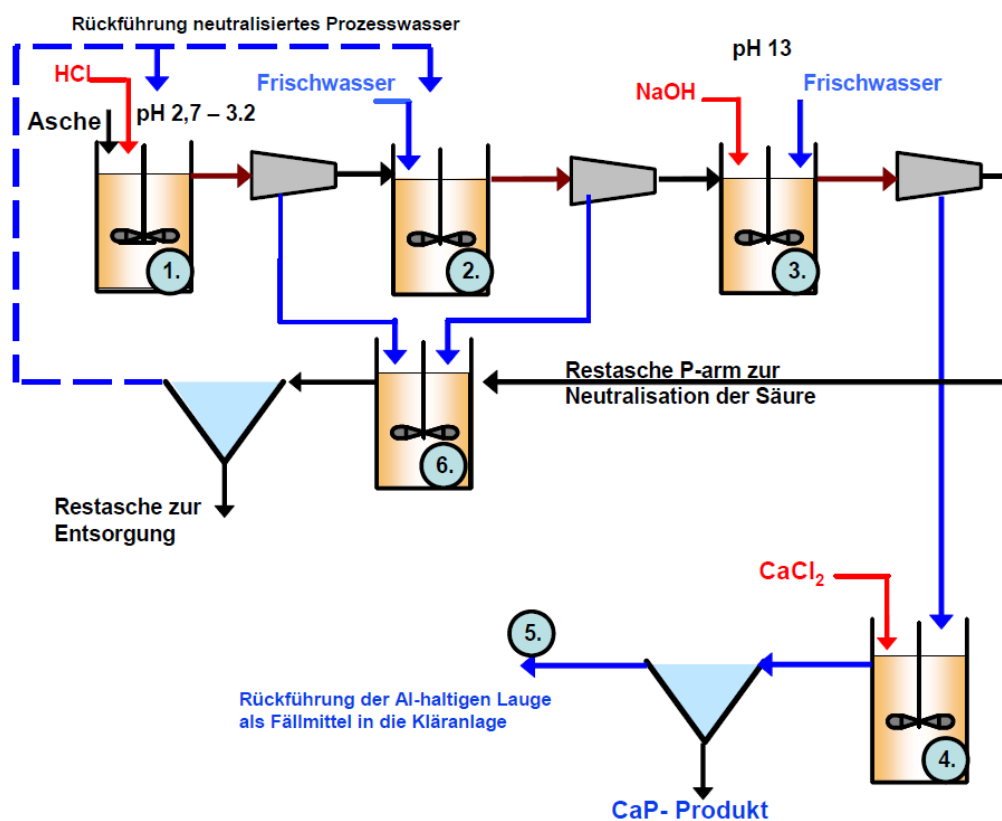


Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse SESAL-Phos



Inhaltsverzeichnis

SESAL-Phos Verfahren.....	5
1.1 Grundlagen allgemein	5
1.1.1 Prozessskizze SESAL-Phos Verfahren.....	5
1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell.....	6
1.1.3 Verfahrensbeschreibung	6
1.1.4 Betriebsparameter SESAL-Phos Verfahren	8
1.2 Datengrundlage für Bewertung.....	8
1.2.1 Sachbilanz	8
1.2.2 Stoffflussanalyse.....	8
1.2.3 Charakteristik Endprodukt	9
1.2.4 Umsetzung.....	10
1.2.5 Flächenbedarf.....	10
1.2.6 Ökonomische Grundlagen.....	10
1.3 Ergebnis SESAL-Phos Verfahren.....	12
1.3.1 Technologie Bewertung	12
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)	12
1.3.2.1 Stoffflussanalyse.....	12
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung SESAL-Phos	18
1.3.4 Ökonomische Bewertung	21
1.3.5 Literatur.....	26
1.4 Anhang	27
1.4.1 Stoffflussanalyse SESAL-Phos Prozess	27
1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess SESAL-Phos	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessskizze SESAL-Phos (Verfahren).....	5
Abbildung 2: STAN Modell SESAL-Phos-Prozess.....	6
Abbildung 3: STAN Modell SESAL-Phos gesamte Prozesskette	6
Abbildung 4: Säure Laugung bei pH 3 mit Umlagerung Phosphor Calcium-P zu Al-P	7
Abbildung 5: Ressourcenbedarf SESAL-Phos (Petzet et al., 2010)	8
Abbildung 6: Transfer von P und SM in Eluat bei pH 3.....	9
Abbildung 7: P-Rücklösung und Verhalten der Schwermetalle bei basischem Aufschluss (pH 13).....	9
Abbildung 8: Ergebnis SFA Phosphor SESAL-Phos Verfahren (2 signifikante Stellen)	13
Abbildung 9: Entfrachtungsleistung (Asche:Endprodukt).....	14
Abbildung 10: Ergebnis Güterflussanalyse SESAL-Phos (2 signifikante Stellen).....	15
Abbildung 11: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente [kg bzw. g/kg P _{rückg.}] SESAL-Phos.....	16
Abbildung 12: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren).....	17
Abbildung 13: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation	19

Abbildung 14: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (SESAL-Phos)	19
Abbildung 15: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung SESAL-Phos Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP).....	20
Abbildung 16: Upscaling Faktoren Investitionskosten SESAL-Phos	21
Abbildung 17:Produktspezifische Kosten abhängig vom P-Gehalt der Asche.....	23
Abbildung 18: Variantenrechnung SESAL-Phos	24
Abbildung 19: Kostenaufgliederung SESAL-Phos (30.000 t Asche/a).....	24
Abbildung 20: Kosten gesamte Prozesskette SESAL-Phos Verfahren 30.000 t	25
Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse SESAL-Phos.....	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter SESAL-Phos Verfahren.....	8
Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer-)metallgehalte und org. Spurenstoffe SESAL-Phos Endprodukt	10
Tabelle 3: Löslichkeit in % bezogen auf Pges; Eignung als Sekundärdünger	10
Tabelle 4: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential SESAL-Phos	12
Tabelle 5: P-Transferkoeffizienten SESAL-Phos Prozess	12
Tabelle 6: P-Transferkoeffizienten Fällung.....	12
Tabelle 7: Transferkoeffizienten Schwermetalle SESAL-Phos Prozess	13
Tabelle 8: Transferkoeffizienten Schwermetalle Subprozess Reextraktion	13
Tabelle 9: Säurebedarf zur Aschelaugung	14
Tabelle 10: Ressourcenaufwand SESAL-Phos Verfahren.....	14
Tabelle 11: Outputflüsse SESAL-Phos Verfahren	14
Tabelle 12: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf SESAL-Phos.....	15
Tabelle 13: Indirekte SM-Emissionen SESAL-Phos	16
Tabelle 14: Kumulierter Energieaufwand SESAL-Phos	16
Tabelle 15: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung SESAL-Phos	18
Tabelle 16: Transportwege SESAL-Phos.....	18
Tabelle 17: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente Prozesskette SESAL-Phos	18
Tabelle 18: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette SESAL-Phos	18
Tabelle 19: Bewertung SESAL-Phos-Endprodukt.....	20
Tabelle 20: Investitionskosten SESAL-Phos in Relation zum jährlichen Aschedurchsatz (Investitionskostenfaktor Ash Dec® Verfahren)	21
Tabelle 21: Jahreskosten SESAL-Phos (30.000 t Asche/a).....	22
Tabelle 22: Einsparungen und Erlöse SESAL-Phos (30.000 t Asche/a)	22
Tabelle 23: Spezifische Kosten SESAL-Phos (30.000 t Asche/a)	22
Tabelle 24: Jahreskosten gesamte Prozesskette SESAL-Phos	25



SESAL-Phos Verfahren

1.1 Grundlagen allgemein

Das SESAL-Phos (Sequential Elution of Sewage sludge ash for Aluminum and Phosphorus recovery) Verfahren ist eines im Rahmen der Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ der Bundesrepublik Deutschland entwickeltes nasschemisches Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor (Calciumphosphat) aus der Klärschlammasche (Petzet et al., 2010). Das Verfahren wurde im Labormaßstab und bereits halbtechnisch erfolgreich umgesetzt. Die Prozesse werden in saure Laugung der Asche zur Umlagerung des Phosphors von Calciumphosphat zu Aluminiumphosphat, Neutralisierung und Laugung auf pH 13 zur Rücklösung des Phosphors und anschließende Calciumphosphatfällung unterteilt. Zwischen diesen Prozessen werden die festen und flüssigen Phasen voneinander abgetrennt. Im halbtechnischen Maßstab konnten Rückgewinnungsquoten bezogen auf die eingesetzte Asche von rund 70 % erzielt werden. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf können bis zu 62 % des Phosphors rückgewonnen werden

1.1.1 Prozessskizze SESAL-Phos Verfahren

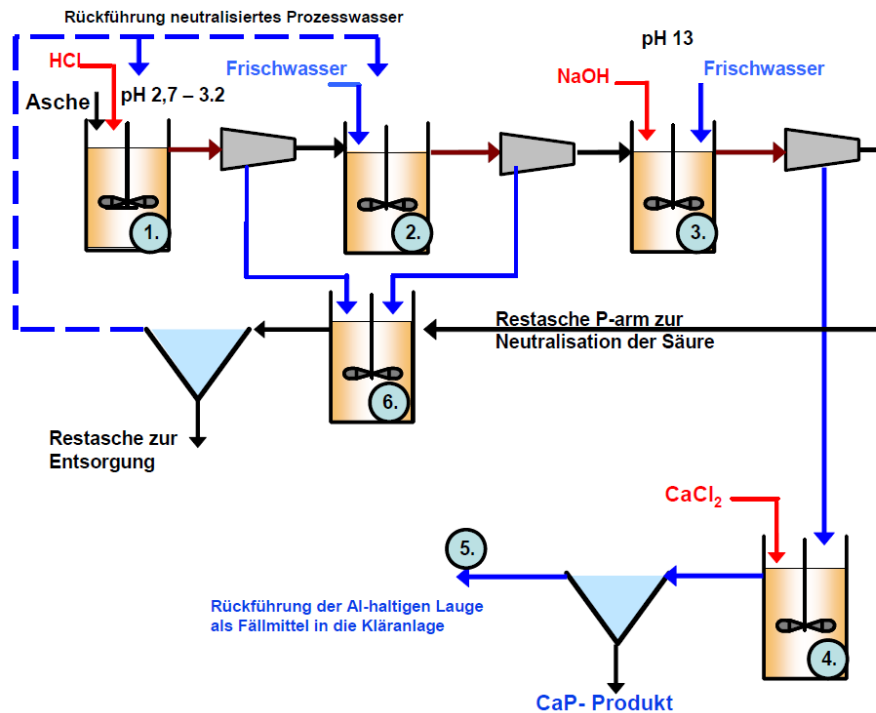


Abbildung 1: Prozessskizze SESAL-Phos (Verfahren)

1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell

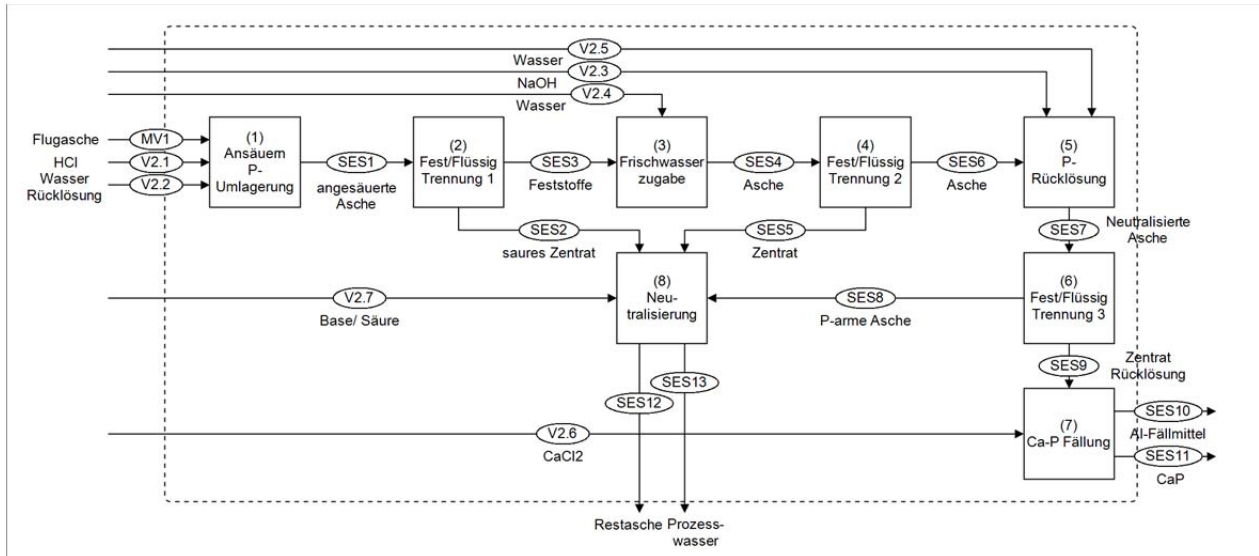


Abbildung 2: STAN Modell SESAL-Phos-Prozess

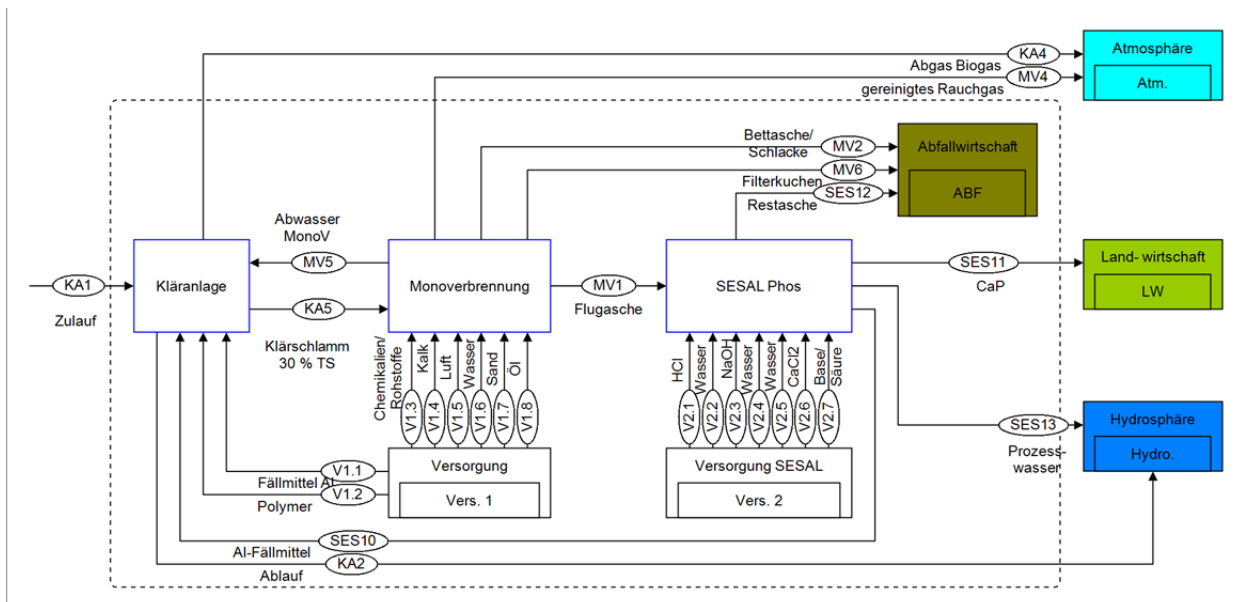


Abbildung 3: STAN Modell SESAL-Phos gesamte Prozesskette

1.1.3 Verfahrensbeschreibung

P-Umlagerung (1)

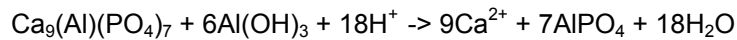
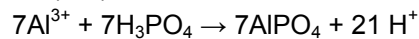
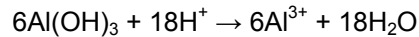
Die Klärschlamm-Asche wird durch Zugabe von Salzsäure (HCl; Fest-Flüssigverhältnis von 1:10) auf einen pH-Wert von 3 angesäuert. Die Löslichkeit von P, Ca und Al nimmt mit abnehmenden pH-Wert zu. Bei einem pH-Wert von ca. 3 liegen ca. 3/4 des Phosphors und des Calciums, sowie knapp 2/3 des Aluminiums gelöst vor. Phosphor und Calcium stammen aus den in der Asche vorliegenden Calciumphosphaten. Allerdings wird Phosphor sogleich wieder in Form von Aluminiumphosphat gebunden. Das Optimum für die Rücklösung von Ca-P und die gezielte Bildung von Al-P ist bei einem pH-Wert von 3. Der Umlagerungsbereich liegt zwischen einem pH-Wert von 4,5 - 3.

Reaktionsgleichungen zur P, Ca und Al Rücklösung:





Reaktionsgleichung Al Rücklösung aus Aluminiumhydroxid und Umlagerung zu Al-P



Infolge der pH-Wert Absenkung werden auch einzelne Schwermetalle in geringem Ausmaß rückgelöst (siehe Transferkoeffizienten).

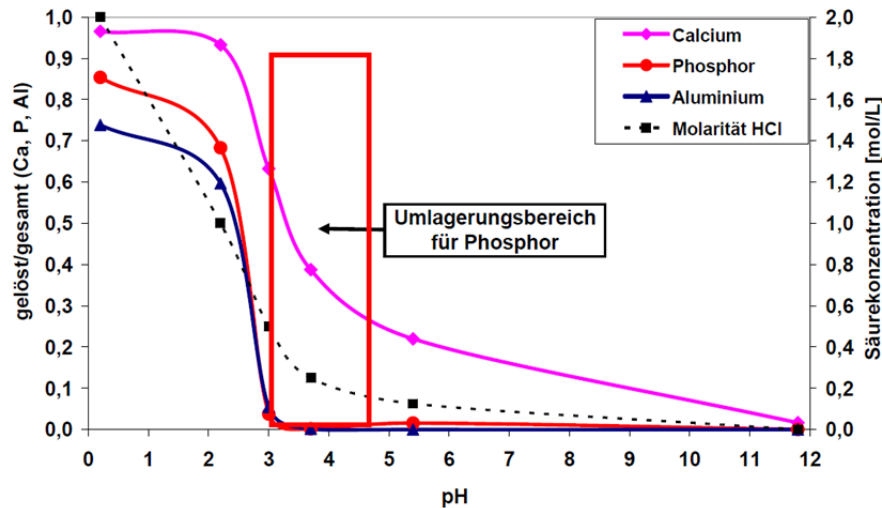


Abbildung 4: Säure Laugung bei pH 3 mit Umlagerung Phosphor Calcium-P zu Al-P

Fest-Flüssig-Trennung 1 (2)

Über eine Fest-Flüssig-Trennung mittels Zentrifuge wird die angesäuerte Asche von der Flüssigkeit abgetrennt. Die angesäuerte mit Calcium und teilweise mit Schwermetallen beladene flüssige Phase wird abgetrennt und ein Neutralisationsbecken geführt.

Zwischenspülen (3)

Die P-Ausbeute im Prozess P-Rücklösung kann zusätzlich erhöht werden, wenn die Asche noch einmal mit stark verdünnter Salzsäure (0,01 mol HCl/L) oder Wasser im Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:10 behandelt wird.

Fest-Flüssig-Trennung 2 (4)

Das Spülwasser wird abgetrennt und wie die angesäuerte Flüssigkeit in das Neutralisationsbecken geführt.

P-Rücklösung (5)

Im zweiten P-Rücklösungsschritt werden die im Feststoff gebundenen Aluminiumphosphate durch Basenzugabe (NaOH) gelöst. Ziel pH Wert ist 13. Aufgrund der vorangegangenen Umlagerungsprozesse kann die P-Rücklösung auf bis zu 80 % gesteigert werden. Im Mittel wird ca. 75 % des Phosphors in Lösung gebracht. Vorteil der Basischen Laugung ist die selektive Rücklösung von P. Im Vergleich zu einem sauren Aufschluss werden Schwermetalle kaum (Cd, Cr) bis gar nicht (Cu, Ni, Pb und Zn) rückgelöst

Fest-Flüssig-Trennung 3 (6)

Die P-arme Asche wird über eine dritte Fest-Flüssig Trennstufe vom Zentrat abgetrennt.

Fällung (7)

Ziel der Fällung ist die Überführung der gelösten Ortho-Phosphate in unlösliche Calciumphosphate. Als Fällmittel wird CaCl_2 eingesetzt. Aufgrund der bereits in der Rücklösung erfolgten pH-Wert Anhebung, muss keine Base mehr zugeführt werden. Es entsteht ein Endprodukt aus Hydroxylapatiten ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) mit geringen Anteilen an Calciumcarbonaten ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) und Natriumcarbonaten ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

1.1.4 Betriebsparameter SESAL-Phos Verfahren

Die Rücklösung bzw. Umlagerung von P, Ca und Al wurde unter anderem im Rahmen des Deutschen BMBF-Verbundprojektes ProPhos: „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“ untersucht. Daraus werden zusammenfassend die optimalen Betriebsparameter für eine Phosphorrückgewinnung mit dem SESAL-Phos Verfahren dargestellt (Tabelle 1).

Parameter	von
pH Laugung (HCl)	2,7-3,2
Rücklösung	>75 %
Aufenthaltszeit	60 - 90 min
SM-Entfernung	keine
pH Rücklösung Al-Phosphate (NaOH)	13
Aufenthaltszeit	Ca. 60 min
pH-Fällung	9
Fällmittel	CaCl ₂
Effizienz Fällung	99 %

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter SESAL-Phos Verfahren

Mögliche Betriebsprobleme

- Keine Bekannt

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Sachbilanz

Die Datengrundlage für die Erstellung der Sachbilanz ist sehr gut. Die Sachbilanz kann auf Basis der angewendeten Rückgewinnung an zwei Aschen abgeleitet werden. Die Angaben werden von Petzet et al., 2011 bereits kg/kg Asche angegeben (+).

Ressourcen	Reinsubstanz [kg/kg Asche]
HCl [100%]	0,15-0,22
NaOH	0,32
CaCl ₂	0,30-0,36
Wasser	12

Abbildung 5: Ressourcenbedarf SESAL-Phos (Petzet et al., 2010)

Reststoffe, in Form der angesäuerten Asche, fallen mit ca. 1 kg/kg Inputasche an (o/+). Die anfallende Menge an aluminiumhaltige Lauge kann allerdings nicht beziffert werden. Nach Wiebke et al., 2011 liegt der elektrische Energiebedarf für Pumpen und Rührwerke bei rund 200 kWh/t Inputasche (o). Die Endproduktmenge wird basierend auf den P-Input in die Fällung und den P-Gehalt des anfallenden Endproduktes errechnet. Die Menge an Prozessabwasser wird über die Güterflussanalyse bilanziert.

1.2.2 Stoffflussanalyse

TK saure nasschemische Behandlung (pH 3)

Ab einem pH von 3 wird an Calcium gebundener Phosphor zu Aluminium-Phosphat umgelagert und ist anschließend zu 99 % in der Asche nachweisbar. Schwermetalle verhalten sich dabei sehr inhomogen. Während Cr und Ni nahezu vollständig in der Asche rückgehalten werden, lösen sich Cd, Cu, Ni und Zn in unterschiedlichem Ausmaß und sind im Eluat nachweisbar (Abbildung 6). Der Transfer von P und Schwermetallen wurde auf Basis von nur 2 Aschen abgeleitet, wodurch höhere Unsicherheiten berücksichtigt werden sollten (o/+).

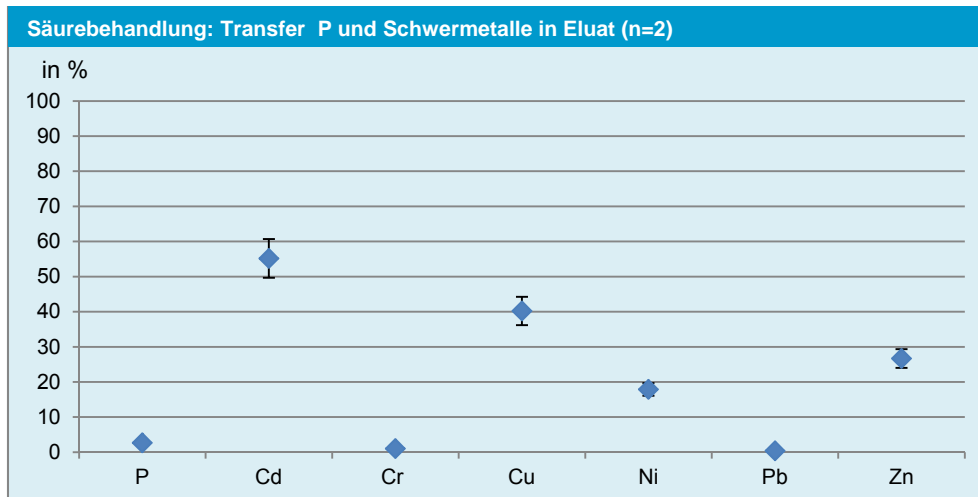


Abbildung 6: Transfer von P und SM in Eluat bei pH 3

TK basische nasschemische Behandlung (pH 13)

Durch den basischen Aufschluss der Asche bei pH 13 geht > 70 % des als Al-Phosphat gebundenen Phosphors in Lösung. Schwermetalle gehen bei diesen hohen pH Werten kaum bzw. nicht in Lösung und verlassen den Rückgewinnungsprozess über die Reststoffasche (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** (+).

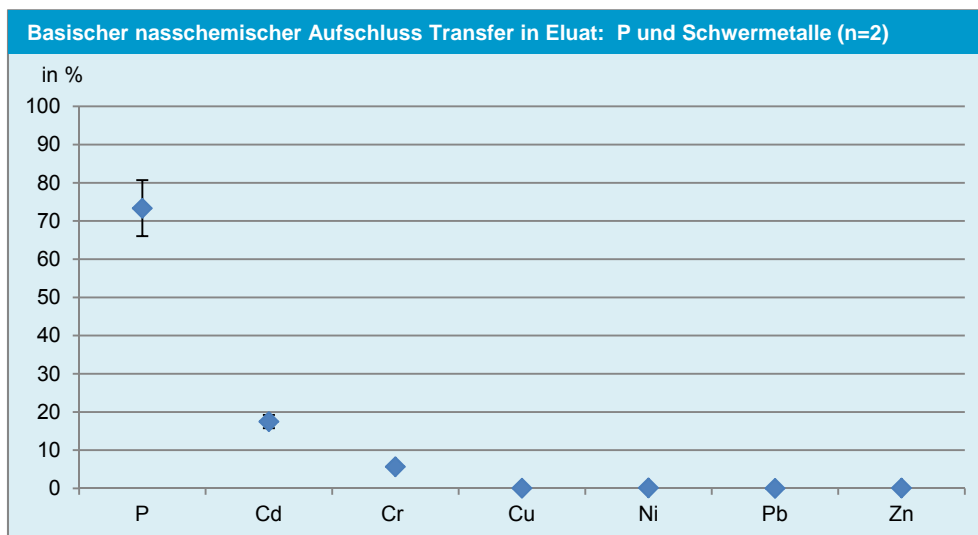


Abbildung 7: P-Rücklösung und Verhalten der Schwermetalle bei basischem Aufschluss (pH 13)

1.2.3 Charakteristik Endprodukt

1.2.3.1 Nährstoffe, (Schwer)-metalle und org. Spurenstoffe

Als calciumhaltiges Fällmittel kommt CaCl_2 zum Einsatz. Die Fällmittel und der bei der Fällung eingestellte pH-Wert haben Einfluss auf den Phosphor- und Schwermetallgehalt im Endprodukt (+). Es entstehen verschiedene Calciumphosphat-Verbindungen mit hoher Reinheit (99 %) und Phosphorgehalten von bis zu 15 %. Unabhängige Laborversuche bestätigen, dass die Schwermetallgehalte sowohl deutlich unter den rechtlich vorgegebenen Grenzwerten als auch deutlich unter den Schwermetallgehalten vergleichbarer Mineraldünger liegen (+). Auffallend hoch sind in diesem Fall die Arsengehalte im Endprodukt. Das bedeutet, dass Arsen in der sauren Extraktion gut rückgelöst wird. Untersuchungen wie stark die Rücklösung erfolgt, liegen jedoch nicht vor. Teils hohe Schwankungen bei den Schwermetallgehalten sind auf die Anwendung unterschiedlicher Fällmittel wie CaCl_2 oder sonstiger calciumhaltiger Verbindungen zurückzuführen. Hinsichtlich der Metalle liegt Eisen im Gegensatz zu Aluminium nur in geringen Konzentrationen im Endprodukt vor. Organische Spurenstoffe wie B(a)P oder NPE konnten im Vergleich zu nasschemischen Verfahren aus dem Klärschlamm nicht detektiert werden. LAS und Phthalate sind mit Gehalten von 0,3 bzw.

0,05 mg/kg TS sehr niedrig (++)). Aufgrund der vorangegangenen thermischen Behandlung ist das Endprodukt frei von jeglichen pathogenen Keimen wie E-coli, coliforme Bakterien und Salmonellen (++)).

	Nährstoffe [g/kg TS]	Schwermetalle [mg/kg TS]	Org. Verunreinigungen [mg/kg TS]
P	153	As 27,9	AOX -
N	0	Cd 0,074	PAK -
Mg	0,2	Cr n.n.	PCDD/F -
Ca	297	Cu 4,5	LAS -
K	0,08	Hg	Phtalate -
Metalle [mg/kg TS]		Ni 0,2	
Al	1.340	Pb 3,4	
Fe	20	Zn 20,7	

Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe SESAL-Phos Endprodukt

1.2.3.2 P-Löslichkeit und Pflanzenaufnahme

Löslichkeitsversuche mit dem SESAL-Phos Produkt zeigen eine schlechte Wasserlöslichkeit, aber eine sehr gute Zitronen- und Ameisensäurelöslichkeit. Die Ammon-Citrat Löslichkeit, ein guter Indikator für die mögliche Aufnahme durch die Pflanze weist eine sehr schlechte Löslichkeit auf. Test hinsichtlich einer P-Aufnahme von Pflanzen wurde für dieses Endprodukt auf einem alkalischen Lehm Boden durchgeführt. Römer (2013) zeigt dabei auf, dass das entstehende Calciumphosphat ungeeignet ist (P-Aufnahme: 0-25 %). Zur Aufnahme auf einem sauren Boden liegen keine Daten vor.

Extraktionsmittel	Löslichkeit [%]
Wasser	<5
Zitronensäure	78
Ameisensäure	90
Mineralsäure	90
Ammon-Citrat	25

Tabelle 3: Löslichkeit in % bezogen auf Pges; Eignung als Sekundärdünger

Endprodukt ist ein pulver- bzw. staubförmiges Ca-P, welches auf der einen Seite gut gelagert und abgepackt werden kann, aber auf der anderen Seite für eine direkte landwirtschaftliche Ausbringung ungeeignet ist. Dafür müsste das Produkt in einem weiteren Prozessschritt pelletiert werden (+).

1.2.3.3 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus dem SESAL-Phos Prozess

Restasche

Nach der Neutralisierung kann die Restasche ohne weitere Behandlung auf einer Reststoffdeponie abgelagert werden (o).

Prozesswasser

Ebenso können auch die Prozesswässer nach dem Schritt der Neutralisierung in einer biologisch-chemischen Abwasserreinigung zugeführt werden. Daten zur einer Analyse chemischer Parameter sind nicht bekannt (-).

1.2.4 Umsetzung

Das SESAL-Phos Verfahren wurde im Rahmen der deutschen Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphors“ im labormaßstab Maßstab umgesetzt. Nach derzeitigem Stand, wird an diesem Verfahren nicht mehr weitergearbeitet.

1.2.5 Flächenbedarf

Nicht bekannt

1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Die Investitionskosten für eine SESAL-Phos Anlage mit einem jährlichen Aschedurchsatz von 30.000 t und einer Betriebsdauer von 30 Jahren (15 Jahre für Maschinentechnik) liegt bei rund 8,7 Mio. € Diese Daten



basieren auf den Kostenschätzungen auf Basis der Laborversuche und wurden im Rahmen des deutschen PhoBe Projekts auf eine großtechnische Umsetzung hochgerechnet. Somit handelt es sich dabei um Kostenerhebungen mit großer Unsicherheit. Der Personalaufwand wird auf 16 Mitarbeiter geschätzt. Die weiteren Betriebskosten werden auf Basis der ermittelten Massen- und Energieflüssen berechnet. In der Literatur werden produktspezifische Kosten von rund 9 €/kg P bzw. einwohnerspezifische Kosten von rund 3,5 €/(EW*a) genannt. Durch einen möglichen Erlös aus dem rückgewonnenen AI-Fällmittel können die produktspezifischen Kosten auf rund 7,5 €/kg P gedrückt werden.

1.3 Ergebnis SESAL-Phos Verfahren

1.3.1 Technologie Bewertung

Das SESAL-Phos Verfahren ist aufgrund der zahlreichen Prozesse ein komplexes Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus der Klärschlammasche. Da im ersten Schritte eine Umlagerung von Calcium- auf Aluminiumphosphate angestrebt wird, ist eine umstellung von einer Eisen- auf eine Aluminiumfällung in der Kläranlage erforderlich. Dieser technologische Ansatz ist im Labormaßstab erprobt. wobei auch eine großtechnische Umsetzung bereits möglich ist.

SESAL-Phos Verfahren	
Entwicklungsstand	Labormaßstab
Komplexität Technologie	Nasschemischer Aufschluss mit Umlagerung, Alkalischer Aufschluss, FFT, CaP-Fällung, Neutralisierung Asche und Abwasser
Implementierung	Klärschlammasche
Wartungsaufwand	Mäßig
Veränderung Schlammbehandlung	Al-Fällung Kläranlage
Effektivität des Verfahrens	~70%
Potential bezogen auf KA-Zulauf	~ 60 %
Qualitativer Ressourcenaufwand	Salzsäure, Natronlauge (NaOH), Calciumquelle (CaCl ₂)
Abfallstoffe	Restasche, Prozesswasser
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	Keine, vielmehr Al-Recycling

Tabelle 4: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential SESAL-Phos

1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

1.3.2.1 Stoffflussanalyse P

In der Flugasche steht eine potentielle P-Fracht von 58.000 kg P/a zur Verfügung. Im Vergleich zum Klärschlamm ist die P-Fracht in der Asche aufgrund von Verlusten bei der Verbrennung um ca. 3 % verringert. Bei der P-Umlagerung und der Frischwasserzugabe geht rund 3 - 5 % des Phosphors in Lösung und wird nach einer Neutralisierung als Prozesswasser aus dem Prozess geschleust. Durch die alkalische Behandlung durch die Zugabe von Natronlauge kann rund 75 % des hauptsächlich als Al-Phosphat gebundenen Phosphors rückgelöst werden. Im Abschließenden Prozess der Fällung wird 99 % des gelöst vorliegenden Phosphors als Ca- bzw. Al-Phosphat ausgefällt.

Mit dem SESAL-Phos Verfahren können, bezogen auf die Referenzkläranlage 41.100 kg P/a rückgewonnen werden. Das entspricht bezogen auf den Input über die Asche rund 70 % und in Relation zum Kläranlagenzulauf rund 60 %.

TK	Feststoff SES3	Saures Zentrat SES2	UL	Asche SES6	Zentrat SES5	UL	P-arme Asche SES 8	Zentrat Rückl. SES9	UL
P	97	3	14	99	1	1	97	3	1

Tabelle 5: P-Transferkoeffizienten SESAL-Phos Prozess

TK	CaP SES11	Al-Fällmittel SES10	UL
P	99	1	1

Tabelle 6: P-Transferkoeffizienten Fällung

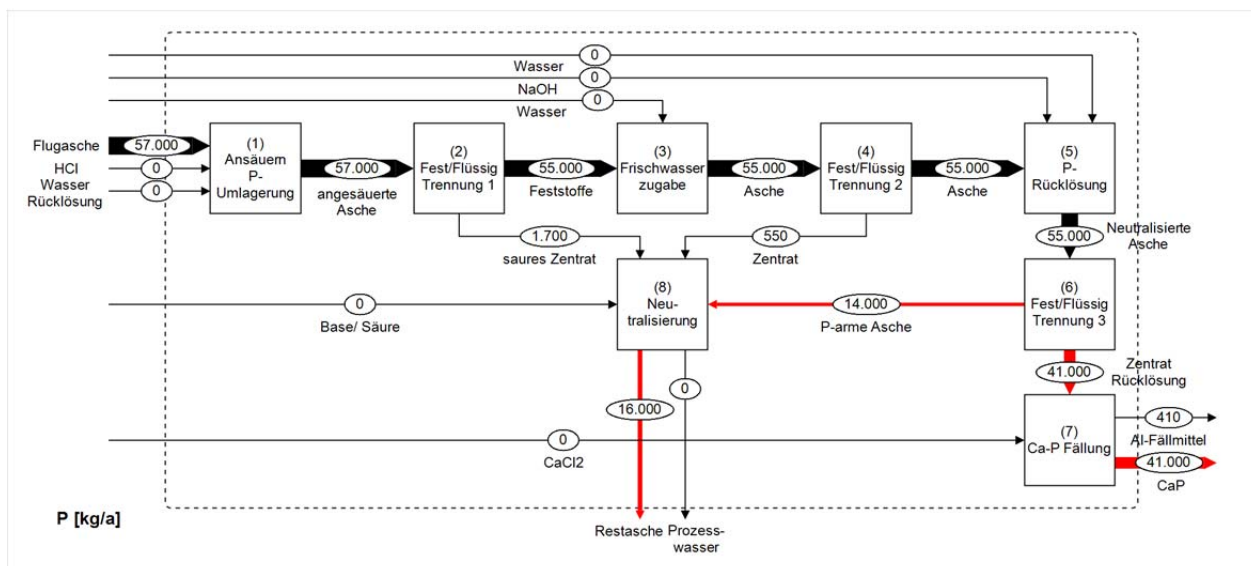


Abbildung 8: Ergebnis SFA Phosphor SESAL-Phos Verfahren (2 signifikante Stellen)

1.3.2.2 Stoffflussanalyse SM

Auf Basis der sehr guten Datengrundlage hinsichtlich der Schwermetallpfade können die Transferkoeffizienten der Prozesse mit geringen Unsicherheiten definiert werden. Damit können auch aussagekräftige Aussagen hinsichtlich der Schwermetallentfrachtung getroffen werden. Für Spurenstoffe Phthalaten und LAS liegen Analysedaten im Endprodukt vor. Die grafischen Darstellungen der MFA finden sich im Anhang.

TK	Rückstand PA2	Laugen-lösung PA3	UL	Org. Phase benutzt PA4	Raffinat PA9	UL	Ca-P PA13	Prozesswasser PA11	UL
As	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	38	62		94	6		99	1	
Cr	5	95		6	94		99	1	
Cu	66	34		87	13		99	1	
Hg	-	-		-	-		-	1	
Ni	94	6		1	99		10	1	
Pb	56	44		93	7		99	1	
Zn	93	7		98	2		99	1	

Tabelle 7: Transferkoeffizienten Schwermetalle SESAL-Phos Prozess

TK	Wässrige Phase Reextraktion PA13	Org. Phase PA5	UL	Flüssige Phase PA7	Feste getrocknete Phase PA8	UL
As	-	-	-	-	-	-
Cd	99	1		0	100	
Cr	95	5		94	6	
Cu	2	98		98	2	
Hg	-	-		-	-	
Ni	95	5		94	6	
Pb	8	92		0	100	
Zn	99	1		92	8	

Tabelle 8: Transferkoeffizienten Schwermetalle Subprozess Reextraktion

1.3.2.3 Entfrachtungsleistung

Auf Basis der Stoffflussanalyse für die Schwermetalle die detaillierten Transferkoeffizienten erstellt werden könnten, wird für den Gesamtprozess die Entfrachtungsleistung dieser Technologie in Bezug auf die eingesetzte Klärschlammasche ermittelt. Für Arsen liegen keine Informationen über das Verhalten während des Prozesses vor. Lediglich aus dem As-Gehalt im Endprodukt und der Ausgangsasche kann das

Verhalten von As abgeleitet werden. Aufgrund des hohen Arsengehaltes im Endprodukt muss von einer geringen Entfrachtungsleistung ausgegangen werden, die in Bezug auf den P-Gehalt der Stoffströme Asche und Endprodukt sogar negativ ausfällt, also eine Anreicherung stattfindet. Bereits in der Verbrennung erfolgt eine vollständige Zerstörung der organischen Spurenstoffe.

TK	Asche [kg/a]	Endprodukt [kg/a]	Rückgewinnung bzw. Entfrachtung [%]	Tatsächliche Entfrachtung [% rel. zu P]
P	57.100	40.700	71	
As	8,0	6,1	23	-7
Cd	2,2	0,01	99	99
Cr	66,3	0,04	99,9	99,9
Cu	380,1	0,99	99,9	99,9
Hg	0,06	0,00	99,9	99,9
Ni	51,0	0,07	99,9	99,9
Pb	85,6	1,03	99	98
Zn	1306,5	5,92	99,9	99,9

Abbildung 9: Entfrachtungsleistung (Asche:Endprodukt)

1.3.2.4 Ergebnisse Güterflussanalyse

Hinsichtlich des Säurebedarfs für die Aschelaugung liegen unterschiedliche Mengenangaben vor. Daraus resultieren Unsicherheiten, die bei der Bewertung der Verfahren auf Basis der Güterflussanalyse vorliegen. Die Ergebnisse einer Literaturstudie zeigen folgenden Säurebedarf in Relation zur Asche.

Literatur	kg HCl/kg Asche	kg H ₂ SO ₄ /kg Asche	Rücklösung P [%]
Pinnekamp et al. (2010)	0,46	-	95
Schaum (2007)	0,45	-	91
Pinnekamp in Petzet (2011)	0,40	-	91
Wiebke (2011)	0,39		
Franz (2008)		0,5	84-99
Takahashi et al. (2001)		0,3	90
Annahme	0,45	0,4	90

Tabelle 9: Säurebedarf zur Aschelaugung

Allerdings fällt der Säurebedarf zur Ansäuerung der Asche auf pH 3 mit 0,15 - 0,22 kg/kg Asche deutlich geringer aus. Für den Ascheanfall aus der Referenzmonoverbrennung von 672 t/a wird im Mittel rund 123.800 kg Salzsäure benötigt. Der Fällmittel wird aus den Angaben von Petzet et al. (2012) mit 0,33 kg/kg Asche übernommen (Tabelle 10) zeigt den ermittelten Ressourcenbedarf für die Referenzkläranlage.

Ressourcen	Reinsubstanz [kg/kg Asche]	Referenzanlage [kg/a]	UL
HCl	0,18	123.700	2
NaOH	0,32	215.000	1,5
CaCl ₂	0,33	224.400	1,5
H ₂ O	12	8.100.000	1

Tabelle 10: Ressourcenaufwand SESAL-Phos Verfahren

Outputflüsse	Literatur [kg/kg Asche]	Referenzanlage [kg/a]
P-arme Asche	1	672
Abwasser	10	6.720.000

Tabelle 11: Outputflüsse SESAL-Phos Verfahren

	Produktspez. [kg P _{rückg.}]	Einwohnerspez. [kg/EW*a]
HCl	3,04	1,2
NaOH	5,28	2,15
CaCl ₂	5,51	2,24
H ₂ O	198,1	80,6

Tabelle 12: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf SESAL-Phos

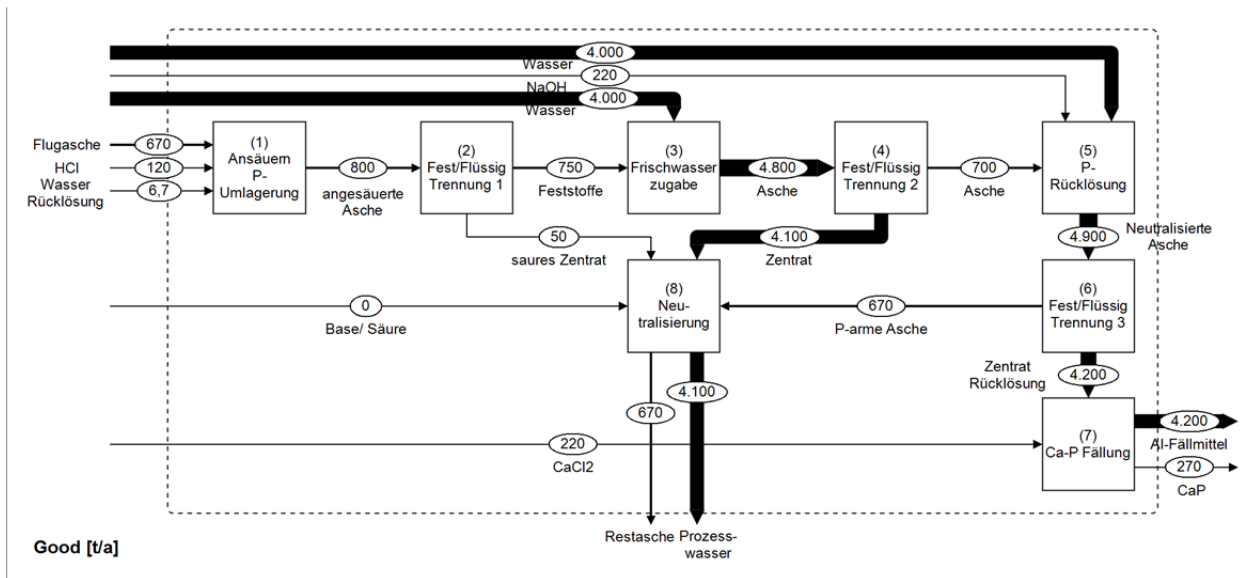


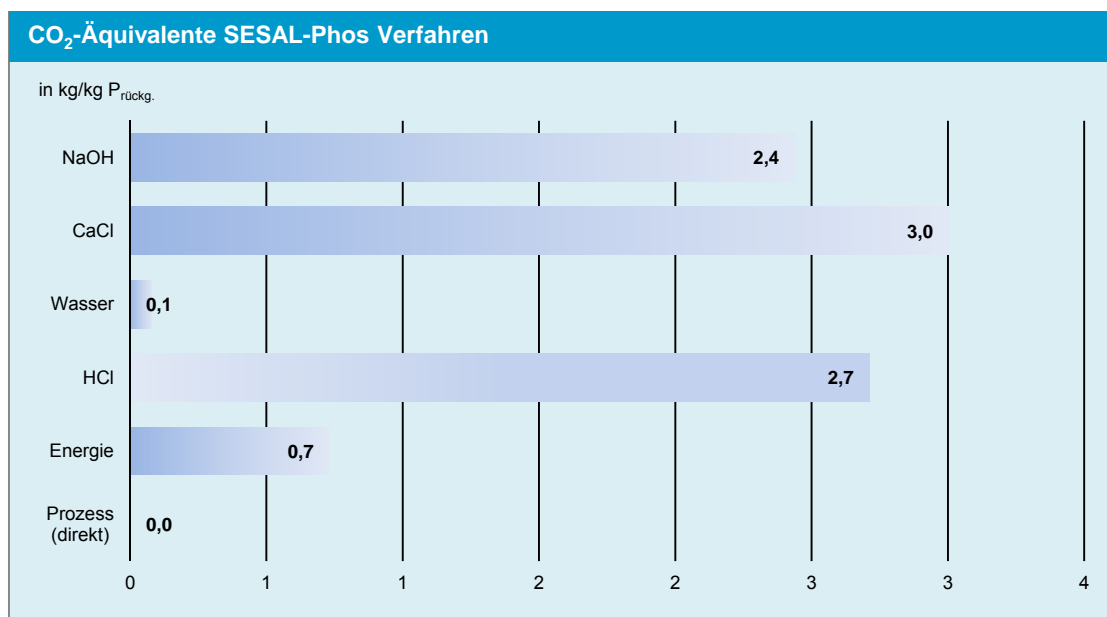
Abbildung 10: Ergebnis Güterflussanalyse SESAL-Phos (2 signifikante Stellen)

1.3.2.5 Ergebnisse Energieflussanalyse

Der Energiebedarf kann mit 200 kWh/t Asche und damit mit rund 134.400 kWh/a angenommen werden.

1.3.2.6 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Der jährliche Ausstoß an CO₂-Äquivalenten bzw. SO₂-Äquivalenten beträgt 449.700 kg bzw. 2.190 kg. Das entspricht rund 10,1 kg CO₂-Äquivalenten/kg P_{rückg.} bzw. 49 g SO₂-Äquivalenten/g P_{rückg.}. Eine detaillierte Aufgliederung der Emissionen bezogen auf 1 kg P_{rückg.} sind aus Abbildung 11 zu entnehmen. Aus dem Prozess sind keine direkten gasförmigen Emissionen zu berücksichtigen. Dominierende Emissionsquelle ist die eingesetzte Salzsäure. Der Einfluss der indirekten Emissionen der Salzsäure wird vor allem bei den SO₂-Äquivalenten deutlich.



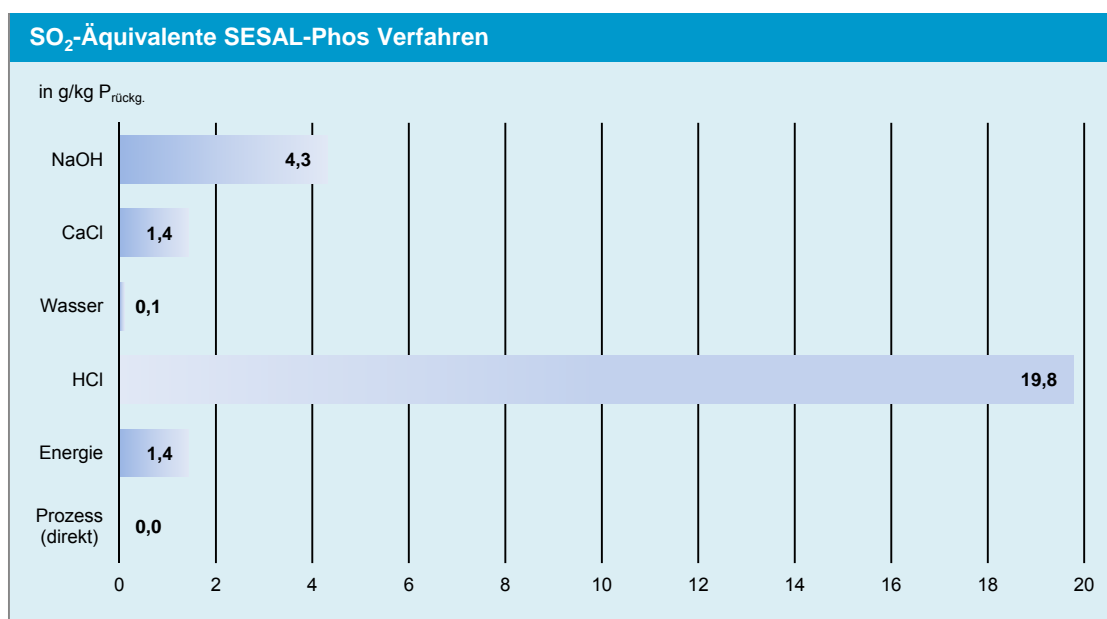


Abbildung 11: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente [kg bzw. g/kg P_{rückg.}] SESAL-Phos

1.3.2.7 Indirekte Schwermetallemissionen SESAL-Phos

Die indirekten Schwermetallemissionen werden analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güterflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt.

Indirekt Emissionen	Atmosphäre [g/a]	Hydrosphäre [mg/a]
As	8,5	205,7
Cd	3,9	8,9
Cr	12,4	0,2
Cu	-	-
Hg	-	11,3
Ni	114,1	-
Pb	37,3	614,8
Zn	-	-
AOX	-	-
PAK	9,1	-
PCDD/F	-	-

Tabelle 13: Indirekte SM-Emissionen SESAL-Phos

1.3.2.8 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der kumulierte Energieaufwand wird analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güter- und Energieflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt.

KEA	[kWh]	[kWh/EW*a]	[kWh/kg P _{rückg.}]
Chemikalien	464.100	4,6	6,3
Elektrische Energie	257.400	12,6	11,3
Gesamt	721.500	17,2	17,7

Tabelle 14: Kumulierter Energieaufwand SESAL-Phos

Abbildung 12 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen.



Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren

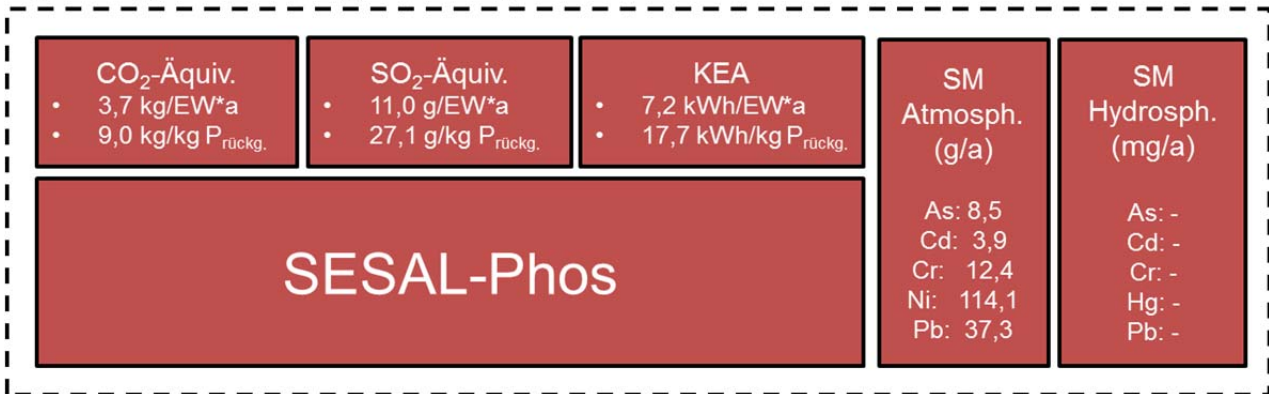


Abbildung 12: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)

1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung SESAL-Phos

Das SESAL-Phos Verfahren hat keinen Einfluss auf die Prozesse der Abwasserreinigung. Aufgrund der anfallenden Abfallstoffe werden nachfolgende Prozesse beeinflusst, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

Faktor	Einfluss auf
Saurer Laugungsrückstände	Ablagerung auf Reststoffdeponie möglich
Prozesswässer	Abwasserreinigung, Kosten
Ressourcenaufwand SESAL-Phos	Indirekte Emissionen, Kosten
Ca-P-Produktion	Kosten (Erlöse), Gutschrift ökologische Bewertung
Al-Recycling	Kosten (Erlöse), Gutschrift ökologische Bewertung

Tabelle 15: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung SESAL-Phos

Berücksichtigung Transport

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€/EW*a]
Klärschlamm – MonoV	4.975	696.493	0,98
Flugasche zu Deponie	672	67.162	0,01
Reststoff zu Deponie	672	26.865	0,04
Bettasche zu Deponie	45	4.477	0,01
Filterkuchen - Untertagedeponie	32	32.049	0,04
Gesamt Transport		827.100	1,17

Tabelle 16: Transportwege SESAL-Phos

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation liegen die CO₂-Emissionen bei einer Implementierung des SESAL-Phos Verfahrens um 265 % höher. Die SO₂-Emissionen hingegen nehmen um rund -22 %. Hauptgrund ist neben der Gutschriften aus der Düngemittelherstellung die Gutschrift dem Al-Recycling (Tabelle 17).

CO ₂ -Äquivalente	[kg]	[CO ₂ -Äquiv./EW*a]
SESAL-Phos	1.344.100	13,4
Referenz	368.500	3,7
Δ	+265 %	
SO ₂ -Äquivalente	[kg]	[SO ₂ -Äquiv./EW*a]
SESAL-Phos	980	0,010
Referenz	1.260	0,013
Δ	-22%	

Tabelle 17: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente Prozesskette SESAL-Phos

1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA	[kWh/a]
SESAL-Phos	2.026.000
Referenz	1.131.700
Δ	+ 79 %

Tabelle 18: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette SESAL-Phos

Systemgrenze gesamte Prozesskette

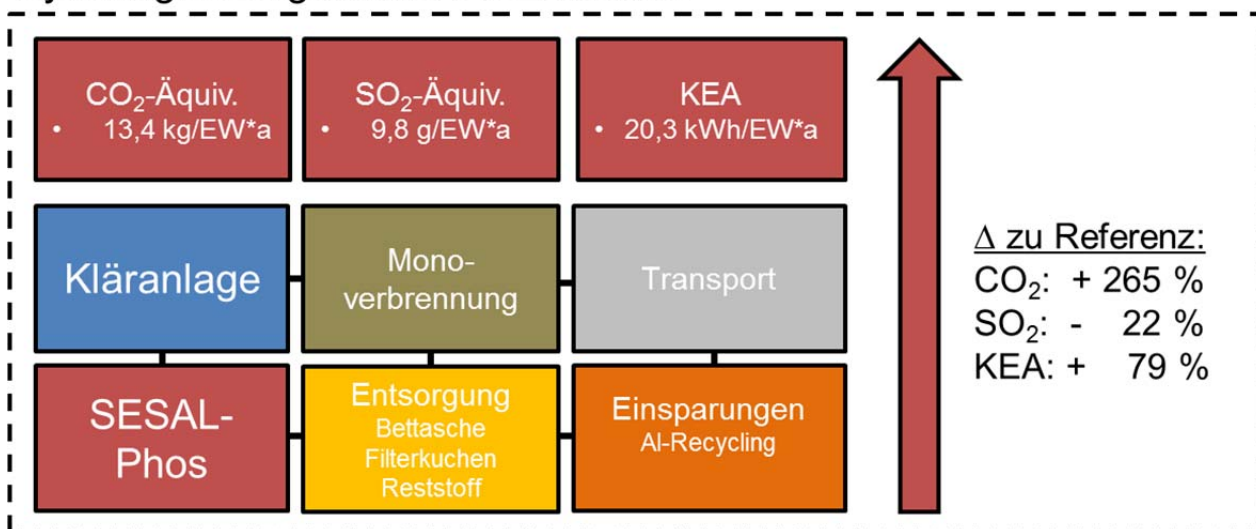


Abbildung 13: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation

1.3.3.3 Ergebnisse Stoffflussanalyse Schwermetalle und organische Spurenstoffe

Auf Basis der Stoffflussanalysen können die Pfade von P und den ausgewählten Schwermetallen zu den Zielprozessen nachvollzogen werden (Abbildung 14). Im Vergleich zur Referenzsituation sind keine erhöhten Schwermetallfrachten in die Atmosphäre oder Hydrosphäre zu erwarten. Im Falle einer Ausbringung des Endproduktes nimmt die P- und Schwermetallfracht in die Landwirtschaft im Ausmaß der rückgewonnen P-Fracht bzw. der SM-Fracht im Endprodukt zu. Durch die SM-Entfrachtung im SESAL-Phos Prozess gelangt in Relation zum Phosphor eine geringe Fracht auf die landwirtschaftliche Fläche. Die Schwermetalle finden sich in den Reextraktionsrückständen, die kontrolliert auf Deponien abgelagert werden (Zielpfad Deponie). Organische Spurenstoffe sind im Endprodukt nicht nachweisbar, womit auch keine Spurenstoffe über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

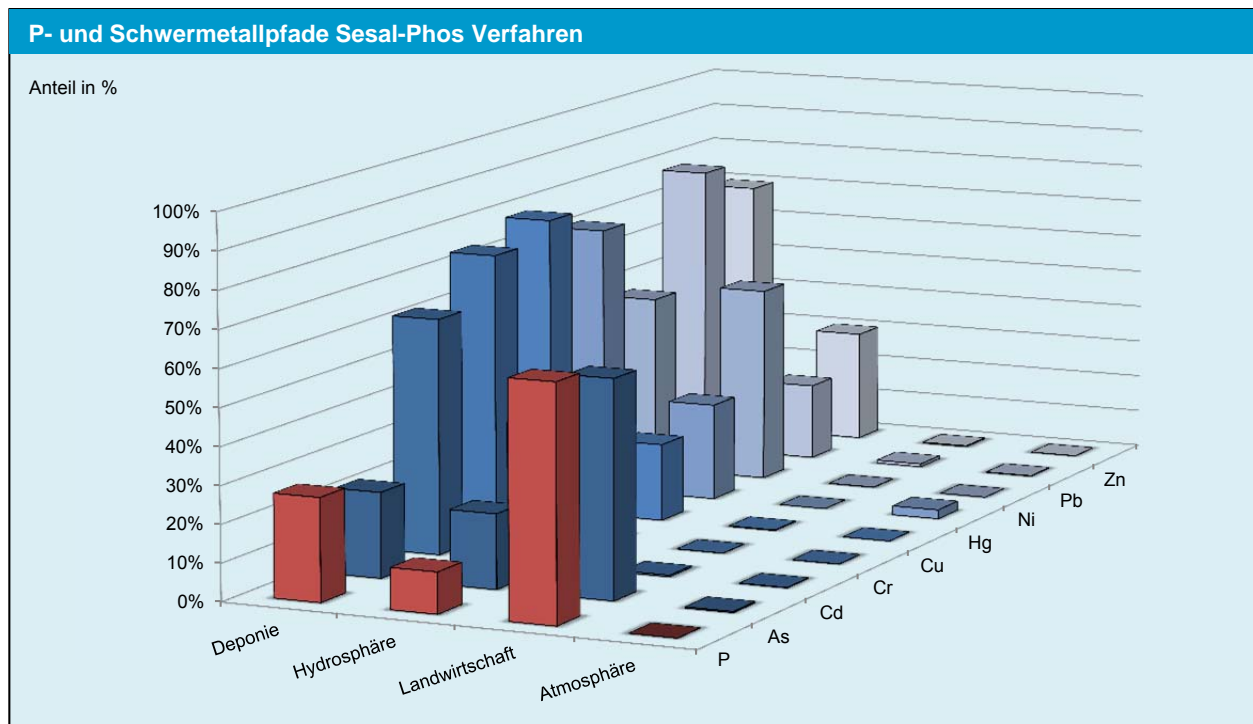


Abbildung 14: P- und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (SESAL-Phos)

1.3.3.4 Ergebnis Endprodukt

Endprodukt ist ein Ca(Al)-P, welches in Abhängigkeit des pH-Wertes bei der Fällung und dem eingesetzten Fällmittel unterschiedliche Phosphor- und Schwermetallkonzentrationen aufweisen kann. Generell liegen die Schwermetallgehalten allesamt deutlich unter den Anforderungen der Düngemittelverordnung. Bezogen auf den Hauptnährstoff Phosphor liegen die Schwermetallkonzentrationen bis auf As teils deutlich unter jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP). Abbildung 15 zeigt den Mittelwert aus der Analyse mehrerer Produkte. Wie bereits in Tabelle 2 dargestellt, sind auch deutliche niedrigere Schwermetallgehalte möglich. Auffallend sind hohe Al-Gehalte im Endprodukt, die infolge signifikanter Rücklösungen während der Laugung und schlechter Entfernung durch die Extraktionslösung in den Fällprozess gelangen. Al-Gehalte von durchschnittlich 50 g/kg TS sind dadurch möglich. Im Vergleich dazu liegt der P-Gehalt im Mittel bei 150 g/kg TS.

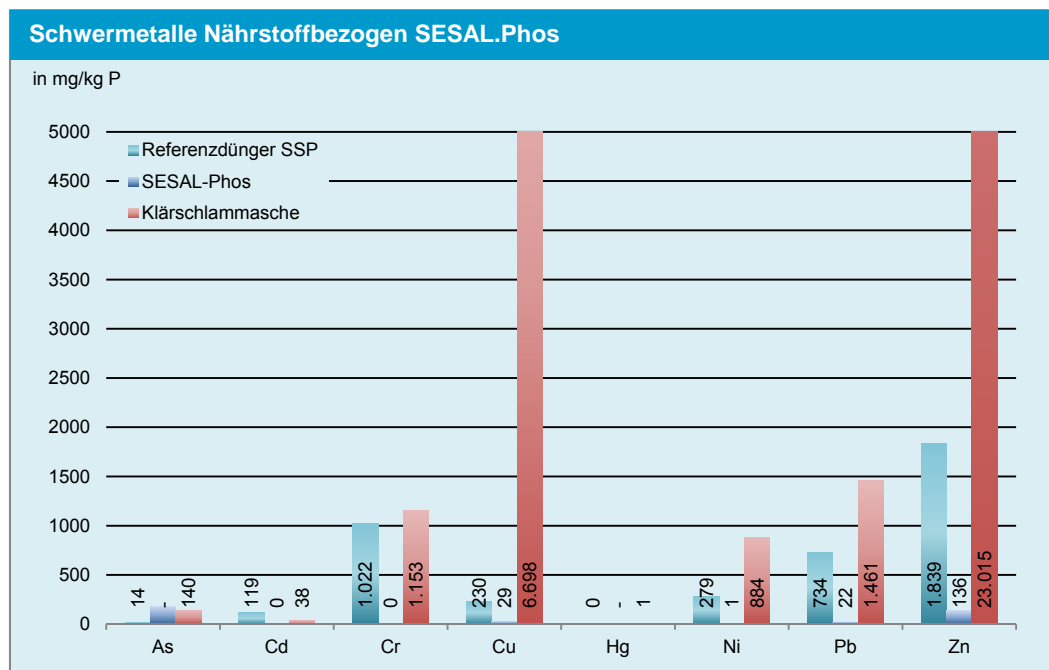


Abbildung 15: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung SESAL-Phos Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)

Bewertung Endprodukt	SESAL-Phos	SSP
Löslichkeit	Gut	Sehr Gut
Düngemittelwirksamkeit	Mäßig/Schlecht	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	391	230
Anorganische Verunreinigungen		
SM:P [mg Cd/kg P]	0,5	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,003	1,26
Referenzbodenmethode [*]	2.850 (As)	1.450 (Cd*)
Faktor Cd zu Referenz	140,5	-
Organische Verunreinigungen		
Keine organische Spurenstoffe	5 ²	5
Keine hygienischen Bedenken	5 ²	5
Handhabung		
Einfache Lagerung möglich	5	5
Direkter Einsatz in LW möglich	3	5

Tabelle 19: Bewertung SESAL-Phos-Endprodukt

Das Cd:P Verhältnis ist mit 0,5 mg Cd/kg P äußerst gering und liegt deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Anhand des Schadeinheitenmodell kann der äußerst geringe Schwermetallgehalt dargestellt werden. Bei der Referenzbodenmethode schneidet das Endprodukt allerdings nicht so gut ab wie die geringen Schwermetallgehalte es erwarten ließen. Grund ist der hohe



Arsengehalt im Endprodukt, der bei der Schadeinheit nicht berücksichtigt wird. Theoretisch kann das SESAL-Phos Endprodukt rund 2.850 mal aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls, Arsen, erreicht wird. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, könnte das SESAL-Phos Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 8,7 häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe werden bei der thermischen Behandlung zerstört. Damit sind auch hygienische Bedenken ausgeschlossen. Endprodukt ist ein amorphes, staubiges, pulverförmiges Endprodukt, das vor einer Ausbringung mit modernem landwirtschaftlichem Gerät aufbereitet werden muss.

1.3.4 Ökonomische Bewertung

1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten SESAL-Phos

Wesentliche Voraussetzung für größenabhängige Kostenkalkulationen ist die Annahme und Festlegung von Up- und Downscalingfaktoren. Auf Basis der vorliegenden Investitionskosten von rund 8,7 Mio. Euro für das SESAL-Phos Verfahren wird eine Beziehung zum jährlichen Aschedurchsatz und den entsprechenden Kosten hergestellt (Nutzungsdauer 15 Jahre). Die Datengrundlage für die Investitionskurve stammt aus der Kostenkalkulation von Everding und Pinnekamp (2011). Die Unsicherheit der Daten liegt bei rund +/-10 %.

Aschedurchsatz [t/a]	Investitionskosten [Mio. €]	Faktor [aus Ash Dec]
5.000	4,6	0,53
10.000	5,5	0,63
20.000	7,3	0,84
30.000	8,7	1,00
50.000	10,8	1,24

Tabelle 20: Investitionskosten SESAL-Phos in Relation zum jährlichen Aschedurchsatz (Investitionskostenfaktor Ash Dec® Verfahren)

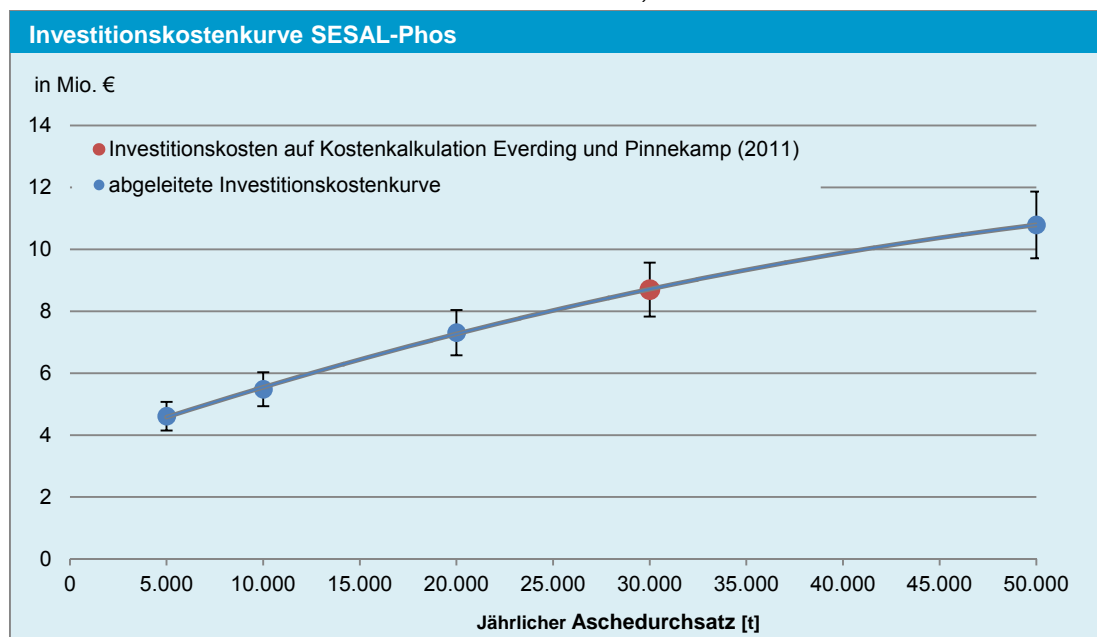


Abbildung 16: Upscaling Faktoren Investitionskosten SESAL-Phos

Abbildung 16 verdeutlicht, dass die Investitionskosten nicht proportional zum jährlichen Aschedurchsatz steigen. Das bedeutet, dass z.B. die Investitionskosten für eine Anlage mit 10.000 t/a bei rund 5,5 Mio. € liegen, während bei einer Anlage mit z.B. dreifachem Durchsatz (30.000 t/a) die Investitionskosten um nur ca. 55 % steigen.

1.3.4.2 Jahreskosten

Für die ökonomische Bewertung von Verfahren aus der Klärschlammasche wird eine Ausbaugröße des Rückgewinnungsverfahrens von 30.000 t/a angenommen. Das entspricht einer Kläranlagenbelastung

Belastung von rund 3.500.000 EW. Die Investitionskosten für das SESAL-Phos Verfahren mit dieser Ausbaupazität liegen bei rund 8,7 Mio. Etwa 80 % der Kosten entfallen auf die Bautechnik mit einer Nutzungsdauer von 30 Jahre. 20 % entfallen auf die Maschinen- bzw. EMSR-Technik (ND 15 Jahre). Aufgrund eines moderaten Wartungsaufwandes werden 3 % der Investitionskosten angesetzt. Der Personalaufwand wird mit 16 MA/a Jahr festgelegt. Die Betriebskosten werden auf Basis der Kenntnisse über den Ressourcenbedarf für eine Tonne Asche aus den Daten der Sachbilanz berechnet. Die Erlöse basieren auf der Annahme, dass der P-Gehalt in der Referenzasche bei 84 g/kg TS und die Rückgewinnungsquote bei 71 % liegt. Für 30.000 t Asche fallen 11.750 t Calciumphosphat mit einem P-Gehalt von rund 1.800 t P an.

Jahreskosten	Menge (t)	Preis/Einheit	€a in TsD
Kapitalkosten			614
Wartung + Reparaturen			260
Salzsäure (100 %)	5.525	260 €/t	3.510
Natronlauge (100 %)	9.600	330 €/t	3.170
CaCl ₂	10.020	200 €/t	2.004
Frischwasser	360.000 m ³	1,5 €/m ³	540
Personal	16 MA	50.000 €/MA	800
Energie	6.000 MWh	0,1 €/kWh	600
Sonstiges	-	-	-
Entsorgung Abwasser	292.500 m ³	2 €/m ³	720
Entsorgung Asche*	30.000	50 €/t	1.500
Betriebskosten			11.255
Gesamt			11.869

Tabelle 21: Jahreskosten SESAL-Phos (30.000 t Asche/a)

Einsparungen/Erlöse	Menge (kg)	Preis/Einheit	€a
Ascheannahme*	30.000	50 €/t	1.500
Endprodukt Ca-P	11.750	391 €/t	4.596
Al-Fällmittel	1.980		2.306
Gesamt			8.402

Tabelle 22: Einsparungen und Erlöse SESAL-Phos (30.000 t Asche/a)

Spezifische Kosten	€
€/kg P _{rückgewonnen}	6,6
€/EW*a	3,2
€/E*a	6,4
Spezifische Kosten (nach Erlösen)	€
€/kg P _{rückgewonnen}	1,9
€/EW*a	1,0
€/E*a	2,0

Tabelle 23: Spezifische Kosten SESAL-Phos (30.000 t Asche/a)

Mit 6,6 €/kg P_{rückg.} liegen die ermittelten produktspezifischen Kosten deutlich unter den in aus der Literatur bekannten Kosten von ~9 €/kg P_{rückg.}. Die ermittelten Jahreskosten von rund 11,9 Mio. liegen im Vergleich zu den Literaturwerten auf ähnlichem Niveau 10,8 Mio. €. Grund für die abweichenden produktspezifischen Kosten sind daher unterschiedliche Annahmen bei der rückgewinnbaren P-Fracht. Diese kann zum einen auf die unterschiedlichen P-Gehalt der Aschen und/oder das angenommene Rückgewinnungspotential erklärt werden.

Bezüglich der anfallenden Restasche, entspricht diese im Vergleich zu den nasschemischen Extraktionsverfahren (PASCH, LEACHPHOS®) jener Aschemenge die in den Prozess geführt wird. Das bedeutet, dass bei Berücksichtigung der Erlöse aus der Ascheannahme, die Entsorgungskosten der anfallenden P-armen Restasche gedeckt sind.



1.3.4.3 Variantenrechnung

Die größenabhängigen Investitionskosten und die daraus abgeleiteten Kapitalkosten sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Allerdings zeigt die Kostenkalkulation, dass der Anteil der Kapitalkosten an den Jahreskosten gerade einmal bei 6 % liegt. Das heißt zum einen, dass auch etwaige Unsicherheiten bei der Annahme der Investitionskosten im Rahmen der Gesamtkostenrechnung nur unwesentlich ins Gewicht fallen und der Ausbau der Rückgewinnungsanlage nur geringen Einfluss auf die Jahreskosten hat. Vielmehr hat der P-Gehalt in der Asche Einfluss auf die Kosten. Aufgrund dessen, wird die Kostenentwicklung auf Basis unterschiedlicher P-Gehalte ermittelt (Abbildung 17).

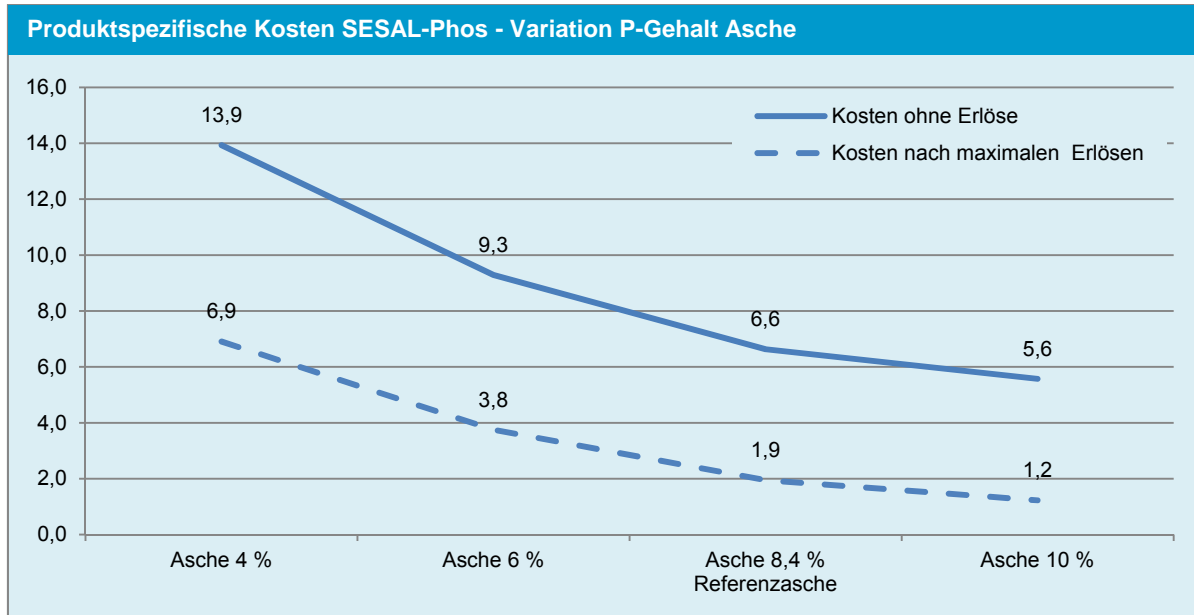


Abbildung 17: Produktspezifische Kosten abhängig vom P-Gehalt der Asche

Die Variantenrechnung in Abbildung 18 zeigt die Kosten in Abhängigkeit des P-Gehaltes in der Asche bei gleichbleibendem Aschedurchsatz von 30.000 t/a und gleichbleibender Rückgewinnungsquote. Die Punktgröße stellt die rückgewinnbare P-Menge dar. 1 stellt die maximale P-Rückgewinnung von 2.530 t P unter der Annahme der Referenzasche mit einem P-Gehalt von 8,4 % und einer 100 %igen Rückgewinnungsquote dar. Die schraffiert ausgefüllten Punkte stellen die Kosten ohne Erlöse dar. Die Kosten für die Chemikalien werden als konstant angenommen, da der P-Gehalt der Asche keinen Einfluss auf den Chemikalieneinsatz hat. Je höher der P-Gehalt in der Asche, desto höher ist auch das Rückgewinnungspotential und in Relation dazu sinken die produktspezifischen Kosten. Die einwohnerspezifischen Kosten bleiben konstant. Unter Berücksichtigung der Erlöse, die direkt proportional zum P-Gehalt in der Asche zunehmen, ist z.B. im Fall einer sehr P-reichen Asche (10 %) ein wirtschaftlicher Betrieb möglich. Diese Abbildung verdeutlicht aber auch, dass im Falle einer Asche mit geringem P-Gehalt, der Betrieb eines solchen Verfahrens trotz möglicher Einsparungen teuer sein kann.

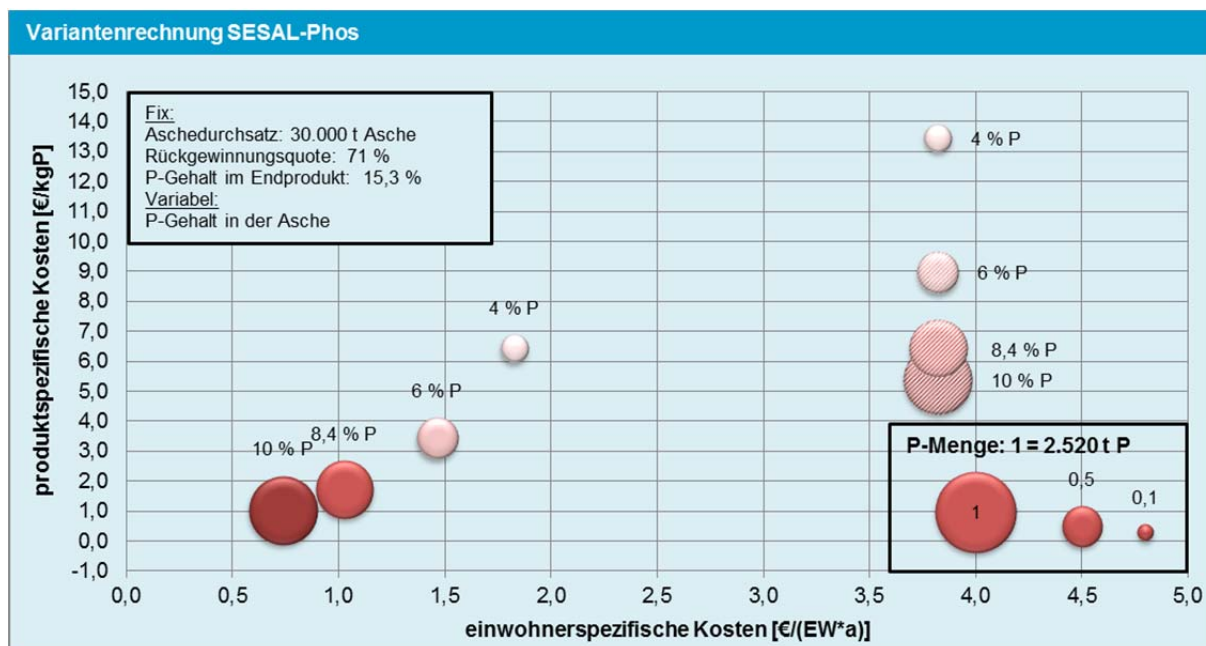


Abbildung 18: Variantenrechnung SESAL-Phos

1.3.4.4 Kostenaufgliederung

Die Kostenaufgliederung verdeutlicht, dass das SESAL-Phos Verfahren ein sehr ressourcenintensives Verfahren ist. In Relation zu den Jahreskosten, entfallen nur 6 % auf die Kapitalkosten. Rund 40% der Betriebskosten entfällt auf den Chemikalienbedarf für Salzsäure und Natronlauge. Außerdem entfällt knapp $\frac{1}{4}$ der Kosten auf die Entsorgung der P-armen Asche und die Behandlung der anfallenden Prozesswässer, wobei der Großteil für die Entsorgung der Asche vorgesehen ist.

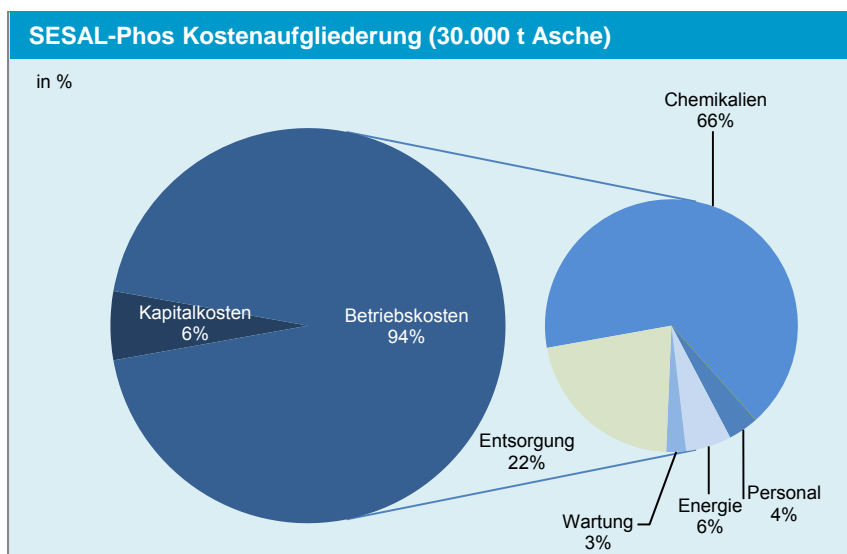


Abbildung 19: Kostenaufgliederung SESAL-Phos (30.000 t Asche/a)

1.3.4.5 Amortisation

Eine Amortisation ist aufgrund der hohen Kosten nicht möglich. Auch unter der Berücksichtigung aller Einsparungen und Erlöse können die Betriebskosten nicht gedeckt werden.

1.3.4.6 Kosten gesamte Prozesskette

Mit einem Mehrkostenaufwand von 2,1 €/EW*a bzw. +19 % bezogen auf die Referenzsituation (11,1 €/EW*a) kann rund 60 % des abwasserbürtigen Phosphors auf einer Kläranlage rückgewonnen werden. Dies gilt jedoch nur für den günstigen Fall mit einem hohen P-Gehalt in der Asche von 8,4 %. Ohne z.B. mögliche Erlöse aus der Ascheannahme liegen die Kosten bereits um 23 % über den Kosten der



Referenzsituation. Nur mit den Erlösen aus dem Verkauf des Endproduktes (monetärer Wert) liegen die Kosten um 3,2 €/EW*a oder 29 % höher als die Kosten der Referenzsituation.

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	30.000 t
Kläranlage	
Abwasserreinigung	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50
Kosten Kläranlage	6,00
Monoverbrennung	5,22
Transport Bettasche und Filterkuchen	0,05
Entsorgung Bettasche und Filterkuchen	0,05
Rückgewinnungsverfahren	2,58
Entsorgung Restasche SESAL-Phos	0,43
Abwasserentsorgung	0,21
Transport	
Schlamm zu Verbrennung	0,98
Asche zu Rückgewinnung	0,04
Bettasche zu Deponie	0,01
Filterkuchen zu Untertagedeponie	0,04
Reststoffasche Deponie	0,09
Summe Kosten	15,60
Einsparungen und Erlöse	
Ascheannahme	0,43
Verkauf Endprodukt	1,31
Rückgewinnung Al-Fällmittel	0,66
Summe Einsparungen und Erlöse	2,40
Gesamtkosten	13,25
Δ zu Referenz	+19% (23%)*

*ohne Ascheannahme

Tabelle 24: Jahreskosten gesamte Prozesskette SESAL-Phos

Kläranlage	MonoV	SESAL-Phos	Entsorgung Abwasser Asche, Filterkuchen	Transport	Einsparungen Ascheannahme, Verkauf CaP Al-Recycling
6,0 €	5,2 €	2,6 €	0,7 €	1,2 €	2,4 €
Gesamt: 13,3 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: + 2,1 €/EW*a; Δ %: + 19 % (23%)					

Abbildung 20: Kosten gesamte Prozesskette SESAL-Phos Verfahren 30.000 t

1.3.4.7 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 21 zeigt, dass selbst moderate Preissteigerungen der Chemikalien (+20 %) bzw. eine Steigerung des Preises für Säuren um 30 % moderate Kostensteigerungen zur Folge hat. Wie bereits aufgezeigt, hat vor allem der anfängliche P-Gehalt in der Asche und damit die rückgewinnbare P-Fracht maßgeblichen Einfluss auf die Kosten. Dies wird bei den Szenarien 4 und 5 deutlich, in welchen von einem P-Gehalt in der Asche von 75 – 50 % der Referenzasche ausgegangen wird. Die produktspezifischen Kosten nehmen um 40 bzw. 110 % zu, während die einwohnerspezifischen Kosten konstant bleiben.

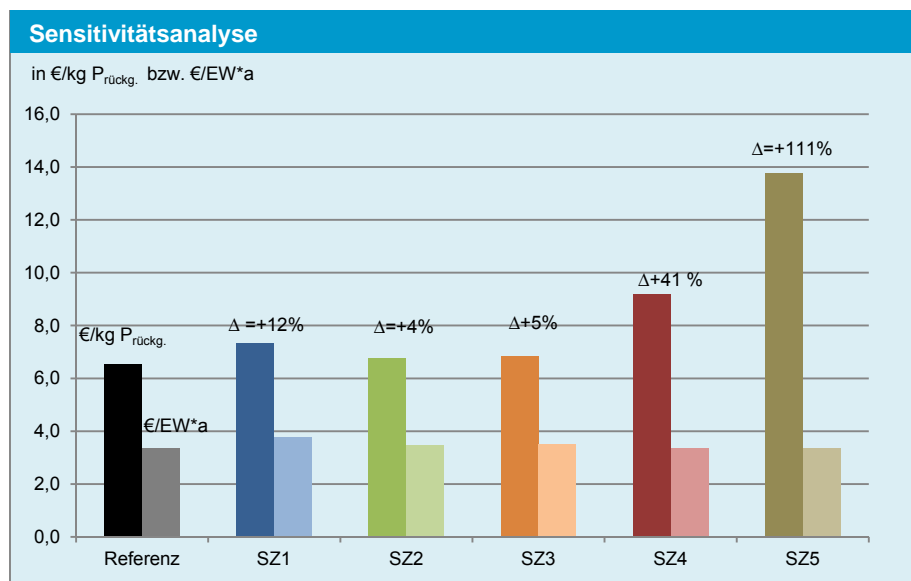


Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse SESAL-Phos

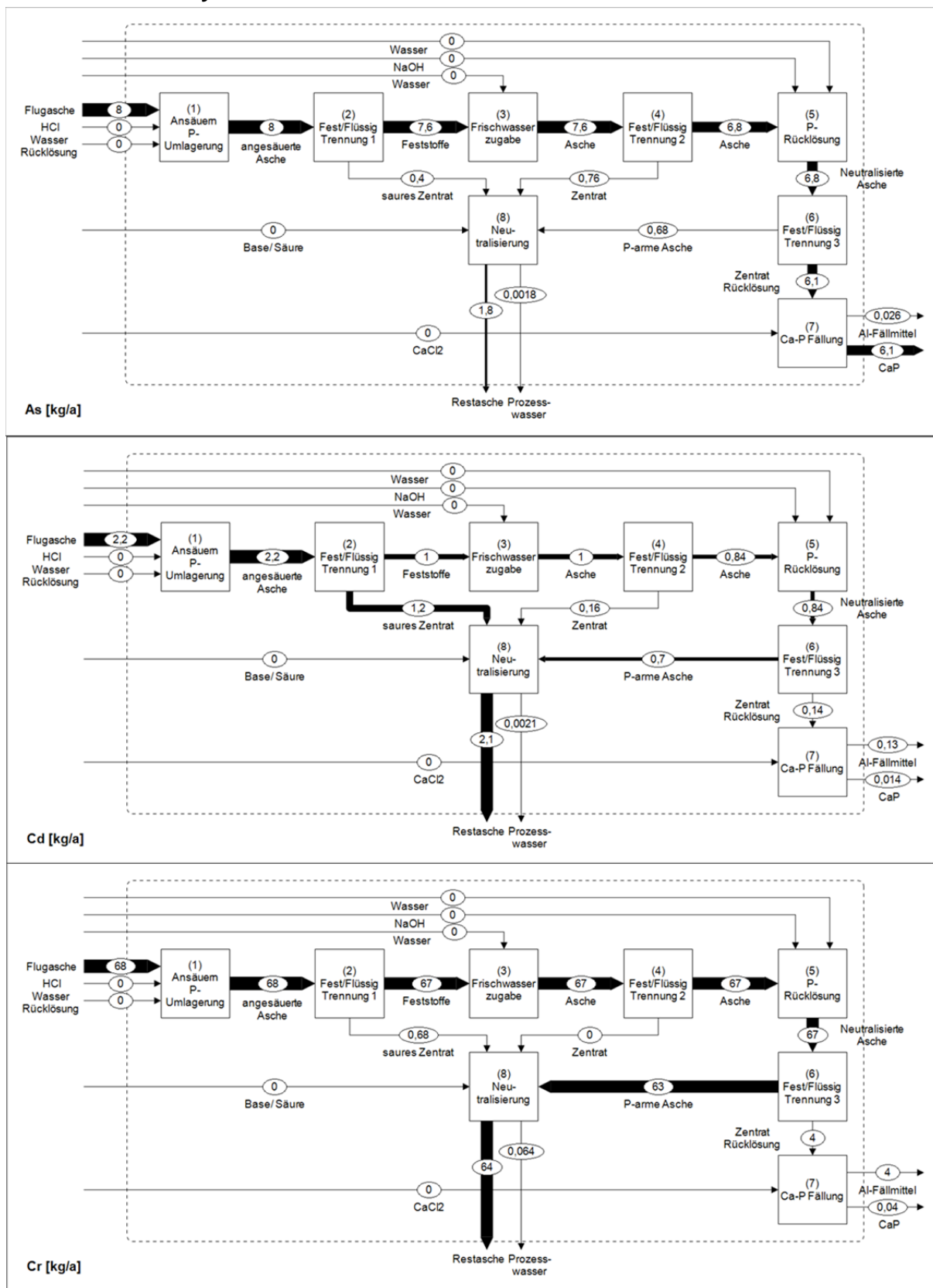
1.3.5 Literatur

- Petzet, S., Cornel, P. (2011) Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes ProPhos: „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“, Teilprojekt B Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammaschen. Institut IWAR, Technische Universität Darmstadt.
- Petzet, S., Peplinski, B., Bodkhe, S.Y. Cornel, P. (2011) Recovery of phosphorus and aluminium from sewage sludge ash by a new wet chemical elution process (SESAL-Phos-recovery process). Water Science and Technology Vol. 64 (3), pp. 693-699.
- Petzet, S., Peplinski, B., Cornel, P. (2012) On wet chemical phosphorus recovery from sewage sludge ash by acidic or alkaline leaching and an optimized combination in both. Water Research 46 (12), pp. 3769-3780.

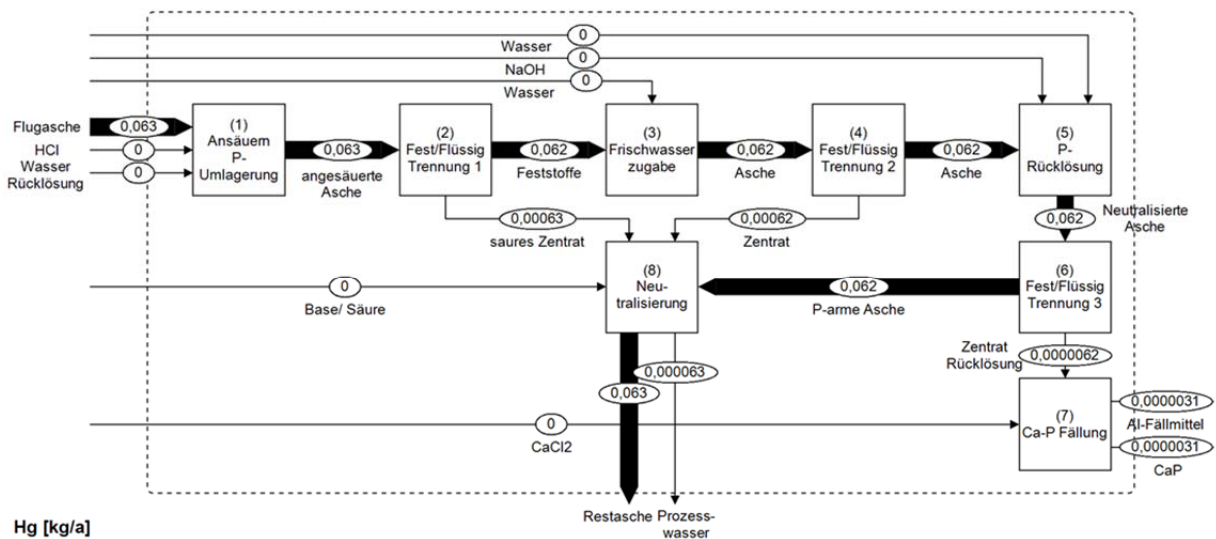


1.4 Anhang

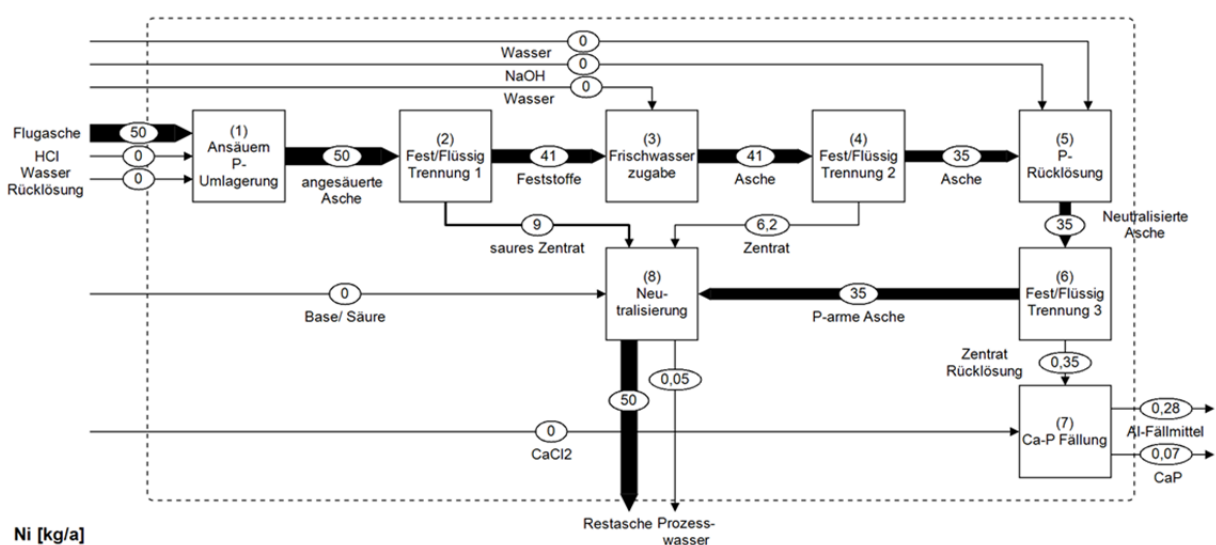
1.4.1 Stoffflussanalyse SESAL-Phos Prozess



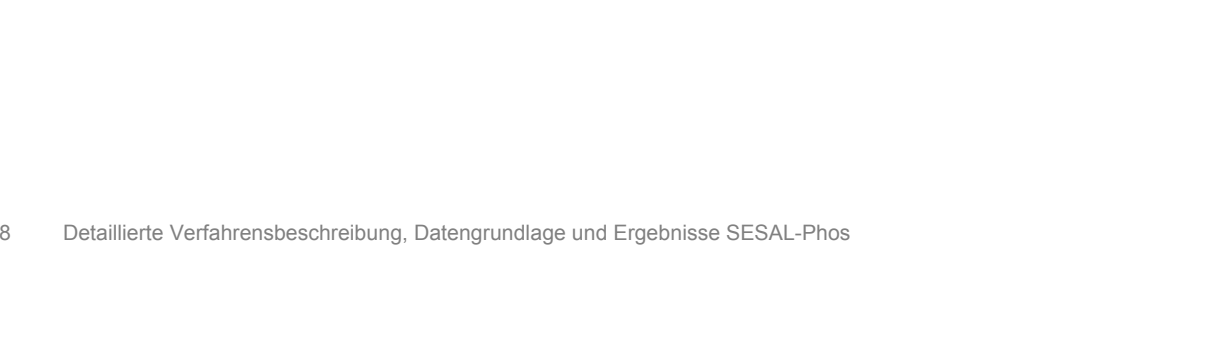
Cu [kg/a]

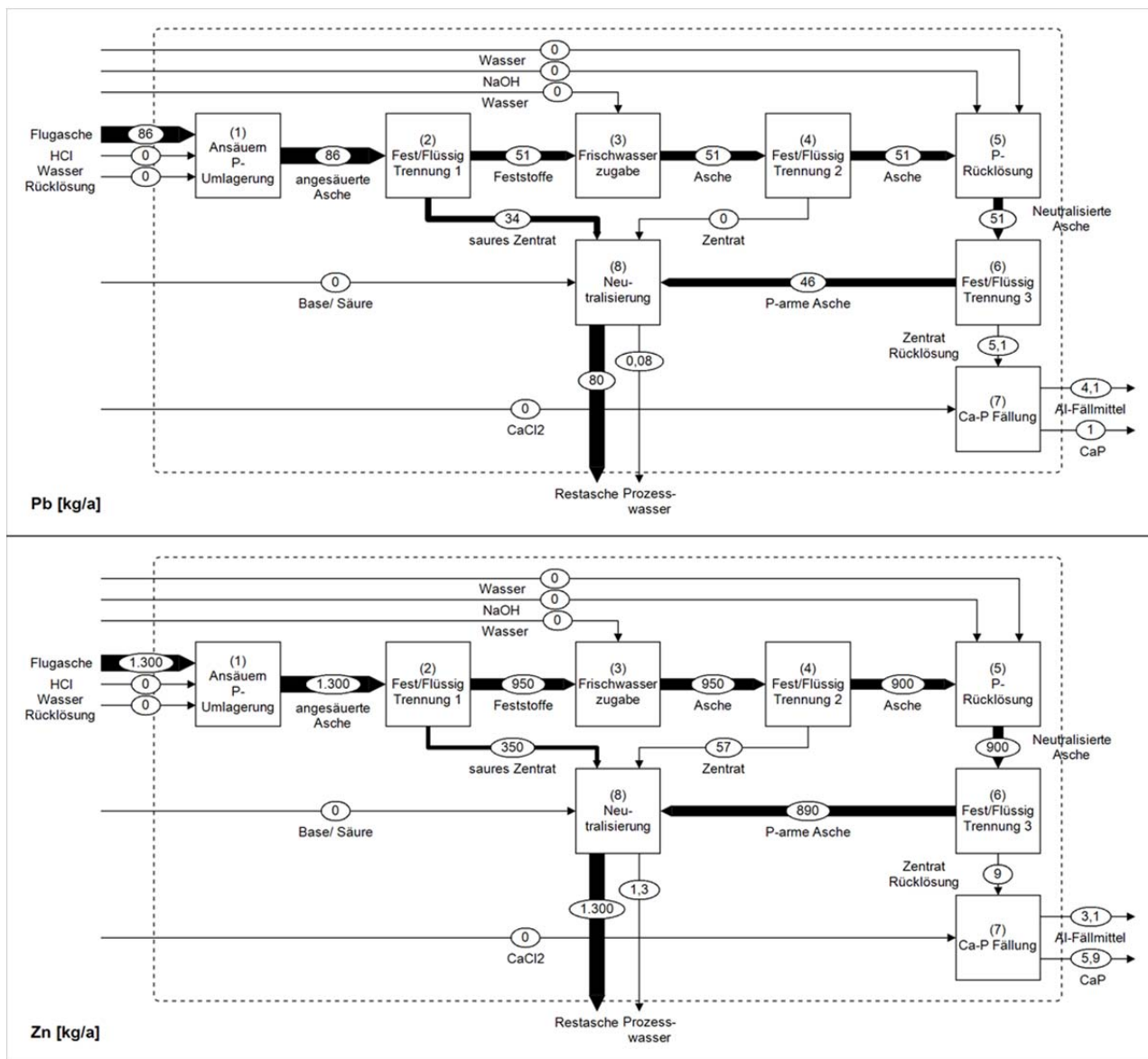


Hg [kg/a]



Ni [kg/a]





1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess SESAL-Phos

