.4	6.2	17.7
Fe-Fraktionen in kg Fe/d			
Wasserextrakt-1	0.8	2.6	3.4
Dithionitextrakt-1	11	84	34
Natronlaugenextrakt-1	7	20	26
Salzsäurenextrakt-1	0.9	4.6	17.7
Rest	15	38	116
Kontrolle			
Summe Fe-Fraktionen kg Fe/d	34	149	197
Kontrolle zu Fe-Fracht Bilanz 2020	84%	117%	98%
Wiederspruch Proben			-7%

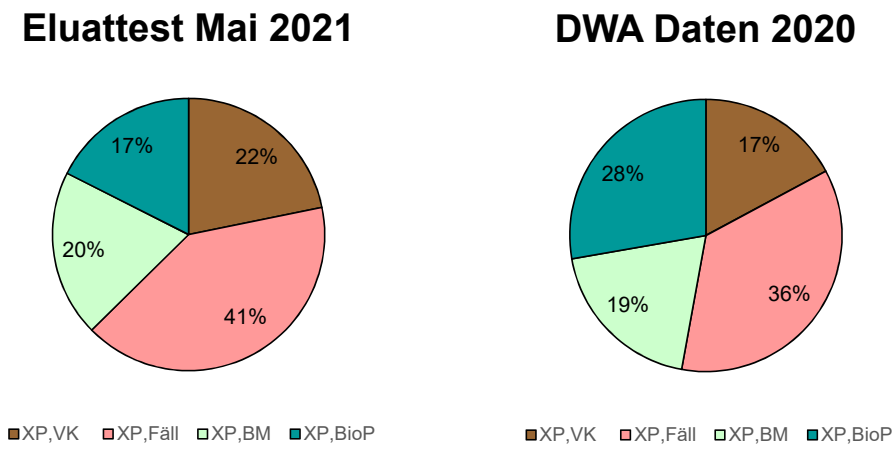
ANHANG 3 - AUSWERTUNG P-FRAKTIONIERUNG

VERGLEICH RESULTATE ELUATTEST MIT DWA BERECHNUNG

Für den Vergleich der beiden Methoden wurden die Fraktionen des Eluattests den Frischschlamm-Fraktionen gemäss DWA-ATV [2] zugeordnet. Für den Anteil des in der Vorklärung eliminierten Phosphors ($X_{P,VK}$) wurden alle Fraktionen des Primärschlamms berücksichtigt. Als Anteil Phosphor im Fällschlamm ($X_{P,Fäll}$) wurden die Fraktionen Nr. 3 und 5 im Überschussschlamm berücksichtigt. Gemäss Literatur [11] wurde als Anteil der biologische Phosphorelimination ($X_{P,BioP}$) die Fraktion Nr. 6 im Überschussschlamm berücksichtigt. Wie auch beim DWA-Ansatz, wurden die übrigen Fraktionen des Überschussschlammes dem an der Biomasse gebundenem Phosphor ($X_{P,BM}$) zugeordnet.

P-Fraktionen Eluattest in kg P/d	Primär-schlamm	Überschuss-schlamm
1. Phosphat gelöst + adsorbiert	10	26
2. Polyphosphate gelöste, + Bruchstücke	2	4
3. Phosphat chemisch an Fe gebunden + an $Fe(OH)_3$ adsorbiert	20	80
4. Zellphosphat	6	15
5. Phosphat an $Al(OH)_3$ adsorbiert + durch OH- lösbar oder austauschbar	9	43
6. Hauptteil des org. P, Polyphosphate in BioP	12	53
7. Ca^{-} + Mg^{-} + ev. Al^{-} Phosphate	0	1
8. übriger org. P	0	0
9. "nicht extrahierter P"	6.5	14.2
Summe	66	236

P-Fraktionen Frischschlamm nach DWA in kg P/d	Eluattest Mai 2021	DWA Daten 2020
$X_{P,VK}$	66	46
$X_{P,Fäll}$	123	95
$X_{P,BM}$	60	52
$X_{P,BioP}$	53	74
Summe	302	266

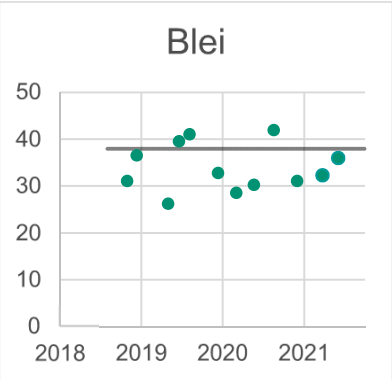


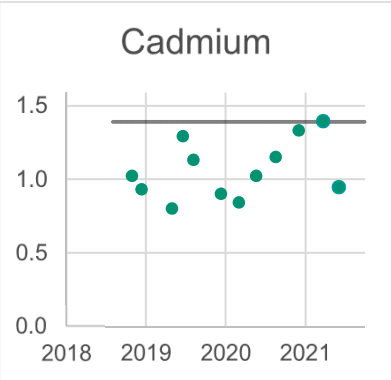
ANHANG 4

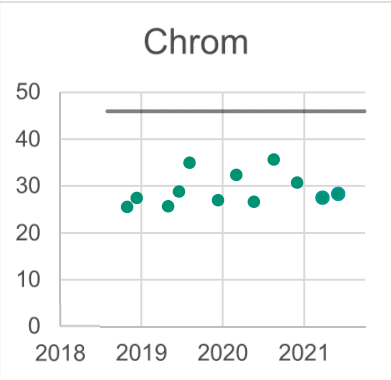
AUSWERTUNG SCHLAMMANALYSEN

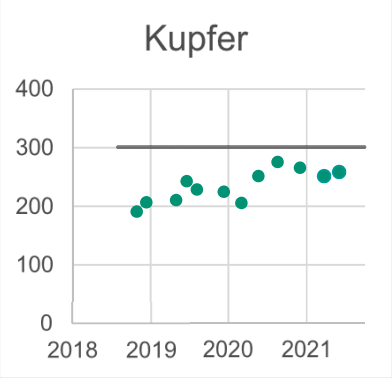
ANHANG 4 - AUSWERTUNG SCHADSTOFFUNTERSUCHUNGEN

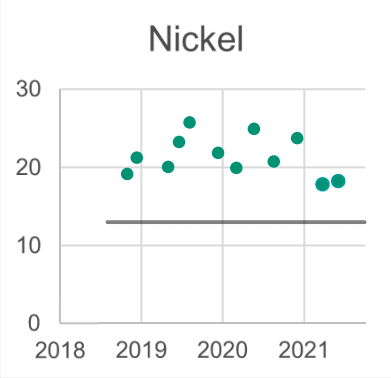
SCHWERMETALLKONZENTRATIONEN IM VERGLEICH ZU LITERATURWERTE [mg/kg TR]

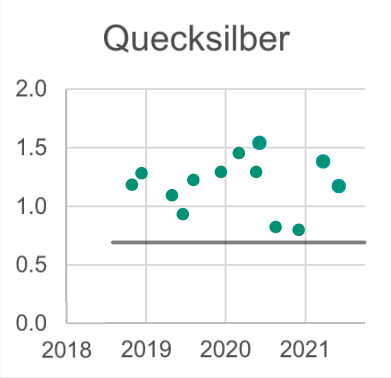












mg/kg TR	Median Literatur Schweiz	Median Faulschlamm ARA
Arsen [1]	3	**6** *
Blei [1]	38	33
Cadmium [1]	1.4	1.0
Chrom [1]	46	28
Kupfer [1]	301	235
Nickel [1]	13	**21**
Quecksilber [2]	0.7	**1.2**
Zink [1]	1'000	738
PAK [3]	6.7	0.64 **
PCB [3]	0.094	0.023 **
PCDD/F [4]	0.00001	0.00001 ***

1 EAWAG, 2018, Spurenelemente in Schweizer Abwasser

2 EAWAG, 2021, Quecksilber im Schweizer Abwasser

3 Kupper, 2008, Organische Schadstoffe im Klärschlamm

4 Zennegg, 2013, Persistent organic pollutants

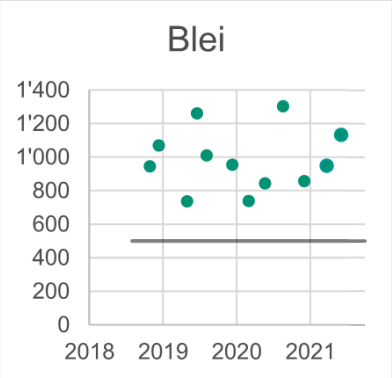
* Einzelanalyse März 2021

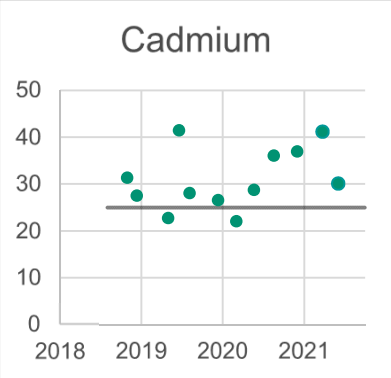
** Einzelanalysen März/Juni 2021

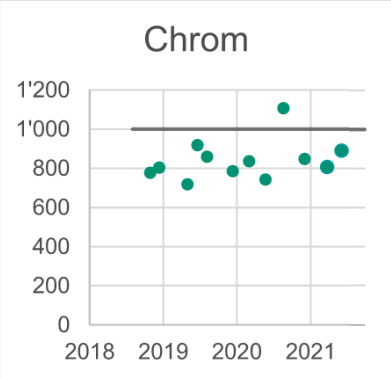
*** Einzelanalyse Juni 2021

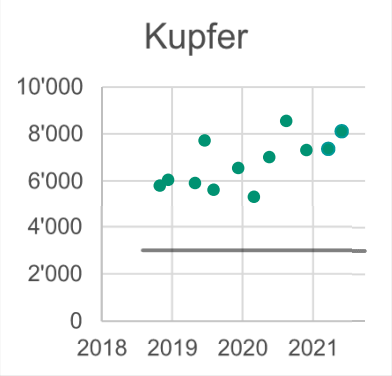
ANHANG 4 - AUSWERTUNG SCHADSTOFFUNTERSUCHUNGEN

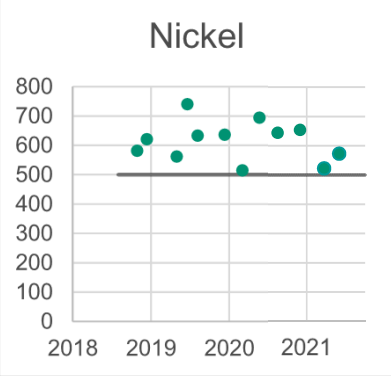
VERGLEICH MIT DEN ANFORDERUNGEN MINREC [mg/kg P]

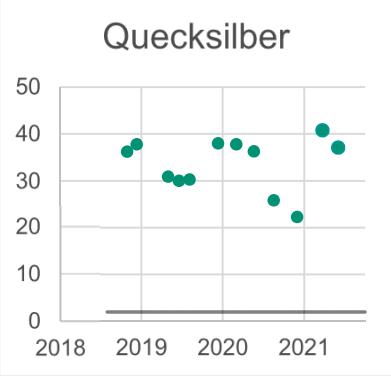












mg/kg P	Grenzwert MinRec [1] Schweiz	Median Faulschlamm ARA
Arsen	100	**175** *
Blei	500	**950**
Cadmium	25	**29**
Chrom	1'000	821
Kupfer	3'000	**6'761**
Nickel	500	**626**
Quecksilber	2	**36**
Zink	10'000	**22'110**
PAK	25	19 **
PCB	0.25	**0.66** **
PCDD/F	0.00012	**0.00027** ***

[1] ChemRRV, Anhang 2.6 stand 01.03.2021

* Einzelanalyse März 2021

** Einzelanalysen März/Juni 2021

*** Einzelanalyse Juni 2021

ANHANG 5

LONGLIST

ANHANG 5 - LONGLIST

	Verfahren									Technologie			Rezyklat				Zusätzliche Infos				
1	2	3	4a	4b	4c	4d	4e	5	6	7	8	9	10a	10b	11	12	13	14	15	16	17
Bezeichnung	Verfahrensansatz	Bemerkungen	Voraus-setzung 1	Voraus-setzung 2	Voraus-setzung 3	Voraus-setzung 4	Voraus-setzung 5	Ausgangss toff	Inputflexibilität	Umsetzungsgr ad	TRL	P-Rückgewi nnungsgra	P-Rezyklat 1	P-Rezyklat 2	P-Gehalt im Rezyklat	Produkterl ös [CHF/t	Literaturangabe	Link	Integration in best. Anlage	Aktualit ät	Anmerkungen
AirPrex®	Kristallisation	CO2-Strippung nach Faulung + Mg-Quelle	Bio-P	-	-	Faulung	-	FS	FS	Betrieb, DE + NL	>6	22%	Mg-P	Struvit	?	?	DPP-Studie, 2019 + Beck, 2020	Link	ja	ja	CNP-Cycles, auch als Berliner Verfahren bekannt
ANPHOS®	Kristallisation	Fällung im Wirbelschichtreaktor + Magnesiumquelle	Bio-P	-	-	-	-	Z	Zentrat aus FS	Betrieb, NL	>6	?	Mg-P	Struvit	?	?	DPP-Studie, 2019	Link	ja	ja	
Ash2®Phos	Extraktion	nasschemisch mit Salzsäure + Natriumhydroxid	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA, andere P-haltige Substrate	Pilot, SE	6	>95%	Ca-P	-	26%	700	EBP-Studie, 2019	Link	nein	ja	auch als CleanMAP bekannt
AshDec	Extraktion	thermochemisch, Pyrolyse im Drehrohrofen mit Additiv	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA, andere P-haltige Substrate	Pilot, DE + AT	6	>95%	P-haltiger Feststoff	-	8%	?	DPP-Studie, 2019	Link	nein	ja	auch als Outotec-Verfahren bekannt
ATZ Eisenbad-reaktor	Extraktion	thermochemisch im ATZ-Eisenbadreaktor	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	Asche, Schlacken, Schlämme	Pilot, DE	6	?	P-haltige Schlacke	-	?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	nein	ja	Rückgewinnung von P und anderen Metallen
CalPrex®	Aufschluss + Kristallisation	Biologische Vorvsäuerung + Ca-Quelle	Bio-P	-	-	-	-	FrS	Frischschlamm	Pilot, DE	>6	>50%	Ca-P	Brushit	?	?	DPP-Studie, 2019	Link	ja	ja	CNP-Cycles
Cambi	Sonderverfahren	Thermische Hydrolyse	-	-	-	-	-	FrS	und andere Substrate	Betrieb, NO	>6	?	Biogas	-	?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	nein	nein	Bei diesem Verfahren geht es in erster Linie um die Biogasproduktion und Schlammsterilisation.
EcoPhos	Extraktion	nasschemisch mit Phosphorsäure	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA, andere P-haltige Substrate	Pilot, BG	6	>95%	Mg-P	Struvit	17%	400	EBP-Studie, 2019	Link	nein	ja	
ELOVAC®-P	Kristallisation	CO2-Strippung nach Faulung + Magnesiumchlorid	-	-	-	Faulung	-	FS	FS, P > 50mg/L	Betrieb, DE	>6	35-40%	Mg-P	Struvit	?	?	DPP-Studie, 2019 + Beck, 2020	Link	ja	ja	
ePhos®	Sonderverfahren	Elektrolyse mit Mg-Opferanode	Bio-P	-	-	-	-	Z	Zentrat und andere NH4- oder P-haltige Abwässer	Pilot, DE	>6	>80%	Mg-P	Struvit	?	?	VDI-Papier, 2017	Link	ja	ja	entwickelt am Frauenhofer IGB, Stuttgart
EuPhoRe	Karbonisierung	Pyrolyse im Drehrohrofen	-	-	KS-Entwässerung	-	-	FrS/FS	FrS 15-40% TS, andere P-haltige Substrate	Pilot + Betrieb, DE + CH	>6	>95%	P-haltige Asche	-	5-9%	5 - 20	EBP-Studie, 2019	Link	ja	ja	Anwendung auf erzo (Oftringen) angewendet
ExtraPhos®	Aufschluss + Kristallisation	Kohlenstoffdioxid verdichtet	Bio-P	-	-	Faulung	-	FS	nur FS <5% TS, ggf. Gülle od. Gärreste	Pilot, DE	6	45%	Ca-P	-	10%	50 - 100	EBP-Studie, 2019	Link	ja	ja	auch als Buddenheimer Verfahren bekannt
Fix-Phos	Kristallisation	Calcium-Silikat-Hydrat + Anaerobreaktor	Bio-P	-	-	-	-	FrS/FS	FrS/FA	Pilot, DE	>6	30%	P-haltiger Feststoff	P-Ca-Si-Hydrat	?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	ja	ja	Grosstechnische Versuche auf der KA Eberstadt + Hildesheim
HCT Rheinmühle	Karbonisierung	Säureaufschluss + Pyrolyse	-	-	KS-Entwässerung	-	-	FrS/FS	FrS, Gülle, andere P-haltige Substrate	Pilot, CH	6	30%	HTC-Kohle +P-haltiges Prozesswasser	-	?	?	Aqua&Gas 2021-03	Link	ja	ja	Anwendung in Chur
Kemira KREPRO®	Karbonisierung	-	-	-	-	-	-	FrS/FS	-	-	-	-	-	-	-	-	LfULG-Studie, 2017	Link	ja	nein	Keine Info mehr zu diesem Verfahren auf der Firmenseite, neues Verfahren in Produktpalette (ViviMag)
KRN-MePhRec	Sonderverfahren	thermochemisch, Klärschlammschmelz-konversion	-	Fe-Fällung	-	-	KS-Brikettierung	FrS	FrS 90% TS	Pilot, DE	6	75%	P-haltiger Schlacke + P-haltiger Staub		Schlacke, gering + Staub, hoch	?	DPP-Studie, 2019	Link	nein	ja	Entwickelt von ingitec GmbH Leipzig
KS-Reformer	Karbonisierung	Pyrolyse + Vebrennung + Vergasung	-	-	KS-Trocknung	-	-	FrS/FS	KS	Pilot, DE	6	?	P-haltiger Feststoff	-	?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	ja	ja	Vertrieb durch von Fa. THERMO-SYSTEM
LEACHPHOS	Extraktion	nasschemisch mit Schwefelsäure	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA	Pilot, CH	6	?	P-haltiger Feststoff		?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	nein	ja	Pilotversuch auf der KVA Bern
LysoPhos	Aufschluss + Kristallisation	Thermochemische Vorversäuerung + NaOH + MgCl2	Bio-P	-	KS-Entwässerung	Faulung	Faulung	FrS	FrS + Z	Labor, DE	<6	30-50%	Mg-P	Struvit	13%	?	CNP Cycles, 2021	Link	ja	ja	Neu im Portfolia von CNP, als Ersatz für CalPrex und AirPrex
MSE-Phosphor	Aufschluss + Kristallisation	Verwendung des "Stuttgarter Verfahrens"	-	-	-	Faulung	Faulung	FrS	Zentrat aus FS	Pilot, DE	6	> 50%	P-haltiger Feststoff + Mg-P	Struvit	?	?	DPP-Studie, 2019	Link	nein	ja	Mobile Klärschlammentwässerung für kleine kommunale ARA und Industrieanlagen
NASKEO	Kristallisation	CO2-Strippung nach Faulung + Magnesiumquelle	-	-	-	-	-	Z	Zentrat aus FS	Pilot (?), FR	>6	?	Mg-P	Struvit	?	?	VDI-Studie, 2017	Link	ja	ja	Hersteller von Biogas-Anlagen mit zusätzlicher Verwertung des Gärrückstands durch Filterpresse
NuReSys	Kristallisation	CO2-Strippung nach Faulung + Magnesiumquelle	Bio-P	-	-	-	-	Z	Zentrat aus FrS oder FS	Betrieb, DE + BE	>6	26	Mg-P	Struvit	?	?	VDI-Studie, 2017	Link	ja	ja	
NutriTec®	Kristallisation	Auch für Urinbehandlung	-	-	-	-	-	Z	Zentrat	Pilot + Betrieb, NL	>6	?	Mg-P + Ammoniumsulfat	Struvit	?	?	Beck, 2020	Link	ja	nein	Der Link existiert nicht mehr. Andere aktuelle Information sind im netz nicht zu finden.
OSTARA PEARL®	Kristallisation	CO2-Strippung nach Faulung + Magnesiumchlorid + Wirbelschichttrockner	-	-	-	-	-	Z	Zentrat aus FrS oder FS	Betrieb, weltweit	>6	12-20%	Mg-P	Struvit (Crystal Green®)	?	?	DPP-Studie, 2019 + Beck, 2020	Link	ja	ja	OSTARA
PARFORCE	Extraktion	nasschemisch mit Salz- oder Salpetersäure	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA, Struvit, DCP, TCP + andere P-haltige Substrate	Pilot, DE	6	KSA 85-90% DCP/TCP > 95%	Phosphorsäure	-	15-20%	?	DPP-Studie, 2019	Link	nein	ja	Entwickelt an der TU Bergakademie Freiberg
PASCH	Extraktion	nasschemisch mit Salzsäure	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA	Labor + Pilot, DE	6	80%	Ca-P + Mg-P	-	?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	nein	?	
P-bac / PRiL	Extraktion	biologisch (mikrobielles Auslaugen)	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA, P-Gehalt mind. 10%	Pilot, DE	6	> 80%	Eisenaluminiumph osphat	-	15%	?	DPP-Studie, 2019	Link	nein	?	
PHORWater	Kristallisation	-	-	-	-	-	-	FrS/FS	-	Pilot, ES	-		Struvit	-	-	-	Beck, 2020	Link		nein	Spanisches Forschungsprojekt aus dem Jahr 2017 - nicht mehr aktuell

Phos4Life	Extraktion	nasschemisch mit Schwefelsäure	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA, andere P-haltige Substrate	Pilot, SP + Vorprojekt, CH	>6	>95%	Phosphorsäure + Fe/Al-chloridlösung	-	24%	600 - 700	EBP-Studie, 2019	Link	nein	ja	ZASE
PhosForce	Aufschluss + Kristallisation	Biologische Vorversäuerung + Ca/Mg-Chlorid	Bio-P	-	KS-Entwässerung	-	-	FrS	Zentrat aus FrS	Pilot, DE	6	60%	Ca-P + Mg-P	Brushit + Struvit	?	?	DPP-Studie, 2019	Link	ja	ja	Veolia
PHOSIEDI	Sonderverfahren	Ionenaustauscher + Elektrodialyse	Bio-P	-	-	-	-	Z	Zentrat aus FrS	Labor + Pilot, DE	<6	?	Phosphorsäure	-	?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	ja	nein	
PHOSPAQ	Kristallisation	Komplette Abwasserbehandlung inkl. Belüftung	-	-	-	-	-	AW	AW	Betrieb, NL	>6	70-95	Mg-P	Struvit	?	?	Beck, 2020	Link	nein	ja	
Phosphogreen	Kristallisation	CO2-Strippung + NaOH nach Faulung + Magnesiumchlorid	Bio-P	-	-	-	-	Z	FS Zentrat, mind. 70 mg P /L	Pilot, DK + FR	>6	90%	Mg-P	Struvit	?	?	Beck, 2020	Link	ja	ja	SUEZ
P-RoC	Kristallisation	Zugabe von Calcium-Silikat-Hydrat, Kristallisation und Sedimentation	Bio-P	-	-	-	-	Z	Gülle oder andere P-haltige Abwässer, TS<1%	Pilot, DE	6	max. 25%	P-haltiges Düngemittel	-	?	?	DPP-Studie, 2019	Link	ja	ja	Versuche auf der KA Neuburg a.d. Donau
PYREG	Karbonisierung	KS-Trocknung + Pyrolyse	-	-	KS-Entwässerung	-	-	FrS/FS	FrS mind. 85% TS, ander P-haltige Substrate	Pilot + Betrieb, DE + weltweit	>6	>90%	P-haltiger Feststoff	-	10-20%	?	DPP-Studie, 2019	Link	ja	ja	Herstellung von Pflanzenkohle
Pyrophos	Karbonisierung	Pyrolyse im Wirbelschichtofen	-	-	KS-Trocknung	-	-	FrS/FS	FrS 90-100% TS, andere P-haltige Substrate	Pilot, CH	6	>95%	P-haltiger Feststoff	-	7%	50 - 100	EBP-Studie, 2019	Link	ja	ja	AVA Altenrhein; Vorprojekt
REALphos	Extraktion	nasschemisch mit Schwefelsäure	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA	Pilot + Betrieb(?), CH	>6	?	Phosphorsäure	-	?	?	SwissPhosphor-Bericht, 2021	Link	nein	ja	Entwicklung und Anwendung in Luzern, REAL
RECYPHOS	Sonderverfahren	P-Rückgewinnung aus Kleinkläranlagen	-	-	-	-	-	AW	AW	Pilot, DE	>6	?	?	-	?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	nein	?	P-Rückgewinnung aus Kleinkläranlagen
REM NUT®	Sonderverfahren	Fällung mit MgCl + NaOH, bisher Teilstrombehandlung	-	-	-	-	-	AW, hohe P-Konzentration	AW	Labor + Pilot, IT	<6	?	Mg-P	Struvit	?	?	LfULG-Studie, 2017	Link	nein	nein	Ionenaustauscher
SERAPLANT	Extraktion	nasschemisch mit Phosphorsäure	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	DüMV-konforme KSA	Pilot, DE	6	98%	P-haltiger Feststoff	-	?	?	VDI-Papier, 2017	Link	nein	ja	Grosstechnische Umsetzung bei Weimar, IBN 2022
STRUVIA®	Kristallisation	NaOH + Mg-Quelle	-	-	-	-	-	Z	SW aus FS	Pilot, DK + GB	>6	?	Mg-P	Struvit	?	?	Beck, 2020	Link	ja	nein	STRUVIA ist mittlerweile im PhosForce-Prozess von Veolia integriert
Stuttgarter Verfahren plus	Aufschluss + Kristallisation	UF, Schwefelsäure+ Zitronensäure (pH 4.5), MgO + NaOH	Bio-P	Fe/Al-Fällung	-	Faulung		FrS	Zentrat aus FS	Pilot, DE	6	30-67%	Mg-P	Struvit	?	?	UBA-Studie, 2014	Link	ja	ja	Abwasserzweckverband Offenburg
TerraNova® Ultra	Karbonisierung	HTC + Säureaufschluss + Kristallisation	Bio-P	Al-Fällung	KS-Entwässerung			FrS/FS	KS, 20-30% TS	Pilot + Betrieb, DE + China	>6	60-80%	Ca-P / Mg-P	Biokohle	?	?	DPP-Studie, 2019	Link	ja	ja	in China Anlage für 40'000t KS in Betrieb
Tetraphos	Extraktion	nasschemisch mit Phosphorsäure	-	-	-	-	Monoverbrennung	KSA	KSA, andere P-haltige Substrate	Pilot + Betrieb, DE	>6	> 85%	Phosphorsäure + Fe/Al-chloridlösung	-	24%	600 - 700	EBP-Studie, 2019	Link	nein	ja	
ViviMag	Sonderverfahren	Magnetische Abtrennung des als Vivianit gebundenen Phosphors	Bio-P	Fe-Fällung	-	Faulung	-	FS	FS	Pilot, NL + FI	<6	?	Fe-P	Vivianit	?	?	Kemira Webseite	Link	ja	ja	Scale-Up durch Kemira
ZAB	Extraktion	nasschemisch, Schlachtabfälle notwendig	-	-	-	-	Mitverbrennung	KSA	KSA + Tiermehlasche, andere P-haltige Substrate	Pilot + Bauprojetk, CH	>6	>95%	P-haltige Asche	-	20%	400	EBP-Studie, 2019	Link	nein	ja	Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid (ZAB), Bauprojekt abgeschlossen, Aufnahme Produktion im Jahr 2022 geplant

Legende

Voraussetzung

Bio-P	Biologische Phosphorelimination
Fe-Fällung	Phosphor-Fällung mit Eisensalzen
Al-Fällung	Phosphor-Fällung mitAluminiumsalzen

Ausgangsstoff

AW	Abwasser
FrS	Frischschlamm
Z	Zentrat
FS	Faulschlamm
KSA	Klärschlammasche

Technologiereifegrad (TRG)

<6	TRG 5 - Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
6	Prototyp in Einsatzumgebung
>6	Prototyp im Einsatz (1–5 Jahre)

P-Rezyklat

Ca-P	Calciumphosphat
Mg-P	Magnesiumphosphat

ANHANG 6

BESCHRIEB VERFAHRENSTECHNISCHE GRUNDPROZESSE

ANHANG 6 – BESCHRIEB VERFAHRENSTECHNISCHE GRUNDPROZESSE

Viele der existierenden P-Recyclingverfahren basieren auf den gleichen verfahrenstechnischen Grundprozessen Extraktion, Karbonisierung, Kristallisation oder Säureaufschluss. Diese Grundprozesse werden in der Tabelle 1 kurz erläutert.

Tabelle 1: Überblick über die wichtigsten Verfahrensansätze

Verfahrensansatz	Kurzbeschrieb
Extraktion	Nasschemische, thermochemische oder biologische Extraktion des Phosphors aus der Klärschlammasche.
Karbonisierung	Ist das Verkohlen (Verbrennung unter Sauerstoffabschluss) von getrocknetem Klärschlamm zu einem P-haltigen Feststoff.
Kristallisation	Kristallisation von Phosphaten durch die Erhöhung des pH-Werts z.B. durch Entgasung (CO_2-Austrag) oder die Zugabe von Chemikalien (Hydroxide) und die Zugabe einer Calcium- oder Magnesium-Quelle.
Säureaufschluss	Überführung von zellulär gebundenem Phosphor in die Flüssigphase durch die Erhöhung des pH-Werts im Schlamm bspw. durch biologische Prozesse (Hydrolyse) oder die Zugabe von Chemikalien (organischen oder synthetischen Säuren).

ANHANG 7

INNOVATIVE VERFAHRENSANSÄTZE

ANHANG 7 – INNOVATIVE VERFAHRENSANSÄTZE

ePhos®

Das ePhos®-Verfahren ist ein elektrochemisches Verfahren, welches vom Fraunhofer IGB entwickelt wurde, um Phosphat in Form von Magnesium-Ammonium-Phosphat (Stuvit) ohne den Einsatz von Chemikalien zurückzugewinnen. In einer Elektrolysezelle werden Wassermoleküle gespalten (Kathode), wodurch der pH-Wert erhöht wird. Zeitgleich gehen durch die Auflösung der Opferanode Magnesium-Ionen in Lösung und reagieren mit dem im Abwasser enthaltenen Phosphor und Stickstoff zu Struvit (Abbildung 1).

Im Jahr 2017 wurde der Dauerbetrieb der Pilotanlage (3 m^3/h) erfolgreich während eines Jahres auf dem Betriebsgelände der ARA Stuttgart getestet. Während dieser Zeit konnte eine durchschnittliche Eliminationsrate von über 80 Prozent erreicht werden. Der mittlere Energiebedarf lag bei knapp 0.78 kWh/m^3 Abwasser. Das Verfahren kann in der Praxis vollautomatisiert betrieben werden. Die grosstechnische Umsetzung auf einer norddeutschen ARA mit 70'000 EW ist in Planung.

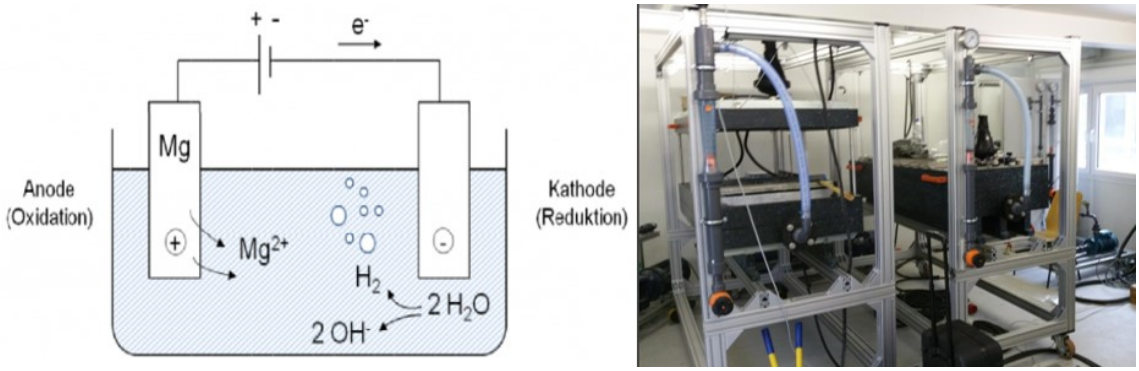


Abbildung 1: Schematische Darstellung der elektrochemischen Grundprozesse zur Phosphor-Rückgewinnung, Quelle: Fraunhofer IGB

ViviMag

Das ViviMag-Verfahren ist ein elektromagnetisches Verfahren zur Abtrennung von Vivianit (Fe-Phosphat) aus Faulschlamm. Das Verfahren eignet sich insbesondere für ARA mit einer chemischen Phosphorelimination. Durch die Fällung von Phosphor mit Eisensalzen entsteht das Mineral Vivianit, welches durch seine paramagnetischen Eigenschaften durch einen Magnet-Separator abgetrennt werden kann.

Das Verfahren, welches ursprünglich aus dem Bergbau kommt, wurde an der TU Delft weiterentwickelt und für den Einsatz auf kommunalen ARA angepasst. Nach erfolgreichen Versuchen im Labor- und Pilotmassstab in den vergangenen Jahren, ist die Markteinführung der Technologie für das Jahr 2021 geplant.

PHOSIEDI

Das PHOSIEDI-Verfahren ist ein elektro-chemisches Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem Filtrat der Faulschlammentwässerung. Phosphor wird durch den Einsatz eines phosphatselektiven Ionenaustauschers und der Elektrodialyse/Elektrodeionisation vom Schlammwasser getrennt. Das Verfahren wird bisher erst im Labormassstab umgesetzt und befindet sich in der Entwicklung. Vorteil dieses Verfahrens ist die Reinheit des Phosphors (keine Schwermetalle).

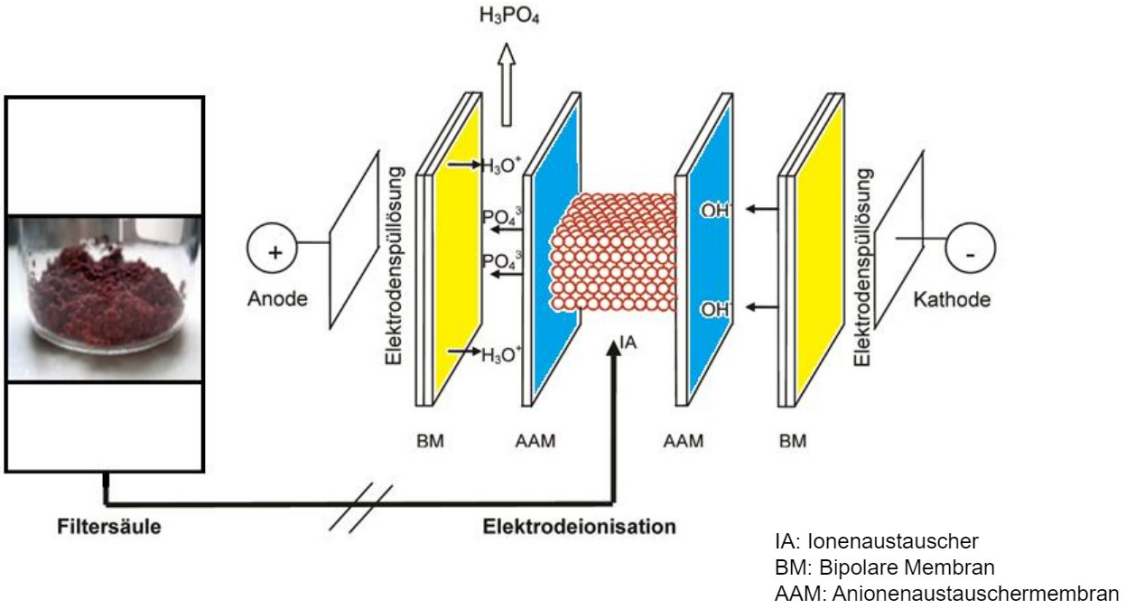


Abbildung 2: Schematische Darstellung der verfahrenstechnischen Grundprozesse zur Phosphor-Rückgewinnung mit dem PHOSIEDI-Verfahren, Quelle: Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

P-Bac / PRiL

Das P-Bac-Verfahren ist eine bio-chemisches Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche (Alternativverfahren). Es basiert auf dem sog, Bioleaching, der mikrobiellen Erzlaugung mittels einer definierten, in der Natur vorkommenden Mischung von Mikroorganismen. Im Laugungsprozess werden Phosphor und Schwermetalle in Lösung überführt. Das Phosphor wird anschliessend mikrobiologisch gebunden und separiert.

Das Verfahren wurde von der Firma Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & CO KG entwickelt und hat bereits den TRL 6 erreicht.

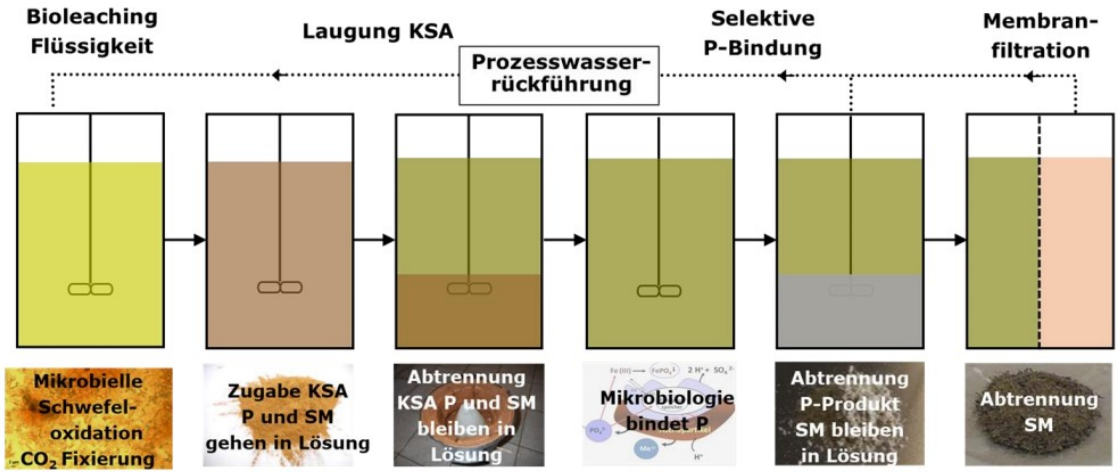


Abbildung 3: Schematische Darstellung der verfahrenstechnischen Grundprozesse zur Phosphor-Rückgewinnung mit dem P-Bac-Verfahren, Quelle: Fritzmeier Umwelttechnik (KIT)

ANHANG 8

SHORTLIST-VERFAHREN

ANHANG 8 – SHORTLIST-VERFAHREN

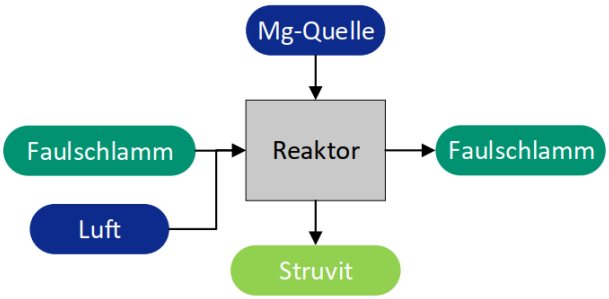
INHALTSVERZEICHNIS

AIRPREX®MACRO	2
CALPREX®	3
ELOVAC®-P	4
EXTRAPHOS®	5
FIX-PHOS	6
LYSOPHOS®	7
PHOSFORCE	8
EUPHORE®	9
PHOS4LIFE®	10

AirPrex®Macro

Verfahrensbeschrieb

Beim AirPrex®Macro-Verfahren wird der ausgefaulte Schlamm kontinuierlich in einen Reaktor geführt und einer Luftstrippung unterzogen. Durch das Ausgasen des Kohlenstoffdioxids erhöht sich der pH-Wert des Faulschlammes. Wird dem Reaktor zusätzlich Magnesiumchlorid zugeführt, kommt es zur Kristallisation und Fällung von Struvit. Die Ausbildung von Struvit-Makrokristallen wird gezielt gefördert, welche im Anschluss ausgeschleust und gewaschen werden.



Eigenschaften

Prinzip	• Kristallisation im Faulschlamm
Input	• Faulschlamm inkl. Fremdschlamm (Beschickung SEA), 310 kg P/d
Output	• Faulschlamm • P-Rezyklat Stuvit
Rückgewinnungsquote	• Rund 5% bezogen auf den Inputstrom
Platzbedarf	• 120 m^2
Energiebedarf	• 1.2 kWh/m^3
Chemikalienverbrauch	• $MgCl_2$ (30%ig) ca. 1.8 L/m^3 Faulschlamm mit β-Faktor = 1.8

Vorteile

- Verhinderung von Struvitausfällungen in den Rohrleitungen.
- Verbesserung der Schlammentwässerungseigenschaften und verminderter Polymerbedarf.
- Dezimierte P-Rückbelastung der ARA durch rückgeführtes Filtrat.
- Abtrennung und Reinigung des Struvit.

Nachteile

- Geringe Rückgewinnungsquoten.
- Abtrennung des Struvit nur teilweise möglich.

Aktueller Stand

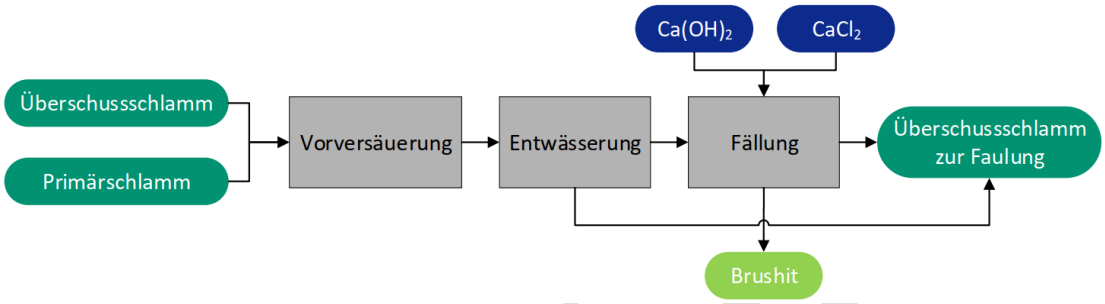
Entwicklungsstand	Anlagen in Betrieb, weltweit
Anbieter	CNP CYCLES, DE
Weiterentwicklungen	CalPrex® und LysoPhos®

ENTWURF

CalPrex®

Verfahrensbeschrieb

Beim CalPrex®-Verfahren wird der Frischschlamm einer mesophilen Vorversäuerung unterzogen. Das ermöglicht die Rücklösung des durch Bio-P gebundenen Poly-Phosphats. Der angesäuerte Frischschlamm wird entwässert, sodass sich der Grossteil des rückgelösten Phosphats im Filtrat befindet. Die Ausfällung des Phosphats in Form von Brushit erfolgt durch die Zugabe von Calciumhydroxid und Calciumchlorid. Nach der Abtrennung des Brushits, wird das Filtrat teilweise oder vollständig mit dem entwässerten Frischschlamm vermischt und der Faulung zugeführt. Nach Bedarf kann durch die Behandlung des Filtrats der Faulschlammentwässerung ein zusätzlicher Anteil an Phosphat zurückgewonnen werden.



Eigenschaften

Prinzip	• Biologischer Säureaufschluss und Kristallisation im Filtrat
Input	• Frischschlamm (Primär- & Überschussschlamm), 260 kg P/d
Output	• Frischschlamm zur Faulung • Filtrat zu Zulauf ARA • P-Rezyklat: Brushit
Rückgewinnungsquote	• 18% bezogen auf den Inputstrom
Platzbedarf	• Ca. 500 m^2
Energiebedarf	• Ca. 4.9 kWh/EW*a
Chemikalienverbrauch	• $Ca(OH)_2$ (10%ig) ca. 2.3 L/m^3 Frischschlamm mit β-Faktor = 2

Vorteile

- Reduktion von Struvitausfällungen im Faulbehälter und den nachfolgenden Anlagenteilen.
- Steigerung der Leistungskapazität der Faulungsanlage durch höheren TS.
- Reduktion der Rückbelastung der ARA durch phosphatarmes Filtrat.
- Stabilisierung der Bio-P-Stufe durch Rückführung von Filtrat.

Nachteile

- Biologische Vorversäuerung benötigt ggf. lange Aufenthaltszeiten.
- Geringe Rückgewinnungsquote.

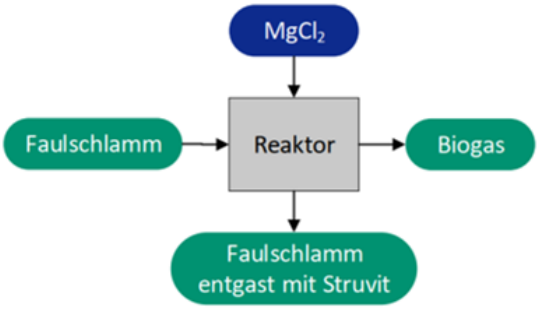
Aktueller Stand

Entwicklungsstand	Anlagen in Betrieb, weltweit
Anbieter	CNP CYCLES, DE
Weiterentwicklungen	Für die Phosphorrückgewinnung auf kommunalen ARA wurde das Verfahren LysoPhos® entwickelt.

EloVac®-P

Verfahrensbeschrieb

Beim Verfahren EloVac®-P wird der Faulschlamm kontinuierlich einem Entgasungsreaktor zugeführt. Mithilfe einer Vakuumpumpe wird im Entgasungsreaktor ein Unterdruck erzeugt. Methan und Kohlenstoffdioxid gehen von der Flüssig- in die Gasphase über und werden separat abgezogen. Das entstandene Biogas kann verwertet werden. Durch das Ausgasen des Kohlenstoffdioxids erhöht sich der pH-Wert des Faulschlammes. Wird dem Reaktor zusätzlich Magnesiumchlorid zugeführt, kommt es zur Kristallisation und Fällung von Struvit. Der entgaste Faulschlamm wird danach der Schlammbehandlung (z.B. Filterpresse) zugeführt.



Eigenschaften

Prinzip	• Kristallisation im Faulschlamm
Input	• Faulschlamm inkl. Fremdschlamm (Beschickung SEA), 310 kg P/d
Output	• Faulschlamm mit Struvitkristallen (10-50 µm) • Biogas
Rückgewinnungsquote	• Struvit-Kristalle verbleiben im Schlamm
Platzbedarf	• Fläche = 10 m^2 und Höhe = 2.5 m
Energiebedarf	• 0.5 kWh/m^3
Chemikalienverbrauch	• $MgCl_2$ (30%ig) ca. 3.3 L/m^3 Faulschlamm mit β-Faktor = 1.5 – 1.6

Vorteile

- Verhinderung von Struvitausfällungen in den Rohrleitungen.
- Verbesserung der Schlammentwässerungseigenschaften und verminderter Polymerbedarf.
- Dezimierte P-Rückbelastung der ARA durch rückgeführtes Filtrat.
- Konzentrierte Abgase welche separat verwendet (Säureaufschluss, Biogas) oder behandelt werden können.

Nachteile

- Keine Abtrennung der feinen Struvit-Kristalle

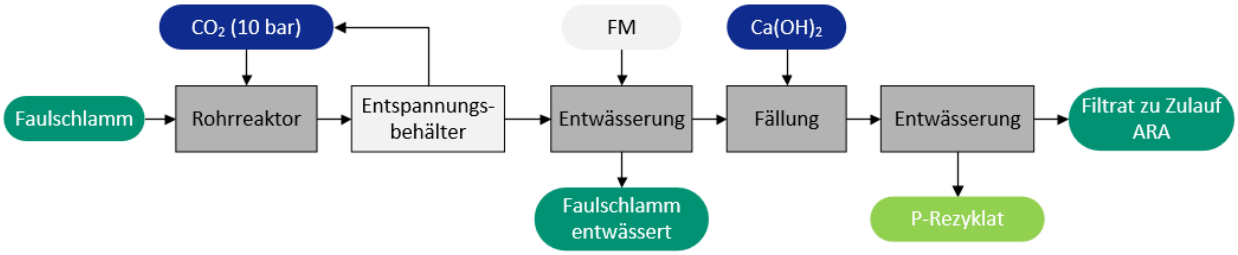
Aktueller Stand

Entwicklungsstand	Anlagen in Betrieb, in DE
Anbieter	ELIQUO STULZ, DE

ExtraPhos®

Verfahrensbeschrieb

Beim ExtraPhos®-Verfahren wird der ausgefaulte Klärschlamm mit verdichtetem Kohlenstoffdioxid (ca. 10 bar) versetzt. Durch das Eindüsen des CO_2 in den Faulschlamm entsteht Kohlensäure, wodurch der pH-Wert auf 4.5 – 5.5 reduziert wird. Durch die Versäuerung des Faulschlamm wird ein Teil des biologisch gebundenen Phosphors rückgelöst. In einem Entspannungsbehälter geht der Kohlenstoffdioxid wieder in die Gasphase über, kann abgetrennt, verdichtet und erneut verwendet werden. Der Faulschlamm wird entwässert, und das Filtrat einer Phosphatfällung zugeführt. Durch die Zugabe von Calciumhydroxid (Kalkmilch) wird Calciumphosphat gefällt, welcher im Anschluss abgetrennt, getrocknet und granuliert wird.



Eigenschaften

Prinzip	• Chemischer Säureaufschluss und Kristallisation im Filtrat
Input	• Faulschlamm + Fremdschlamm (Beschickung SEA), 310 kg P/d
Output	• Faulschlamm • Filtrat zu Zulauf ARA • P-Rezyklat: Struvit oder Brushit, je nach Fällungsreaktion
Rückgewinnungsquote	• Ca. 35% bezogen auf Inputstrom
Platzbedarf	• Keine Informationen
Energiebedarf	• Keine Information
Chemikalienverbrauch	• $Ca(OH)_2$ ca. 1.6 kg/m^3 Faulschlamm mit TR = 8%

Vorteile

- Verhinderung von Struvitausfällungen in den Rohrleitungen
- Reduktion der Rückbelastung der ARA durch phosphatarmes Filtrat
- Rücklösung von an Eisen gebundenem Phosphor

Nachteile

- Verfahren wird nicht weiter für P-Rückgewinnung aus Abwasser angeboten

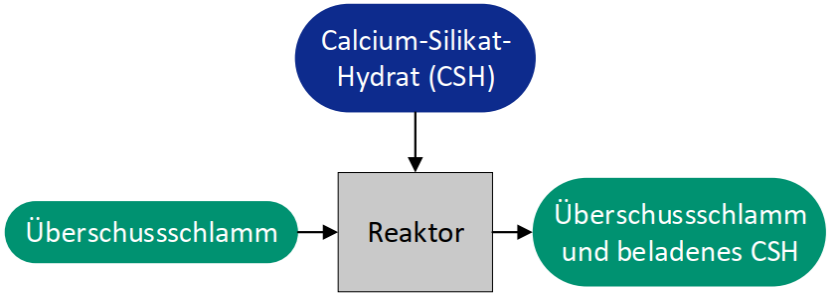
Aktueller Stand

Entwicklungsstand	Pilotanlage, in DE
Anbieter	REMONDIS AG, DE
Weiterentwicklungen	Das Verfahren ist patentiert und wird nicht mehr zur P-Rückgewinnung aus kommunalem Abwasser eingesetzt.

FIX-Phos

Verfahrensbeschrieb

Beim FIX-Phos-Verfahren wird der Überschussschlamm in einem geschlossenen Reaktor während 10 Tagen und unter Zugabe von Calcium-Silicat-Hydrat (CSH) anaerob behandelt. Durch die Ansäuerung des Schlammes werden Polyphosphat und organisches gebundenes Phosphat aus dem Schlamm in die wässrige Phase überführt und auf der Oberfläche und im Inneren des CSH auskristallisiert. Das beladene CSH muss anschliessend abgetrennt und gewaschen werden. Die direkte Zugabe des CSH in die Faulung ist möglich. Die benötigte Menge an CSH ist bei der gemeinsamen Stabilisierung von Primär- und Überschussschlamm jedoch deutlich grösser. Gleichzeitig gestaltet sich die Abtrennung des beladenen CSH durch die im Primärschlamm enthaltenen Störstoffe schwieriger.



Eigenschaften

Prinzip	• Kristallisation im Überschussschlamm
Input	• Überschussschlamm, 200 kg P/d
Output	• Überschussschlamm und beladenes CSH zur Faulung
Rückgewinnungsquote	• 37% bezogen auf den Inputstrom
Platzbedarf	• Keine Informationen vorhanden
Energiebedarf	• 1.17 kWh/m³
Chemikalienverbrauch	• Calcium-Silikat-Hydrat (CSH): ca. 30 kg/m³ Überschussschlamm

Vorteile

- Verhinderung von Struvitausfällungen in den Rohrleitungen.
- Verbesserung der Schlammentwässerungseigenschaften und verminderter Polymerbedarf.
- Dezimierte P-Rückbelastung der ARA durch rückgeführtes Filtrat.

Nachteile

- Keine Abtrennung des beladenen CSH.

Aktueller Stand

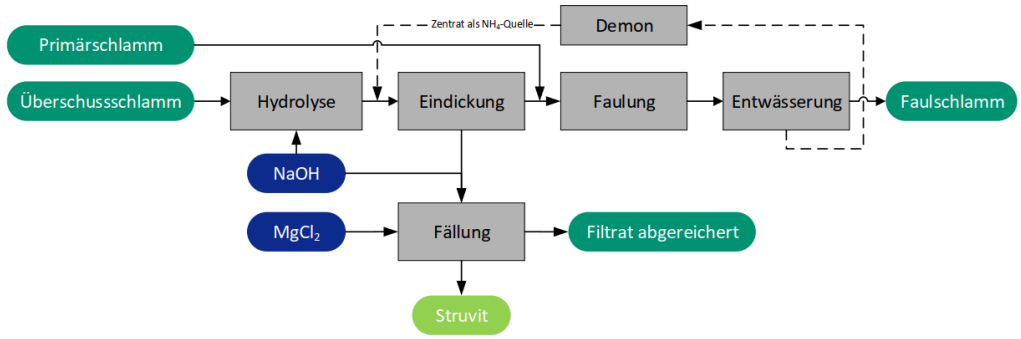
Entwicklungsstand	Pilotanlage im halbtechnischen Massstab (TRG < 6)
Anbieter	Verfahren wurde nach Abschluss der Dissertation (Sebastian Petzet, TU Darmstadt) nicht weiterverfolgt

ENTWURF

LysoPhos®

Verfahrensbeschrieb

Beim LysoPhos®-Verfahren wird der Überschussschlamm einer thermisch-chemischen Hydrolyse (PONDUS®-Verfahren) unterzogen. Das ermöglicht die Rücklösung des durch Bio-P gebundenen Poly-Phosphats. Der hydrolysierte Überschussschlamm wird verdünnt und entwässert, sodass sich der Grossteil des rückgelösten Phosphats im Filtrat befindet. Die Ausfällung des Phosphats in Form von Struvit erfolgt durch die Zugabe von Magnesiumchlorid. Nach der Abtrennung des Struvit, wird das Filtrat teilweise mit dem entwässerten Überschussschlamm vermischt und der Faulung zugeführt. Mit der Zugabe des Zentrats der Faulschlammentwässerung kann ein zusätzlicher Anteil an Phosphat zurückgewonnen werden.



Eigenschaften

Prinzip	• Säureaufschluss und Kristallisation im Filtrat
Input	• Überschussschlamm, 200 kg P/d • Ablauf DEMON, 40 kg P/d • Brauchwasser
Output	• Überschussschlamm hydrolysiert zur Faulung • Filtrat zu Zulauf ARA • P-Rezyklat: Struvit / Anpassung Verfahren auf Brushit möglich
Rückgewinnungsquote	• 30% bezogen auf Inputstrom (ca. 65 kg P/d)
Platzbedarf	• Ca. 250 – 300 m^2
Energiebedarf	• Ca. 2.2 kWh/EW*a
Chemikalienverbrauch	• NaOH 50% ca. 1.5 – 2 L/m^3 ÜSS (für Hydrolyse) • NaOH 50% ca. 0.2 – 0.5 L/m^3 Filtrat (für Struvitfällung) • $MgCl_2$ (30%ig) ca. 1.5 L/m^3 Filtrat mit β-Faktor = 1.5

Vorteile

- Steigerung des Gasausbeute zwischen 10 - 30% durch Hydrolyse.
- Reduktion des TS und verbesserte Schlammentwässerung
- Reduktion der Rückbelastung und Stabilisierung der Bio-P durch phosphatarmes Filtrat.

Nachteile

- LysoPhos als Gesamtverfahren noch nicht in grosstechnischem Massstab untersucht.

Aktueller Stand

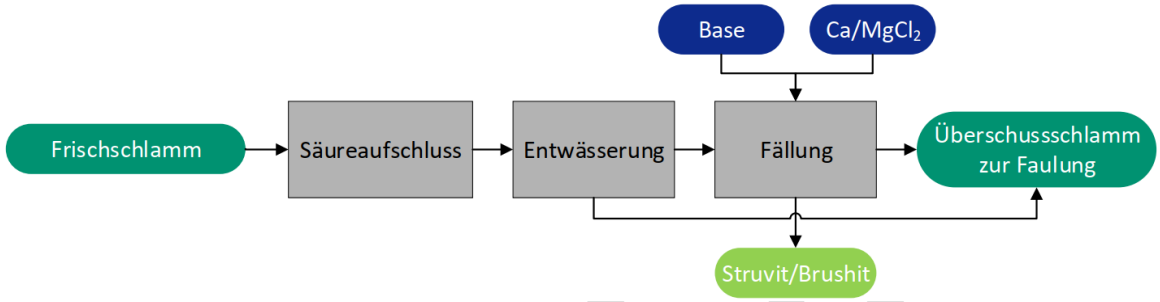
Entwicklungsstand	Labormassstab, Betriebserfahrungen von Teilverfahren (CalPrex + AirPrex)
Anbieter	CNP CYCLES, DE
Weiterentwicklungen	Das Verfahren wird 2022 pilotiert und für das P-Recycling optimiert.

ENTWURF

PhosForce

Verfahrensbeschrieb

Beim PhosForce-Verfahren wird der Frischschlamm einer biologischen Vorversäuerung zugeführt. Durch die Absenkung des pH-Wertes auf 5.5 – 4.0 ist eine Bio-P-Rücklösung von über 50% innerhalb weniger Tage möglich. Der angesäuerte Frischschlamm wird entwässert, sodass sich der Grossteil des rückgelösten Phosphats im Filtrat befindet. Die Ausfällung des Phosphats in Form von Struvit oder Brushit erfolgt durch die Zugabe von Lauge (Natronlauge und Calcium- oder Magnesiumchlorid. Nach der Abtrennung des Phosphats, wird das Filtrat teilweise oder vollständig mit dem entwässerten Frischschlamm vermischt und der Faulung zugeführt. Nach Bedarf kann durch die Behandlung des Filtrats der Faulschlammentwässerung ein zusätzlicher Anteil an Phosphat zurückgewonnen werden.



Eigenschaften

Prinzip	• Biologischer Säureaufschluss und Kristallisation im Filtrat
Input	• Überschussschlamm, 200 kg P/d
Output	• Überschussschlamm zur Faulung • Filtrat zu Zulauf ARA • P-Rezyklat: Struvit oder Brushit
Rückgewinnungsquote	• Zwischen 30 – 50% bezogen auf Inputstrom
Platzbedarf	• Ca. 2000 m^2
Energiebedarf	• Strom ca. 1.7 kWh/t ÜSS • Wärme ca. 4 kWh/t ÜSS
Chemikalienverbrauch	• NaOH 50% oder $Ca(OH)_2$ ca. 1.6 kg/t ÜSS • $MgCl_2$ (30%ig) ca. 3.7 kg/t ÜSS

Vorteile

- Verbesserung der Schlammentwässerungseigenschaften
- Reduktion der Rückbelastung der ARA durch phosphatarmes Filtrat
- Reduktion der Rückbelastung und Stabilisierung der Bio-P durch phosphatarmes Filtrat.

Nachteile

- Hoher Platzbedarf
- Geringer TRG → Pilotierung im halbtechnischen und grosstechnischen (1x) Massstab

Aktueller Stand

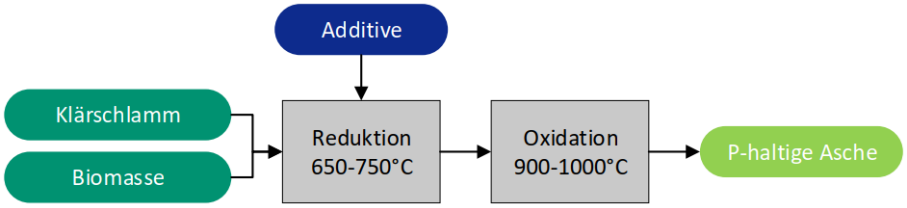
Entwicklungsstand	Grosstechnische Umsetzung (90'000 EW) seit 2020, in DE
Anbieter	Veolia, DE
Weiterentwicklungen	Keine Informationen

ENTWURF

EuPhoRe®

Verfahrensbeschrieb

Beim EuPhoRe®-Verfahren werden Klärschlamm und andere Biomassen (Wirtschaftsdünger, Gärreste, ggf. Komposte) in einem mehrstufigen thermo-chemischen Prozess zu P-haltiger Asche umgesetzt. Durch die Zugabe von Alkali- und/oder Erdalkalichloriden oder -sulfaten wird der Schwermetallaustrag reduziert und andererseits die P-Löslichkeit im Ascheprodukt verbessert wird. Im ersten Prozessschritt wird der entwässerte Schlamm getrocknet. In der Reduktionsphase der Pyrolyse findet die chemische Reduktion von Metallen und Ausschleusung als Chloride in die Gasphase statt. Die an- und abschließende Kohlenstoffverbrennung bei Temperaturen über 900 °C garantiert die Zerstörung sämtlicher organischer Schadstoffe. Gleichzeitig gewährleistet der unmittelbare Temperaturanstieg beim Übergang der Pyrolyse- zur Verbrennungsphase eine Umkristallisation der ursprünglichen Mineralsubstanz hin zu pflanzenverfügbaren Phosphaten.



Eigenschaften

Prinzip	• Pyrolyse des entwässerten Klärschlamms
Input	• Abgabeschlamm, 240 kg P/d
Output	• P-haltige Asche
Rückgewinnungsquote	• >95% bezogen auf Inputstrom
Platzbedarf	• Ca. 100 m^2
Energiebedarf	• Keine Informationen
Chemikalienverbrauch	• 1 - 3 % Alkali- und/oder Erdalkalisalze je t TS

Vorteile

- Hohe Rückgewinnungsquote
- Einmalige Behandlung des Klärschlamms ohne zusätzlichen chemischen oder thermischen Aufschluss der Asche
- Keine Deponierung der Asche, sondern Direkteinsatz und Düngeproduktion

Nachteile

- Nur mit zusätzlichen Chemikalien (P-Booster) lässt sich der Schwermetallgehalt ausreichend reduzieren.

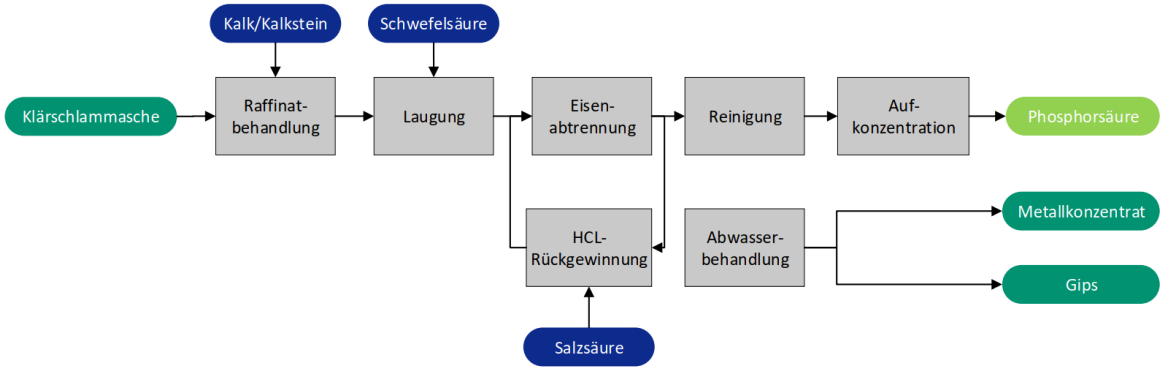
Aktueller Stand

TRG	Grosstechnische Umsetzung, CH und DE
Anbieter	EuPhoRe GmbH / Erzo Oftringen

Phos4Life®

Verfahrensbeschrieb

Beim Verfahren Phos4Life® wird Phosphor in mehreren Verfahrensschritten aus der Klärschlammasche (KSA) nasschemisch extrahiert. Im ersten Schritt gehen der Phosphor und die meisten Schwermetalle durch eine stark schwefelsaure Laugung in Lösung. Der metallarme, mineralische Rückstand wird abgetrennt und kann beispielsweise der Zementindustrie zugeführt werden. Im zweiten Schritt wird Eisen extrahiert und als Eisenchloridlösung separiert und aufbereitet. Im dritten Schritt wird die Phosphorsäure von den Schwermetallen befreit und durch Verdampfung aufkonzentriert und so in technisch reine 75%ige Phosphorsäure überführt werden. Die gelösten Schwermetalle werden im Anschluss aufkonzentriert und können teilweise recycelt werden.



Eigenschaften

Prinzip	• Nasschemische Extraktion aus der Klärschlammasche
Input	• Klärschlammasche (Abgabeschlamm), 240 kg P/d
Output	• P-Rezyklat: Phosphorsäure • Metallkonzentrat • Gips
Rückgewinnungsquote	• >95% bezogen auf Inputstrom
Platzbedarf	• Keine Informationen
Energiebedarf	• Strom: ca. 168 kWh/t TR • Wärme: ca. 4.8 kWh/t TR
Chemikalienverbrauch	• Schwefelsäure (96%ig) • Salzsäure (33%ig) • Kalk

Vorteile

- Hohe Rückgewinnungsquoten

Nachteile

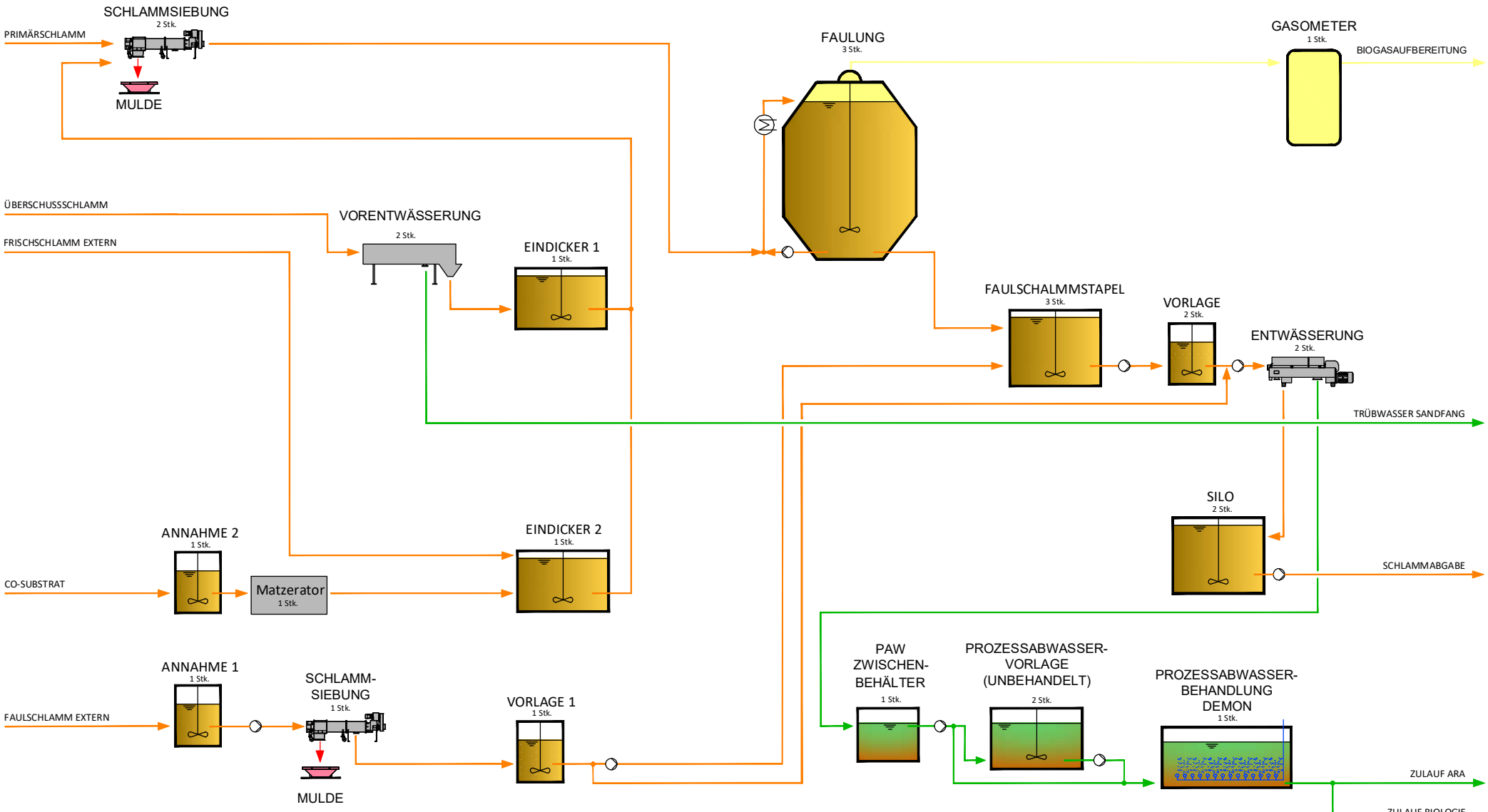
- Hohe Schadstoffgehalte
- Hoher Chemikalienbedarf

Aktueller Stand

Entwicklungsstand	Pilotanlage, in CH
Anbieter	KEBAG, Zuchwil, CH / Técnidas Reunidas SA, ES
Weiterentwicklungen	Abschluss Vorprojekt bis Ende 2021

ANHANG 9

VERFAHRENSSCHEMA SHORTLIST-VERFAHREN



© COPYRIGHT
Das Urheberrecht an dieser Zeichnung und allen Beilagen, die dem Empfänger persönlich anvertraut sind verbleiben jederzeit der HOLINGER AG. Ohne unsere schriftliche Genehmigung darf diese nicht kopiert oder vervielfältigt, auch niemals dritten Personen mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Bauherr	Gemeindeverband ARA Thunersee
Objekt	ARA Thunersee

Schlammbehandlung

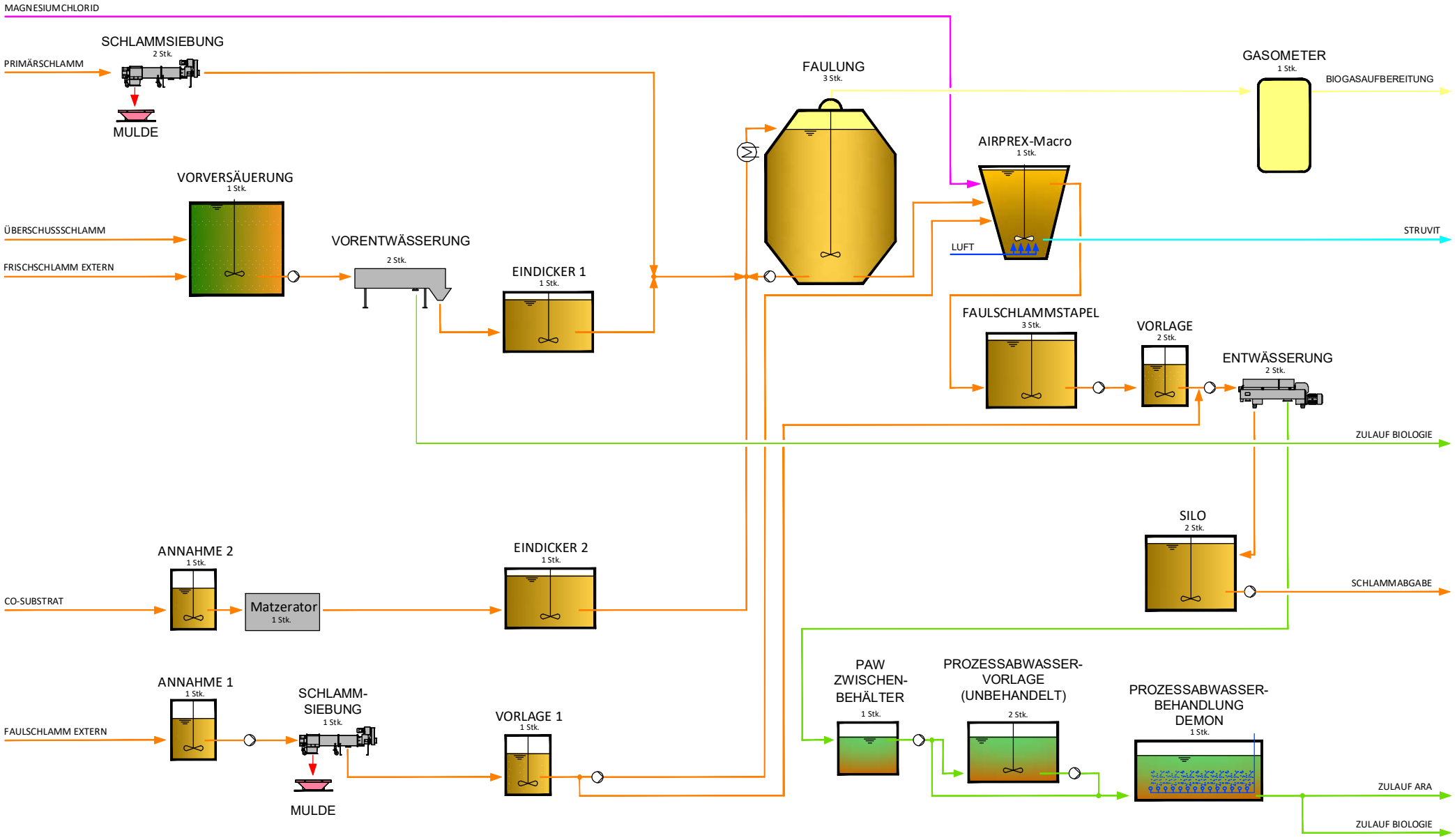
Verfahrensschema

HOLINGER AG INGENIEURUNTERNEHMEN
Gabelstrasse 4, CH-4410 Liestal
Telefon +41 (0)61 926 22 22, Fax +41 (0) 61 926 2 3 24
liestal@holinger.com www.holinger.com
Zertifiziert ISO 9001:2008

Massstab	%
Plan. Nr.	B8251.002
Index	0

Gezeichnet	KOA	29.07.2021
Kontrolliert	JOS	29.07.2021

P:\Bern\B8251\ARA Thunersee\28_VS_Pläne\B8251_001.1a_R+I_Verfahren Schlammbehandlung.dwg



© COPYRIGHT
Das Urheberrecht an dieser Zeichnung und allen Beilagen, die dem Empfänger persönlich anvertraut sind verbleiben jederzeit der H.OLINGER AG. Ohne unsere schriftliche Genehmigung darf diese nicht kopiert oder vervielfältigt, auch niemals dritten Personen mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Bauherr	Gemeindeverband ARA Thunersee
Objekt	ARA Thunersee

Schlammbehandlung
mit AirPrex-Macro-Verfahren
Verfahrensschema

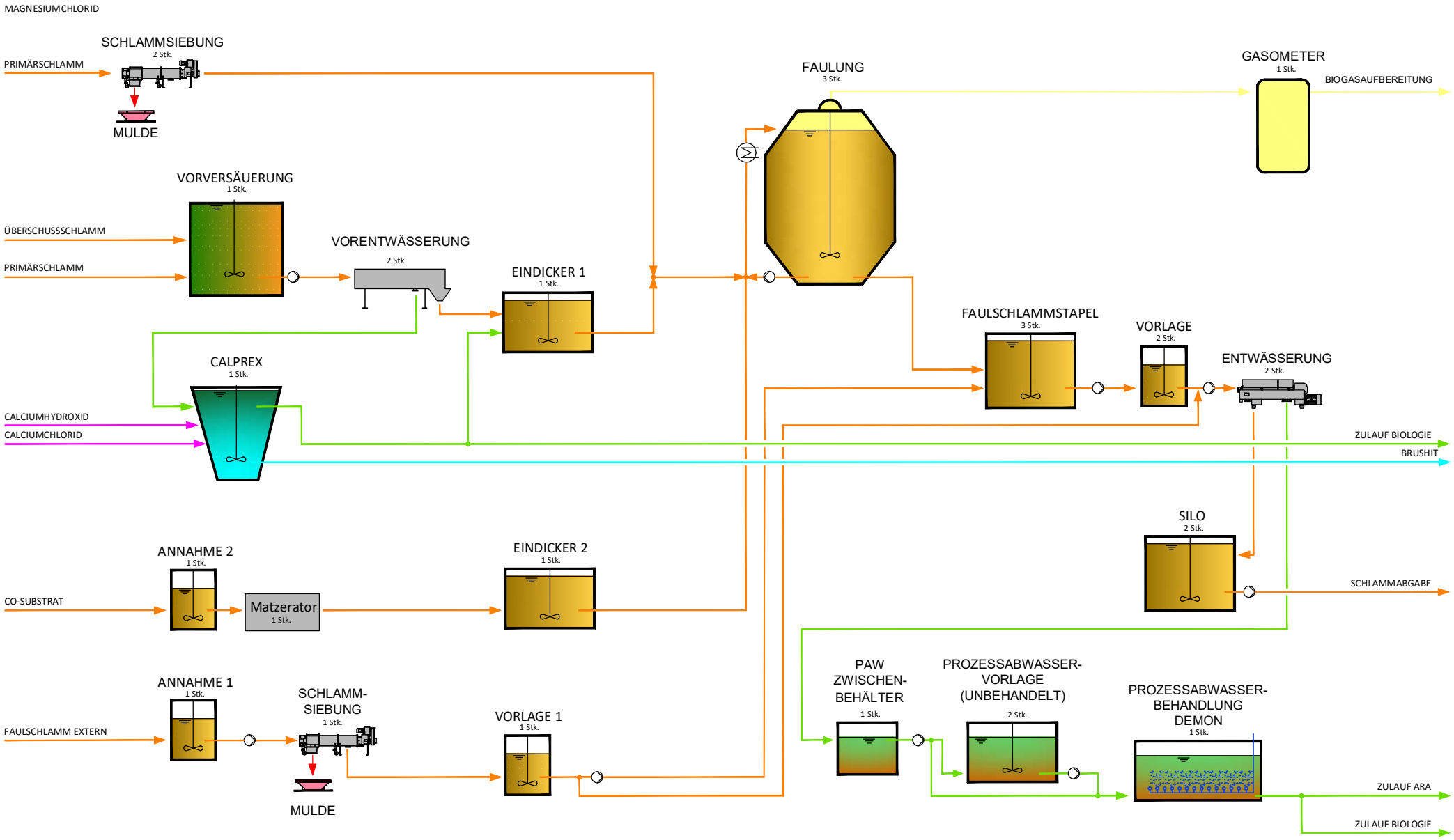
Massstab: %

Plan. Nr.: **B8251.001**
Index: **0**

HOLINGER AG INGENIEURUNTERNEHMEN
Gabelstrasse 4, CH-4410 Liestal
Telefon +41 (0)61 926 22 22, Fax +41 (0)61 926 2 3 24
liestal@holinger.com www.holinger.com
Zertifiziert ISO 9001:2008

Gezeichnet	KOA	02.11.2021
Kontrolliert	JOS	29.07.2021

P:\Bern\B8251\ARA Thunersee\28_VS_Pläne\B8251_003.0_R+I_Verfahren Schlammbehandlung_CalPrex.dwg



© COPYRIGHT
Das Urheberrecht an dieser Zeichnung und allen Beilagen, die dem Empfänger persönlich anvertraut sind verbleiben jederzeit der H.OLINGER AG. Ohne unsere schriftliche Genehmigung darf diese nicht kopiert oder vervielfältigt, auch niemals dritten Personen mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Bauherr	Gemeindeverband ARA Thunersee
Objekt	ARA Thunersee

Schlammbehandlung
mit CalPrex-Verfahren

Verfahrensschema

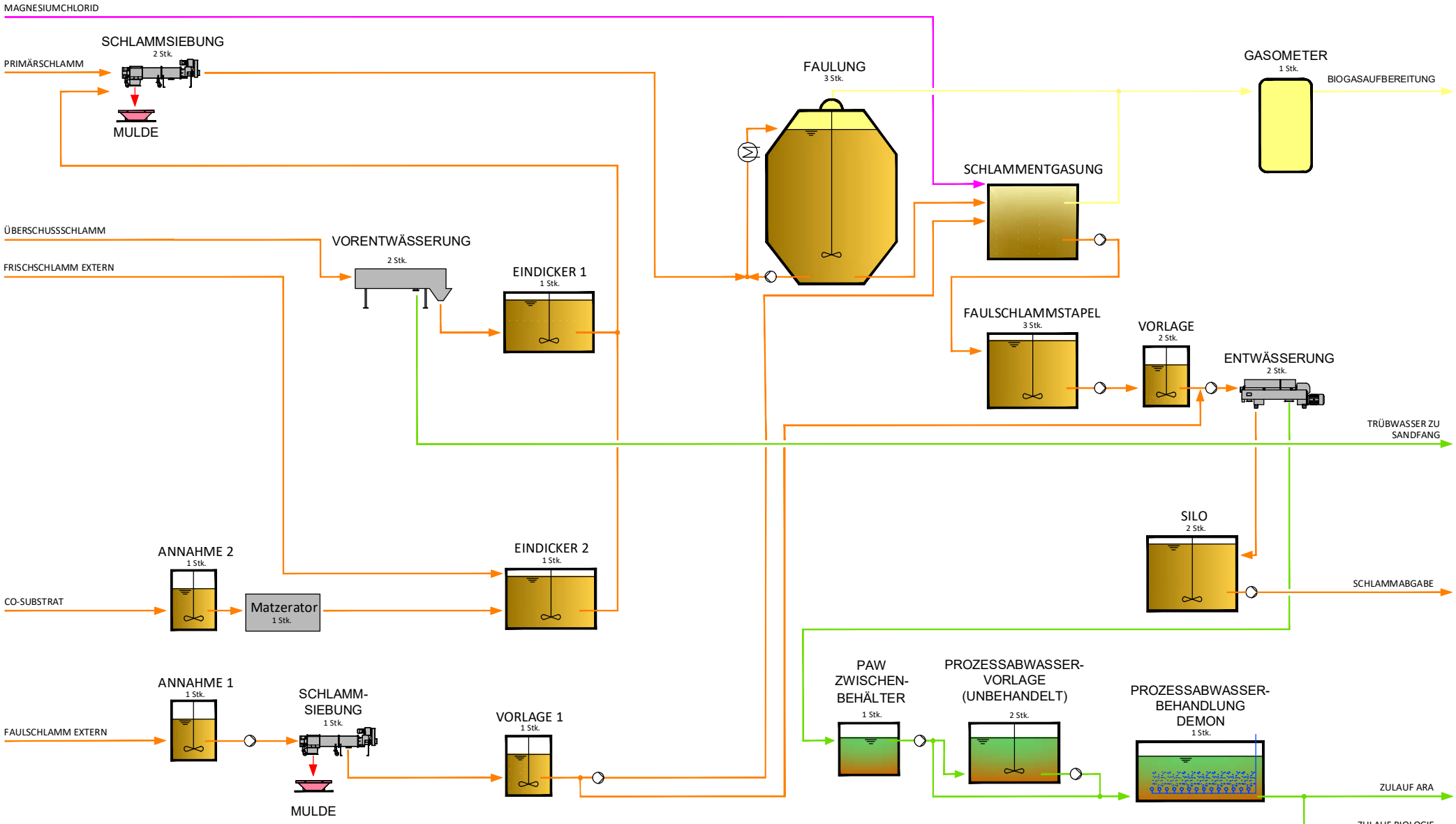
Massstab: %

Plan. Nr.: **B8251.002**
Index: **0**

HOLINGER AG INGENIEURUNTERNEHMEN
Gabelstrasse 4, CH-4410 Liestal
Telefon +41 (0)61 926 22 22, Fax +41 (0) 61 926 2 3 24
liestal@holinger.com www.holinger.com
Zertifiziert ISO 9001:2008

Gezeichnet	KOA	02.11.2021
Kontrolliert	JOS	29.07.2021

P:\Bern\B8251\ARA Thunersee\28_VS_Pläne\B8251_003.0_R+I_Verfahren Schlammbehandlung_CalPrex.dwg



- TRÜBWASSER / ZENTRAT
- LUFT
- SCHLAMM
- CHEMIKALIEN
- RECHENGUT/SAND
- GAS

© COPYRIGHT
Das Urheberrecht an dieser Zeichnung und allen Beilagen, die dem Empfänger persönlich anvertraut sind verbleiben jederzeit der H.OLINGER AG. Ohne unsere schriftliche Genehmigung darf diese nicht kopiert oder vervielfältigt, auch niemals dritten Personen mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Bauherr	Gemeindeverband ARA Thunersee
Objekt	ARA Thunersee

Schlammbehandlung
mit EloVac-P-Verfahren

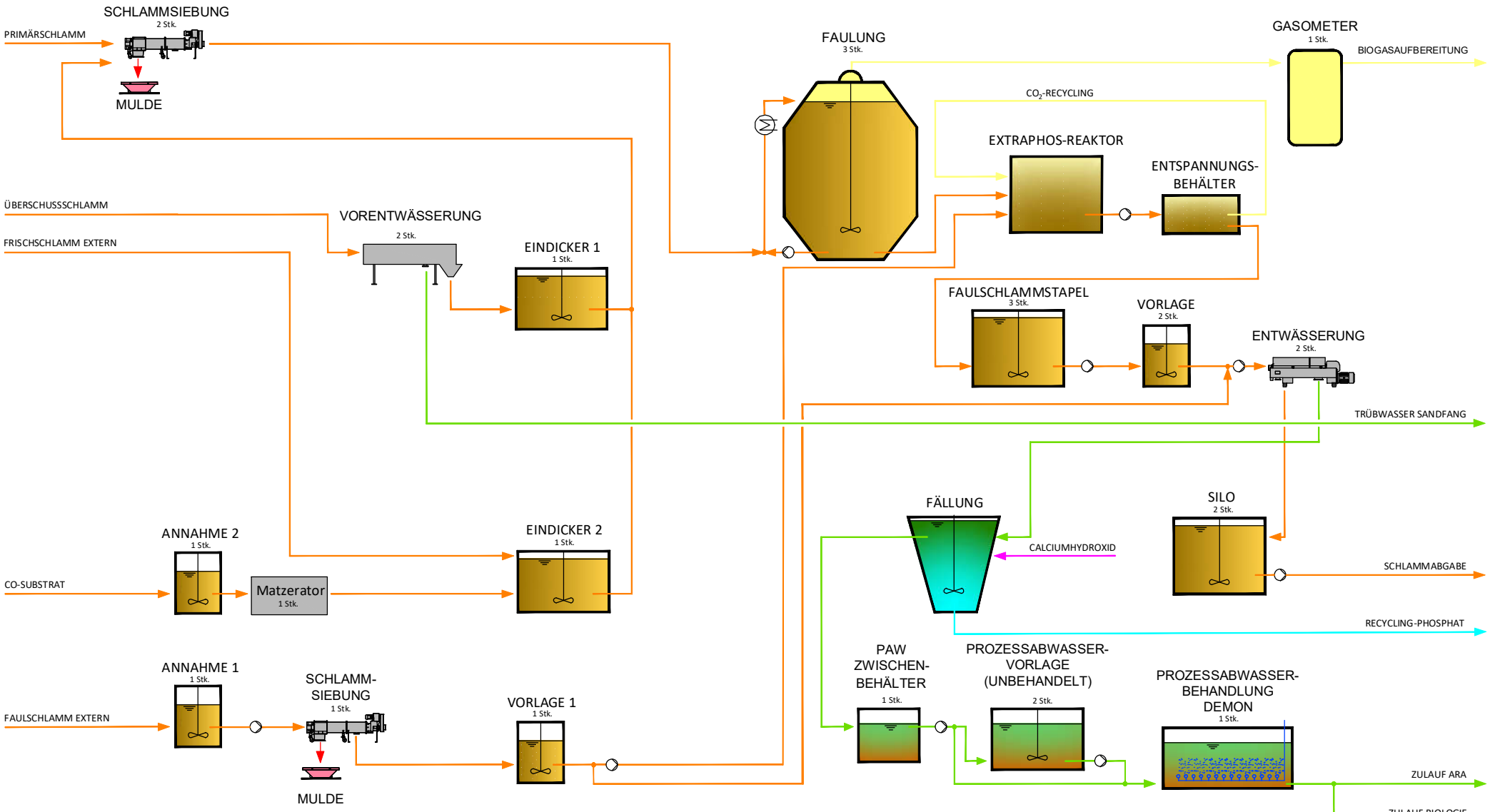
Verfahrensschema

HOLINGER AG INGENIEURUNTERNEHMEN
Gabelstrasse 4, CH-4410 Liestal
Telefon +41 (0)61 926 20 20, Fax +41 (0) 61 926 2 3 24
liestal@holinger.com www.holinger.com
Zertifiziert ISO 9001:2008

Massstab	%
Plan. Nr.	B8251.003
Index	0

Gezeichnet	KOA	29.07.2021
Kontrolliert	JOS	29.07.2021

P:\Bern\B8251\ARA Thunersee\28_VS_Pläne\B8251_005.0_R+I_Verfahren Schlammbehandlung_EloVac-P.dwg



© COPYRIGHT
Das Urheberrecht an dieser Zeichnung und allen Beilagen, die dem Empfänger persönlich anvertraut sind verbleiben jederzeit der H.OLINGER AG. Ohne unsere schriftliche Genehmigung darf diese nicht kopiert oder vervielfältigt, auch niemals dritten Personen mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Bauherr	Gemeindeverband ARA Thunersee
Objekt	ARA Thunersee

Schlammbehandlung
mit ExtraPhos-Verfahren

Verfahrensschema

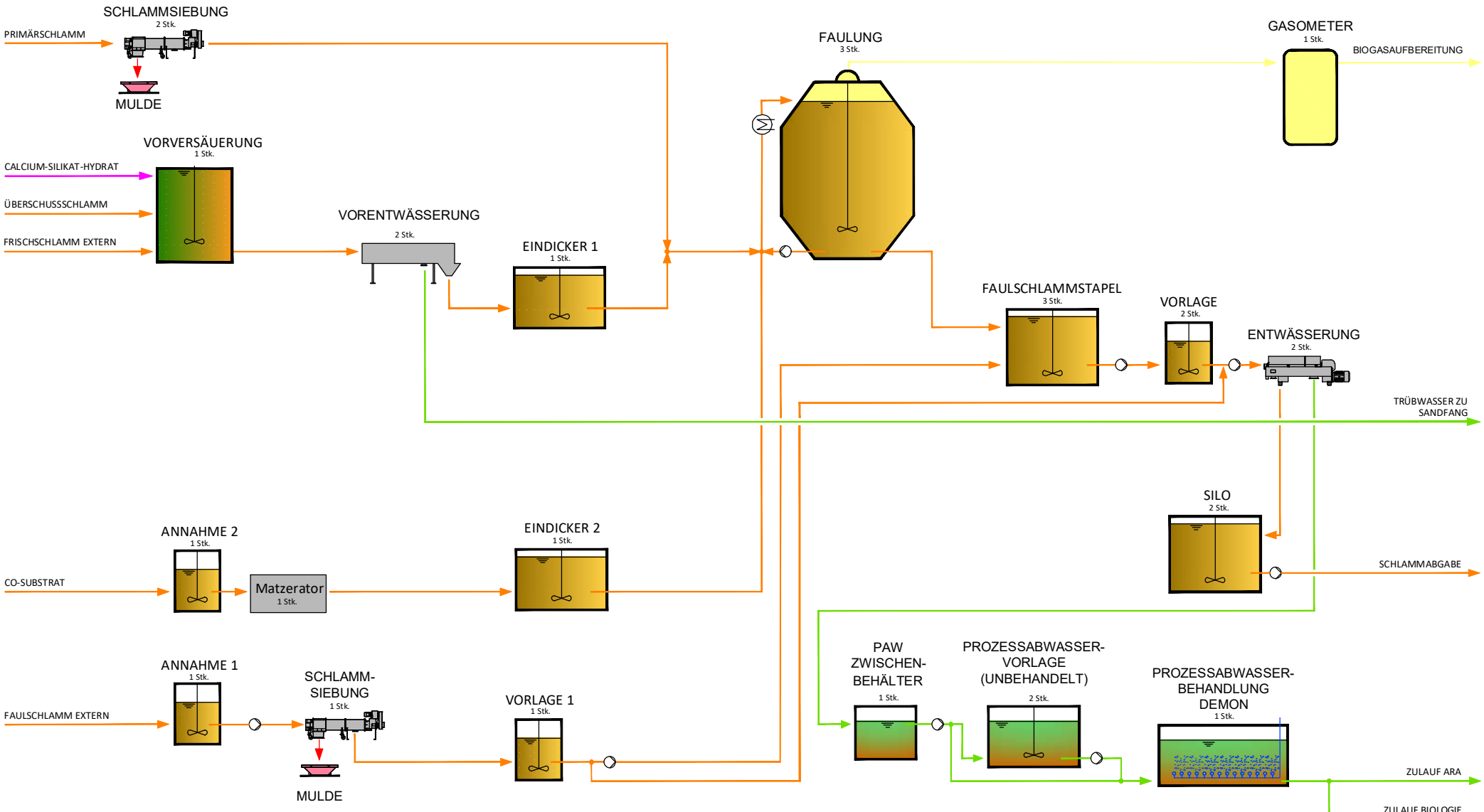
Massstab: %

Plan. Nr.: **B8251.004**
Index: **0**

HOLINGER AG INGENIEURUNTERNEHMEN
Gotthelfstrasse 4, CH-4410 Liestal
Telefon +41 (0)61 926 20 20, Fax +41 (0) 61 926 2 3 2 4
liestal@holinger.com www.holinger.com
Zertifiziert ISO 9001:2008

Gezeichnet	KOA	17.08.2021
Kontrolliert	JOS	17.08.2021

P:\Bern\B8251\ARA Thunersee\28_VS_Pläne\B8251_006.0_R+I_Verfahren Schlammbehandlung_ExtraPhos.dwg



© COPYRIGHT
Das Urheberrecht an dieser Zeichnung und allen Beilagen, die dem Empfänger persönlich anvertraut sind verbleiben jederzeit der H.OLINGER AG. Ohne unsere schriftliche Genehmigung darf diese nicht kopiert oder vervielfältigt, auch niemals dritten Personen mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Bauherr	Gemeindeverband ARA Thunersee
Objekt	ARA Thunersee

Schlammbehandlung
mit FIX-Phos-Verfahren
Verfahrensschema

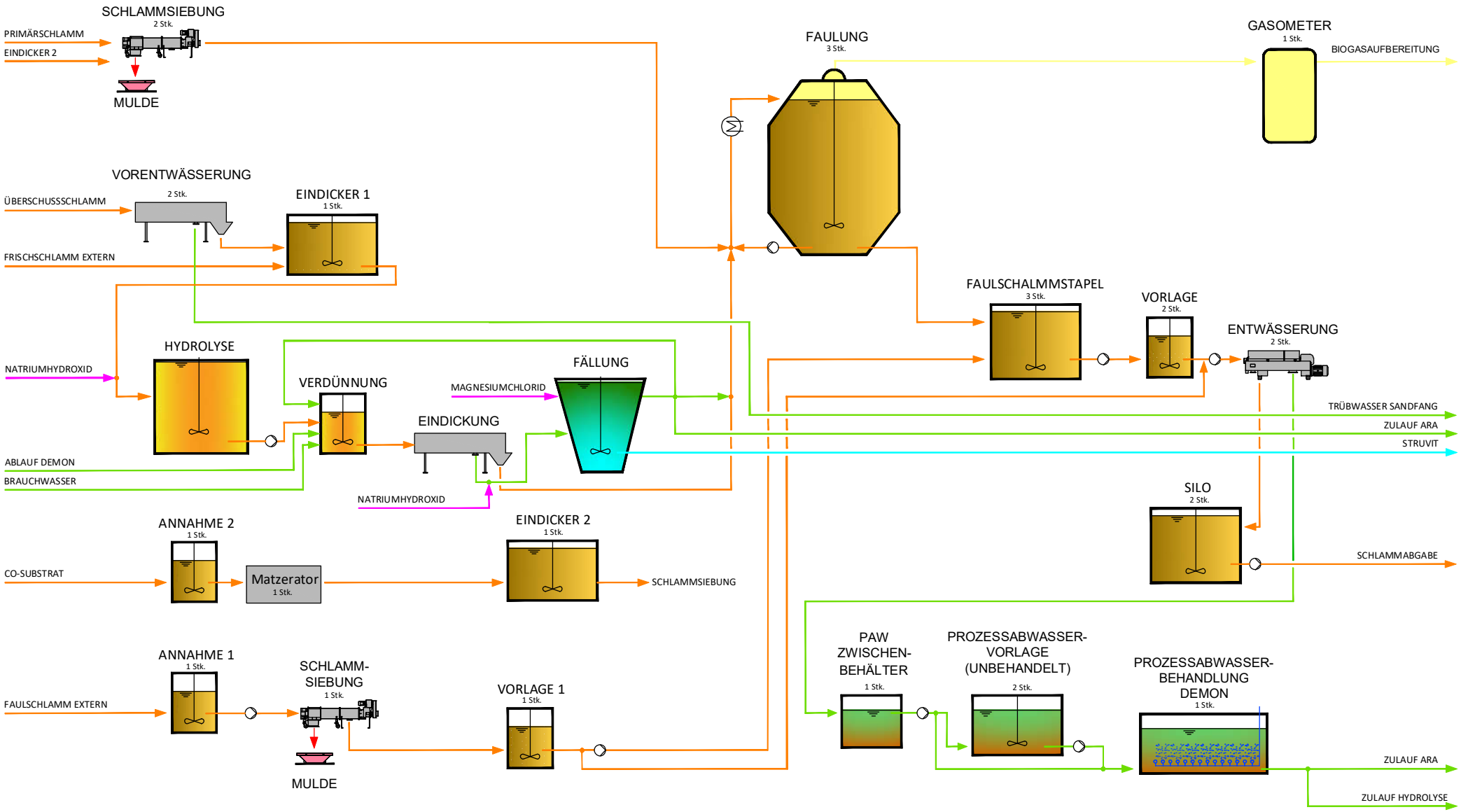
Massstab: %

Plan. Nr.: **B8251.005**
Index: **0**

HOLINGER AG INGENIEURUNTERNEHMEN
Gabelstrasse 4, CH-4410 Liestal
Telefon +41 (0)61 926 22 22, Fax +41 (0)61 926 2 3 2 4
liestal@holinger.com www.holinger.com
Zertifiziert ISO 9001:2008

Gezeichnet	KOA	17.08.2021
Kontrolliert	JOS	17.08.2021

P:\Bern\B8251\ARA Thunersee\28_VS_Pläne\B8251_004.0_R+I_Verfahren Schlammbehandlung_FIX-Phos.dwg



© COPYRIGHT
Das Urheberrecht an dieser Zeichnung und allen Beilagen, die dem Empfänger persönlich anvertraut sind verbleiben jederzeit der H.OLINGER AG. Ohne unsere schriftliche Genehmigung darf diese nicht kopiert oder vervielfältigt, auch niemals dritten Personen mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Bauherr	Gemeindeverband ARA Thunersee
Objekt	ARA Thunersee

Schlammbehandlung
mit LysoPhos-Verfahren

Verfahrensschema

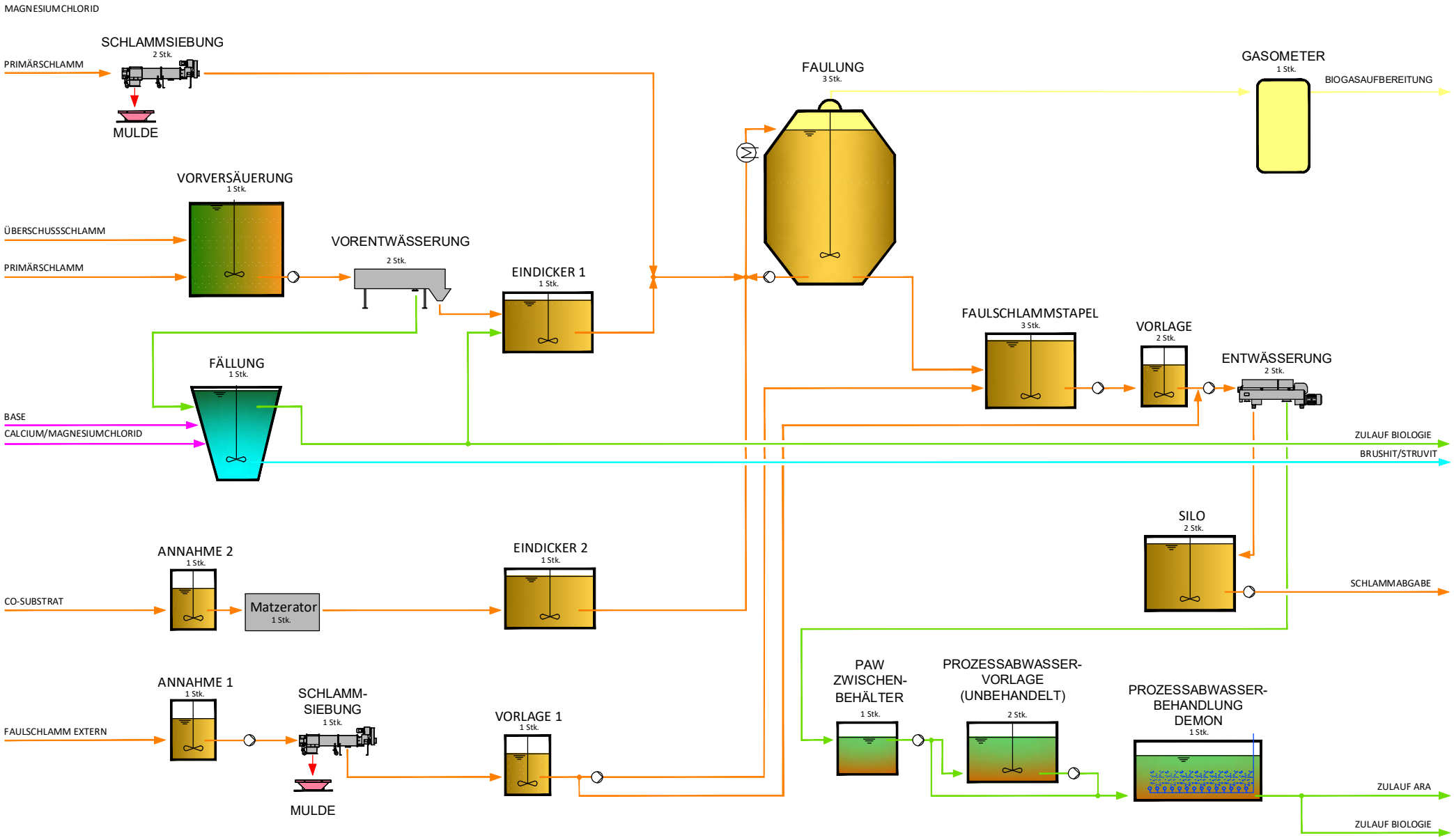
Massstab: %

Plan. Nr.: **B8251.006**
Index: **0**

HOLINGER AG INGENIEURUNTERNEHMEN
Gabelstrasse 4, CH-4410 Liestal
Telefon +41 (0)61 926 22 22, Fax +41 (0)61 926 23 24
liestal@holinger.com www.holinger.com
Zertifiziert ISO 9001:2008

Gezeichnet	KOA	23.08.2021
Kontrolliert	JOS	23.08.2021

P:\Bern\B8251\ARA Thunersee\28_VS_Pläne\B8251_003.0_R+I_Verfahren Schlammbehandlung_LysoPhos.dwg



© COPYRIGHT
Das Urheberrecht an dieser Zeichnung und allen Beilagen, die dem Empfänger persönlich anvertraut sind verbleiben jederzeit der H.OLINGER AG. Ohne unsere schriftliche Genehmigung darf diese nicht kopiert oder vervielfältigt, auch niemals dritten Personen mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Bauherr	Gemeindeverband ARA Thunersee
Objekt	ARA Thunersee

Schlammbehandlung
mit PhosForce-Verfahren
Verfahrensschema

HOLINGER AG INGENIEURUNTERNEHMEN
Gabelstrasse 4, CH-4410 Liestal
Telefon +41 (0)61 926 22 22, Fax +41 (0)61 926 2 3 24
liestal@holinger.com www.holinger.com
Zertifiziert ISO 9001:2008

Massstab	%
Plan. Nr.	B8251.007
Index	0
Gezeichnet	KOA 02.11.2021
Kontrolliert	JOS 29.07.2021

P:\Bern\B8251\ARA Thunersee\28_VS_Pläne\B8251_003.0_R+I_Verfahren Schlammbehandlung_PhosForce.dwg

ANHANG 10

BERECHNUNG ENTSORGUNGSWEGE

ANHANG 10 - BERECHNUNG ENTSORGUNGSWEGE

Entsorgungsschritt	Anteil Output		Mengen pro Jahr	Transportweg	Tonnenkilometer
AKTUELLER ENTSORGUNGSWEG					
↓ ARA	100%	-	10'000 t Klärschlamm (TR = 25%)	4 km	40'000 tkm/a
↓ KVA	35%	Mittelwert Glührückstand 2020	3'500 t Klärschlammasche	10 km	35'000 tkm/a
Deponie					
				Total	**75'000 tkm/a**
SCHLAMMVERFAHREN					
Variante Verwertung KVA					
↓ ARA	94%	gemäss Anbieter [1]	9'400 t Klärschlamm (TR = 25%)	4 km	37'600 tkm/a
↓ KVA	35%	Mittelwert Glührückstand 2020	3'290 t Klärschlammasche	10 km	32'900 tkm/a
Deponie					
				Total	**70'500 tkm/a**
Variante Verwertung Zementwerk					
↓ ARA	94%	gemäss Anbieter [1]	9'400 t Klärschlamm (TR = 25%)	30 km	282'000 tkm/a
↓ Trocknung	28%	Trockung von 25% auf 90% TR	2'611 t Klärschlamm (TR = 90%)	40 km	104'400 tkm/a
Zementwerk					
				Total	**386'400 tkm/a**
ALTERNATIVVERFAHREN					
EuPhoRe®					
↓ ARA	100%	-	10'000 t Klärschlamm (TR = 25%)	88 km	880'000 tkm/a
↓ SVA / P-Rückgewinnung	35%	Mittelwert Glührückstand 2020	3'500 t Klärschlammasche	76 km	266'000 tkm/a
Deponie					
				Total	**1'146'000 tkm/a**
Phos4Life®					
↓ ARA	100%	Keine Veränderung	10'000 t Klärschlamm (TR = 25%)	67 km	670'000 tkm/a
↓ SVA	35%	Mittelwert Glührückstand 2020	3'500 t Klärschlammasche	77 km	269'500 tkm/a
↓ P-Rückgewinnung	285%	69'055 t/a Laugungsrückstand und 16'500 t/a Gips auf 30'000 t KSA/a Input [2]	9'981 t Rückstände	50 km [2]	499'100 tkm/a
Zementwerk					
				Total	**1'438'600 tkm/a**

[1] CNP CYCLES GmbH (24.09.2021): Berechnung der Phosphorbilanz Rückgewinnungsverfahren ARA Thunersee

[2] ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwissenschaften (2018): Studie zum ökologischen Vergleich der Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche mittels Phos4life-Verfahren mit der Primärproduktion von P-Säure aus Rohphosphat - Endbericht