

# Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

## P-RoC





# Inhaltsverzeichnis

P-RoC .....	5
1.1 Grundlagen allgemein .....	5
1.1.1 Prozessskizze P-RoC Verfahren .....	5
1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell .....	5
1.1.3 Verfahrensbeschreibung .....	6
1.1.4 Betriebsparameter P-RoC Reaktor .....	7
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 auf Kläranlage .....	11
1.2.6 Ökonomische Grundlagen .....	11
1.3 Ergebnis P-RoC Verfahren .....	12
1.3.1 Technologiebewertung .....	12
1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren) .....	12
1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung P-RoC .....	19
1.3.4 Ökonomische Bewertung .....	24
1.3.5 Literatur .....	29
1.4 Anhang .....	30
1.4.1 Stoffflussanalyse P-RoC .....	30
1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess .....	32

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessskizze P-RoC Verfahren inkl. Solare Trocknung .....	5
Abbildung 2: STAN Modell P-RoC inkl. Endprodukt Trocknung .....	5
Abbildung 3: STAN Modell P-RoC gesamte Prozesskette .....	6
Abbildung 4: Einfluss CSH Zugabe auf pH-Wert .....	6
Abbildung 5: Mechanismus CaP-Kristallisation an CSH .....	7
Abbildung 6: FIX-PHOS Verfahren .....	7
Abbildung 7: P-Entfernungsraten in Abhängigkeit der Reaktionszeit .....	9
Abbildung 8: Endprodukt P-RoC, beladenes CSH .....	10
Abbildung 9: Pilotanlage P-RoC Kläranlage Neuburg .....	11
Abbildung 10: P-Stoffflussanalyse P-RoC (2 signifikante Stellen) .....	12
Abbildung 11: Veränderte TK Eindicker/Entwässerung und Effekt auf Schlammbehandlung (3 signifikante Stellen) .....	13
Abbildung 12: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette (2 signifikante Stellen) .....	14
Abbildung 13: Entfrachtungsleistung Schwermetalle P-RoC Reaktor (Endprodukt: Zulauf) .....	14
Abbildung 14: Entfrachtungsleistung org. Spurenstoffe P-RoC Verfahren ® (Endprodukt: Klärschlamm) .....	15
Abbildung 15: Ergebnis Güterflussanalyse P-RoC .....	15

Abbildung 16: CO <sub>2</sub> bzw. SO <sub>2</sub> -Äquivalente [kg bzw. g/kg P <sub>rückg.</sub> ] P-RoC .....	16
Abbildung 17: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren) mit Klinker (oben) ohne Klinker (unten).....	18
Abbildung 18: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation zur Referenzsituation für P-RoC mit (oben) und ohne Klinker (unten) .....	20
Abbildung 19: P- und SM-Pfade gesamte Prozesskette .....	21
Abbildung 20: Nährstoffbezogene Schwermetallgehalte P-RoC Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP) .....	22
Abbildung 21: Upscaling Faktoren Investitionskosten P-RoC.....	24
Abbildung 22: Produktspezifische Kosten P-RoC; Variation Rücklösung und Anlagengröße .....	25
Abbildung 23: Einwohnerspezifische Kosten P-RoC; Variation Rücklösung und Anlagengröße .....	26
Abbildung 24: Kostenaufgliederung P-RoC 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts).....	26
Abbildung 25: Kosten gesamte Prozesskette P-RoC 100.000 EW Anlage .....	27
Abbildung 26: Kosten gesamte Prozesskette P-RoC 500.000 EW Anlage .....	28
Abbildung 27: Sensitivitätsanalyse P-RoC .....	28

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter P-RoC Verfahren .....	8
Tabelle 2: Eigenschaften CSH .....	8
Tabelle 3: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe P-RoC Endprodukt.....	9
Tabelle 4: Löslichkeit in % bezogen auf Pges (P-RoC) .....	10
Tabelle 5: Umsetzungen P-RoC Verfahren.....	10
Tabelle 6: Flächenbedarf P-RoC Verfahren .....	11
Tabelle 7: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential P-RoC .....	12
Tabelle 8: Einsparungen Abwasserreinigung.....	13
Tabelle 9: Ressourcenbedarf P-RoC .....	15
Tabelle 10: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf P-RoC .....	15
Tabelle 11: Spezifischer Energiebedarf P-RoC.....	15
Tabelle 12: Indirekte SM-Emissionen P-RoC.....	17
Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand P-RoC mit Klinker .....	17
Tabelle 14: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung P-RoC.....	19
Tabelle 15: Transportwege P-RoC.....	19
Tabelle 16: CO <sub>2</sub> bzw. SO <sub>2</sub> -Äquivalente Prozesskette P-RoC .....	19
Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette .....	20
Tabelle 18: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation...	21
Tabelle 19: Direkte Emissionen P-RoC Prozesskette, Vergleich Referenz .....	22
Tabelle 20: Bewertung CSH Endprodukt .....	23
Tabelle 21: Jahreskosten P-RoC (Referenzkläranlage 100.000 EW).....	24
Tabelle 22: Einsparungen und Erlöse P-RoC (Referenzkläranlage 100.000 EW).....	25
Tabelle 23: Spezifische Kosten P-RoC (100.000 EW).....	25
Tabelle 24: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße.....	26
Tabelle 25: Jahreskosten gesamte Prozesskette P-RoC.....	27



# P-RoC

## 1.1 Grundlagen allgemein

Das P-RoC-Verfahren (**Phosphorus Recovery from waste and process water by Crystallisation**) wurde am Kompetenzzentrum für Materialfeuchte am Karlsruher Institut für Technologie zur P-Rückgewinnung aus Ab- und Prozesswässern entwickelt (BMLFUW, 2004; Berg, 2005, Berg et al., 2006; Berg et al., 2007a; Berg et al., 2007b; Ehbrecht et al., 2008, Ehbrecht et al., 2011; Petzet et al., 2011; Wiebke, 2011; Schneider, 2012). Die Entwicklung dieses Verfahrens ist Teil der Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ der Bundesrepublik Deutschland. Im Mai 2011 wurde eine Pilotanlage auf einer Kläranlage in Neuburg (67.000 EW, Bundesland Bayern) erreicht. In diesem Fall wurde das P-RoC Verfahren auf die Rückgewinnung aus dem Bio-P Seitenstrom (Phostrip) konzipiert. Generell liegt der Schwerpunkt der Anwendung aufgrund der höheren P-Konzentration im Nebenstrom. Bei diesem Verfahren wachsen Ca-Phosphatverbindungen auf der Oberfläche von z.B. Calcium-Silikat-Hydraten. Im Abwasser liegen Ca-Phosphate stark übersättigt vor, eine Fällung bleibt ohne Kristallisationskeim aber aus. Die Verfahrensschritte sind die Vorreinigung des Bio-P Seitenstrom (Phostrip) oder Prozesswässern, Kristallisation im Kristallisationsreaktor, Absetzen des kristallisierten Phosphors und die solare Trocknung des Endproduktes. Im halbtechnischen Maßstab konnten Rückgewinnungsquoten bezogen auf die Schlammwässer von bis zu 80 % erzielt werden. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf können damit rund 20 % des Phosphors rückgewonnen werden.

### 1.1.1 Prozessskizze P-RoC Verfahren

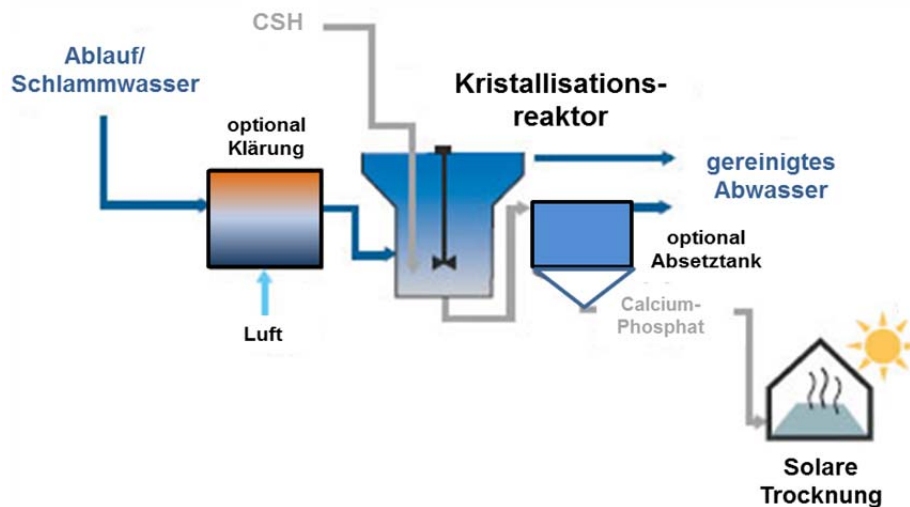


Abbildung 1: Prozessskizze P-RoC Verfahren inkl. Solare Trocknung

### 1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell

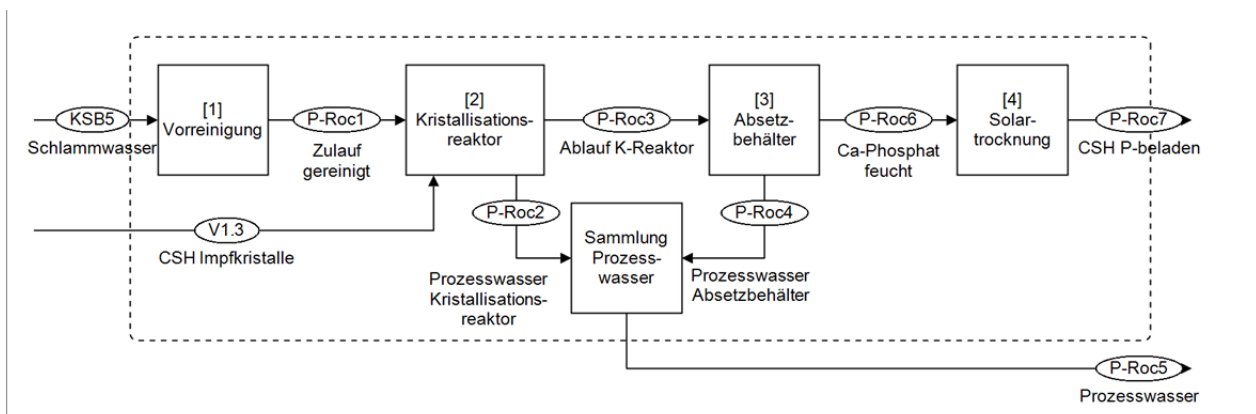


Abbildung 2: STAN Modell P-RoC inkl. Endprodukt Trocknung







stark übersättigt, fallen aber trotz Übersättigung nicht aus sondern kristallisieren an der Oberfläche des Partikels aus. CSH übernehmen somit die Funktion des Kristallisationskeimes.

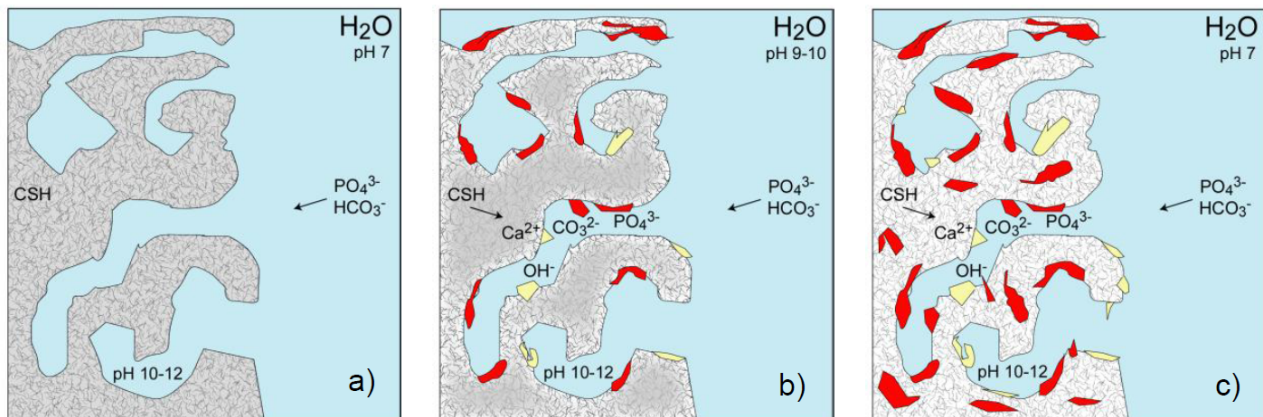


Abbildung 5: Mechanismus CaP-Kristallisation an CSH

Im Labor- und halbtechnischen Maßstab wurden Kristallisationsreaktoren bisher als Schweb- und Rührreaktor ausgeführt und erprobt. Die Versuche zeigen für Rührreaktoren über einen Zeitraum von 600 h P-Eliminierungsraten aus der flüssigen Phase von über 80 %. Die Eliminierungsrate ist stark von der P-Konzentration im Schlammwasser, der Körnung des CSH-Substrats und der Zeit abhängig (Petzet et al., 2011).

Die optimale Betriebsführung ist die diskontinuierliche Beschickung eines Rührreaktors bei einer Aufenthaltszeit des CSH von 1 - 2 Tagen. Die Reaktionszeit mit dem Schlammwasser wird mit ca. 2 h angenommen. Ideal ist ein Fest-Flüssig-Verhältnis von 5 Gew. %. Die Kristalle setzten sich sehr gut ab und das gereinigte Wasser kann abgezogen werden. Optional wird im Anschluss ein eigener Absetzbehälter (3) angeschlossen um den Bindungsprozess im Kristallisationsbehälter nicht zu beeinflussen.

#### Solartrocknung [4]

Im letzten Schritt wird das gewonnene Calciumphosphat energiearm solar getrocknet und das Produkt an die Phosphorindustrie oder die Landwirtschaft verkauft.

Das CSH Material eignet sich zudem für den Einsatz im Rücklaufschlamm, Faulschlamm und im Ablauf einer Kläranlage. Der Einsatz im Überschussschlamm bzw. Faulschlamm ist unter dem Namen FIX-PHOS Verfahren bekannt.

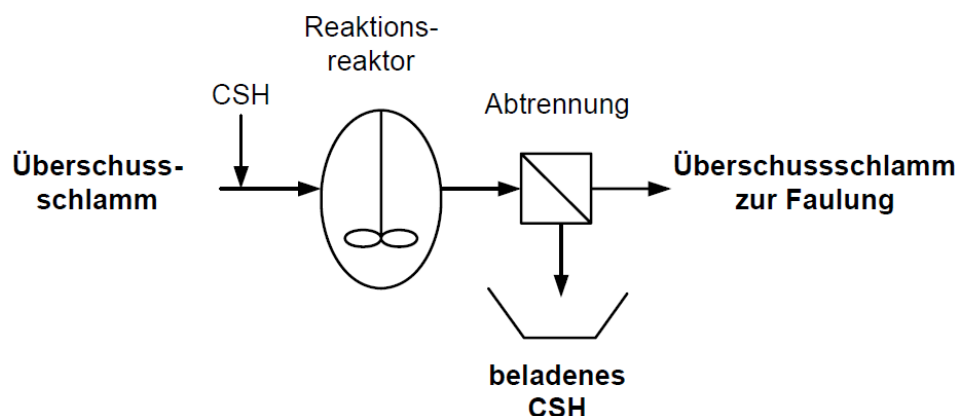


Abbildung 6: FIX-PHOS Verfahren

#### 1.1.4 Betriebsparameter P-RoC Reaktor

Das Prinzip der Kristallisation am CSH Substrat war gegenstand umfangreicher Forschungen im Rahmen des Verbundprojektes ProPhos und eines Forschungsprojektes des österreichischen Lebensministeriums. Aus diesen Publikationen werden zusammenfassend die optimalen Betriebsparameter für eine Phosphorrückgewinnung mit dem P-RoC Verfahren dargestellt (Tabelle 1). Als Reaktor wird ein Rührreaktor

eingesetzt der für eine ständige Turbulenz verantwortlich ist. Zu Beginn steigt der pH Wert auf 9-10, der Zulauf weist einen pH Wert von 7,9 auf. Die Reaktion dauert nun so lange, bis der pH Wert wieder unter 8 fällt. Dann lässt man das CSH 2 h sedimentieren und kann es abziehen. Derzeit ist es noch schwierig vorherzusagen zu treffen, wann das CSH erschöpft ist. Generell gilt, je höher die P-Konzentration und je höher der Durchfluss umso schneller erfolgt auch die Beladung. Wie dieser Prozess genau abläuft ist derzeit noch Gegenstand der Forschung.

Parameter	von	bis
pH	9	10
CSH Gew%	4	6
Aufenthaltszeit (d)	1	2

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter P-RoC Verfahren

Das CSH Material vereint drei grundlegende Voraussetzungen für die Rückgewinnung des gelösten Phosphates aus dem Schlammwasser. Es liefert das zur Kristallisation notwendige Calcium, erhöht den pH Wert auf ideale Kristallisationsbedingungen (9 – 10) und dient als Kristallisationskeim. Der Chemikalienbedarf für Fällmittel oder Basen zur pH-Wert Veränderung entfällt.

Parameter		Schwermetallgehalte CSH	mg/kg TS
Dichte	2,4 - 2,7 g/cm <sup>3</sup>	As	<5
Körnung	0,3 - 6 mm	Cd	<0,3
Mikroporen spez. Auf Oberfläche	20 - 35%	Cr	<1 - 84
pH	10 - 10,4	Cu	<7 - 22
P-Gehalt	200 mg/kg TS	Hg	-
Kosten	200 - 250 €/t	Ni	4 - 37
		Pb	<5
		Zn	9 - 95

Tabelle 2: Eigenschaften CSH

#### Mögliche Betriebsprobleme P-RoC

- Zu hoher Gehalt an organischer Substanz im Reaktor kann die Kristallisation stören. Optional Reinigung des Schlammwassers

## 1.2 Datengrundlage für Bewertung

### 1.2.1 Sachbilanz

- Molares Verhältnis: Ca:P = 2-3:1 (+)
- Basenbedarf: keine Base erforderlich (++)
- Energieaufwand: 50.000 kWh/a (-)

Für die Einstellung des idealen pH-Wertes und für die Kristallisation werden aufgrund der genannten Eigenschaften des CSH keine Chemikalien benötigt (+). Der Energiebedarf ist auf die Pumpen und den Rührreaktor zurückzuführen. kann in den Energiebedarf für den Reaktor und die anschließende MAP Aufbereitung und Trocknung unterteilt werden. Der Energiebedarf wird auf 50.000 kWh/a geschätzt (-)

### 1.2.2 Stoffflussanalyse

#### Transferkoeffizient (TK) Entwässerung

Aufgrund der Rücklöseprozesse während der Faulung werden die Transferkoeffizienten angepasst. Für P wird der TK von 5 auf 20 (+), Schwermetalle und org. Spurenstoffe werden um den Faktor 2 höher rückgelöst (-).

#### TK P-RoC Reaktor

Der Wirkungsgrad der P-Entfernung ist vom der Konzentration an gelöstem PO<sub>4</sub>-P, der Inputmenge des CSH und der Reaktionszeit abhängig. Zu Beginn können durchwegs bis zu 100 % des P gebunden werden. Allerdings nimmt die P-Elimination mit der Reaktionszeit aufgrund der Beladung des CSH ab (++) . Im Mittel können damit rund 80 % des P im Schlammwasser eliminiert werden (++) . Hinsichtlich des Verhaltens von





Schwermetallen während der Kristallisation liegen keine Daten vor. Die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle werden deshalb anhand der Frachten im Schlammwasser der Referenzkläranlage und den Frachten im MAP-Endprodukt aus der Literatur ermittelt (+). Folglich müssen erhöhte Unsicherheit der SM-Transferkoeffizienten im Reaktor angenommen werden.

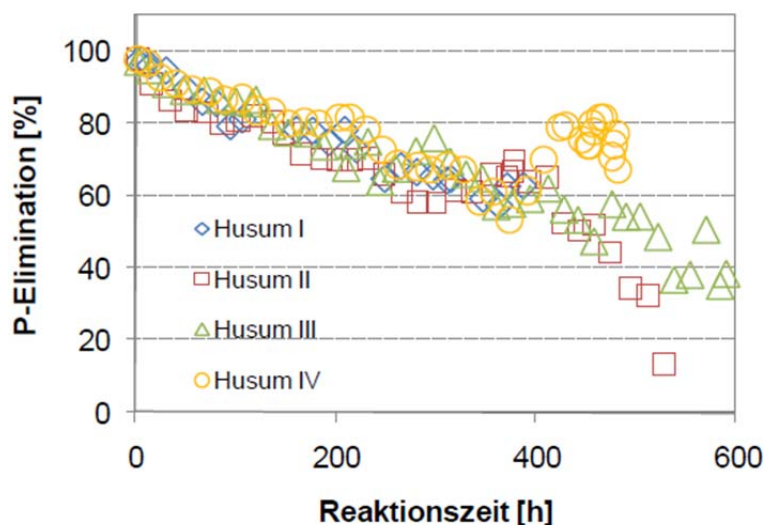


Abbildung 7: P-Entfernungsraten in Abhängigkeit der Reaktionszeit

### 1.2.3 Charakteristik Endprodukt

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

Für die Kristallisation im Reaktor wird CSH zugegeben. Dieses Substrat übernimmt die Funktion des Impfkristalles zur Reaktion des gelösten vorliegenden Phosphates als Calciumphosphat ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ). CSH wird als pelletiertes Substrat zugegeben, womit als Endprodukte runde Pellets anfallen (1 – 2 mm). Der Wassergehalt nach atmosphärischer Trocknung kann als gering eingestuft werden (~5 %). Der Anteil an Silikat im Endprodukt ist mit 28 – 35% aufgrund des Ausgangssubstrates hoch. Das Endprodukt weist somit einen hohen Anteil an nicht unmittelbar rückgewonnenen Nährstoffen auf. Der Phosphorgehalt des Endprodukts liegt im Bereich von rund 9 % bezogen auf den Trockensubstanzgehalt. Untersuchungen verschiedener Endprodukte bestätigen, dass die Schwermetallgehalte sowohl deutlich unter den rechtlich vorgegebenen Grenzwerten als auch deutlich unter den Schwermetallgehalten vergleichbarer Mineraldünger liegen (+). Organische Verunreinigungen sind teilweise aber in äußerst geringen Konzentrationen nachweisbar (+). Aufgrund der Prozessführung sollte das Endprodukt frei von pathogenen Keimen wie E-coli, Coliforme Bakterien und Salmonellen sein (+).

Nährstoffe [g/kg TS]		Schwermetalle [mg/kg TS]		Org. Spurenstoffe [mg/kg TS]	
P	84 – 10,9	As	2,5	AOX	-
N	-	Cd	n.n.-<0,3	PAK	-
Mg	-	Cr	4,7-5,4	PCDD/F	-
Ca	~250	Cu	0,5-5	B(a)P	0,001
K	-	Hg	n.n.	LAS	10
Metalle [mg/kg TS]		Ni	5,2-6,2	NPE	n.n.
Al	-	Pb	2,4	Phthalate	0,02
Fe	-	Zn	21-65		

Tabelle 3: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe P-RoC Endprodukt

### 1.2.3.2 P-Löslichkeit

Die Wasserlöslichkeit ist < 1 %, während die Zitronensäurelöslichkeit bei bis zu 100 % liegt. Mit Ameisen- und Mineralsäureaufschlüssen wird eine vollständige P-Löslichkeit erreicht. Der Anteil des pflanzenverfügbaren Phosphors (Pcal) im Boden nach 18 Monaten entspricht jenem des Triplesuperphosphat. Der Bodentyp hat keinen Einfluss. Topf- bzw. Feldversuche wurden mit diesem Sekundärdünger nicht durchgeführt.

Extraktionsmittel	Löslichkeit [%]
Wasser	<1
Zitronensäure	85-100
Ameisensäure	100
Mineralsäure	95-100
Ammoncitrat	55-70

Tabelle 4: Löslichkeit in % bezogen auf P<sub>ges</sub> (P-RoC)

### 1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Das P-RoC Verfahren liefert ein reines Produkt mit einem hohen P-Gehalt. Möglich ist ein Einsatz sowohl in der P-Industrie als auch in der Landwirtschaft. Nach der Trocknung kann das staubfreie, feinkörnige Endprodukt gelagert und in Big Bags abgepackt werden (++).



Abbildung 8: Endprodukt P-RoC, beladenes CSH

### 1.2.3.4 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus P-RoC Verfahren

Keine

### 1.2.4 Umsetzung

Übersicht im Pilotmaßstab umgesetzter Anlagen:

Umsetzung	
Kläranlage Neuburg an der Donau (D)	Pilotanlage (50.000 EW)
Kläranlage Husum (D)	Pilotanlage
Kläranlage Eberstadt (D)	Pilotanlage (50.000 EW)
Kläranlage Hofkirchen (A)	Pilotanlage (7.000 EW)

Tabelle 5: Umsetzungen P-RoC Verfahren



Abbildung 9: Pilotanlage P-RoC Kläranlage Neuburg

### 1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage

Der Flächenbedarf kann aufgrund fehlender großtechnischer Umsetzung nur mit großen Unsicherheiten abgeschätzt werden. Näherungsweise wird für die Schlammwasseraufbereitung, Reaktor, Absetzbehälter und alle notwendigen Pumpen und die elektrischen Anlagen der Flächenbedarf des PRISA Verfahrens (ohne Eindicker) angenommen (-).

Anlagenteile	Flächenbedarf
Reaktor	100 m <sup>2</sup>
Maschinenhaus	200 m <sup>2</sup>

Tabelle 6: Flächenbedarf P-RoC Verfahren

### 1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Die Investitionskosten für das P-RoC Verfahren (100.000 EW) liegen bei rund 400.000 €. Der Personalaufwand wird mit 0,1 MA/a festgelegt. Betriebsmittel sind in diesem Fall nur das CSH und die Energie, welche sich aus der Massenfluss- und Energieflussanalyse ableiten lassen. Die Erlöse aus einer Tonne beladenem CSH sind nicht bekannt.

## 1.3 Ergebnis P-RoC Verfahren

### 1.3.1 Technologiebewertung

P-RoC ist ein Verfahren welches sich einfach im Nebenstrom von bestehenden Kläranlagen implementieren lässt und eine Rückgewinnung des gelösten Phosphors mit geringem technischem Aufwand aus dem Schlammwasser ermöglicht. Hinsichtlich der Komplexität, kann die Technologie der Kristallisation an CSH in einem Rührreaktor als einfach eingestuft werden. Dieser technologische Ansatz wurde bereits mehrfach im Pilotmaßstab erprobt. Die Prozesse der Abwasserreinigung müssen nicht verändert werden bzw. sind keine Veränderung der weiterführenden Prozesse notwendig. Das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf ist mit 15 - 25 % gering.

P-RoC Verfahren	
Entwicklungsstand	Pilotanlage (vielfach umgesetzt)
Komplexität Technologie	Kristallisation (CaP)
Implementierung	Nebenstrom, Schlammwasser
Wartungsaufwand	gering
Veränderung Schlammbehandlung	keine
Effektivität des Verfahrens	~ 70-80 %
Potential bezogen auf KA-Zulauf	15-25 %
Qualitativer Ressourcenaufwand	CSH, Energie (elektrisch)
Abfallstoffe	keine
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 7: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential P-RoC

Basierend auf dem Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess können erst Auswirkungen, Einsparungen und Erlöse abgeleitet werden.

### 1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

#### 1.3.2.1 Stoffflussanalyse P – Einfluss auf Abwasserreinigungsprozess

Im Vergleich zu konventionellen Schlämmen mit vorangegangener Metallsalzfällung (P-Rücklösung in Faulung: 5 %) wird ca.  $20 \pm 10$  % des vormals biologisch gebundenen Phosphors rückgelöst. Damit ist eine gelöste P-Fracht von rund 14.700 kg/a für die Rückgewinnung verfügbar. Unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 80 % können jährlich 11.800 kg P rückgewonnen werden, womit jährlich rund 143.000 kg des P-RoC Endproduktes anfallen (P-Gehalt = ~10 %). Damit liegt das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf bei rund 18 %. Der Reaktorablauf mit einer P-Fracht von rund 3.000 kg P gelang zurück in den Kläranlagenzulauf. Für verschiedene Szenarien der ökonomischen Bewertung werden unter anderen auch höhere Rücklösungen in der Faulung von 25 % angenommen. Dementsprechend erhöht sich auch die zur Kristallisation verfügbare P-Fracht auf 17.450 kg/a.

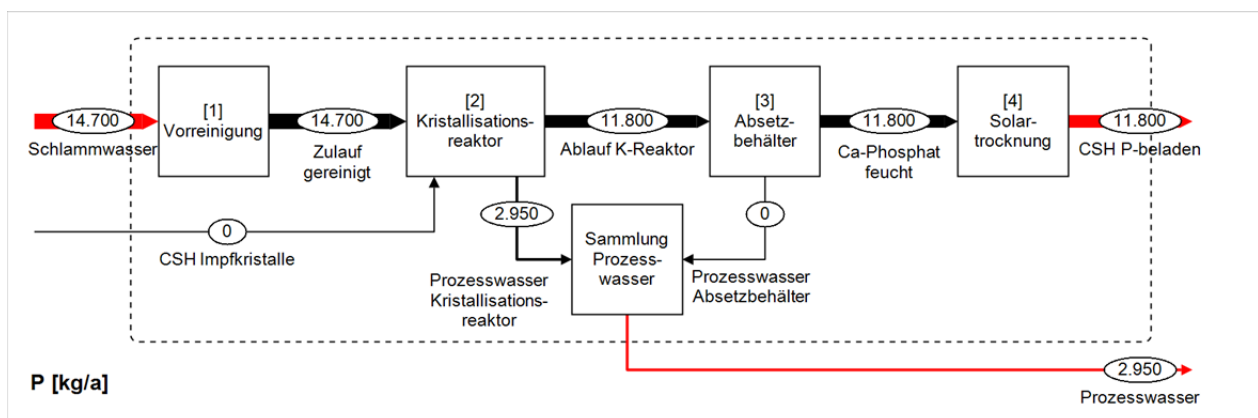


Abbildung 10: P-Stoffflussanalyse P-RoC (2 signifikante Stellen)

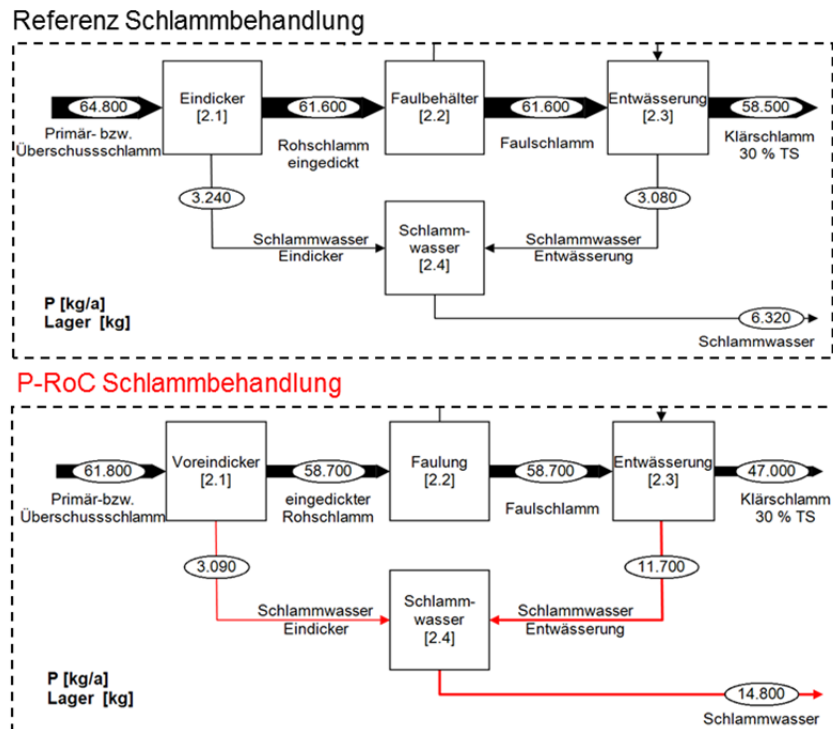


Abbildung 11: Veränderte TK Eindicker/Entwässerung und Effekt auf Schlammbehandlung (3 signifikante Stellen)

### 1.3.2.2 Einsparung P- und N-Rückbelastung und Schlammreduktion

Im Vergleich zur Referenzkläranlage mit einer P-Rückbelastung im Schlammwasser von rund 6.320 kg/ kann diese mit dem P-RoC Verfahren auf rund 3.000 kg P reduziert werden. Die reduzierte P-Rückbelastung wird direkt als Einsparung an benötigten Fällmitteln umgerechnet. Im Falle des P-RoC Verfahrens beträgt die eingesparte Fällmittelmenge im Vergleich zur Referenz 7,7 %. Mit verringertem Fällmitteleinsatz wird auch die anfallende Schlammmenge im Ausmaß von 2,5 kg TS/ kg Eisen reduziert, was einer Schlammreduktion im Vergleich zur Referenzkläranlagen von 1,5 % oder 22,7 t/a entspricht.

	Reduktion [kg/a]	[€/kg Nährstoff] bzw. [€/t KS TS]	Einsparung [€/a]
Phosphor (P)	3.350	-	7.900
Stickstoff (N)	-	-	-
Schlammanfall	22.700	270	6.800
<b>Gesamt</b>			<b>14.700</b>

Tabelle 8: Einsparungen Abwasserreinigung

### Vermeidung Inkrustationen

Durch die gezielte Entfernung des gelösten Phosphors können problematische Inkrustationen in Rohrleitungen und/oder Pumpen verhindert werden. Eine Abschätzung der monetären Einsparungen in Folge reduzierter Wartung sind nur sehr schwer bzw. gar nicht zu erfassen und werden daher nicht berücksichtigt.







	Gehalt [mg/kg TS]	Fracht [kg/a]	Fracht in Klärschlamm [kg/a]	Entfrachtung [%]	Entfrachtung rel zu P. [%]
AOX	-	-	-	-	-
NPE	0	0	65,7	99,9	99,6
LAS	10	1,23	10.950	99,9	99,9
Bisphenol A	0,001	0,0001	2	99,9	99,9

Abbildung 14: Entfrachtungsleistung org. Spurenstoffe P-RoC Verfahren ® (Endprodukt: Klärschlamm)

### 1.3.2.5 Ergebnisse Güterflussanalyse

Die Berechnung der anfallenden CSH Menge erfolgt zum einen auf Basis der rückgewinnbaren P-Fracht von 11.800 kg/a und dem mittleren P-Gehalt des Endproduktes. Durch Abzug der rückgewonnenen P-Fracht wird der tatsächliche CSH Bedarf von 110.300 kg/a bzw. 9,3 kg CSH/kg  $P_{\text{rückg.}}$  ermittelt (Tabelle 9). Die zweite Berechnungsmethode basiert auf der Kostenberechnung von Wiebke (2011). Aus dieser Berechnung geht hervor, dass für die Rückgewinnung von 1 kg P rund 12,9 kg CSH nötig sind, was 151.700 kg/a entspricht. Folglich wird der Mittelwert von 11,1 kg CSH/kg P angenommen, woraus sich ein CSH Bedarf von 131.000 kg/a errechnet. Weitere Chemikalien sind aufgrund der Eigenschaften des CSH zum einen als Kristallisationskeim und zum anderen als pH-Regulator nicht erforderlich

CSH Bedarf	kg/a
Output P	11.800
P-Gehalt	9,6%
Endprodukt	142.800
<b>CSH Bedarf</b>	<b>131.000</b>

Tabelle 9: Ressourcenbedarf P-RoC

	Produktspez. [kg $P_{\text{rückg.}}$ ]	Einwohnerspez. [EW*a]
CSH	9,3-12,9	0,9-1,3
CSH Endprodukt	12,1	1,4

Tabelle 10: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf P-RoC

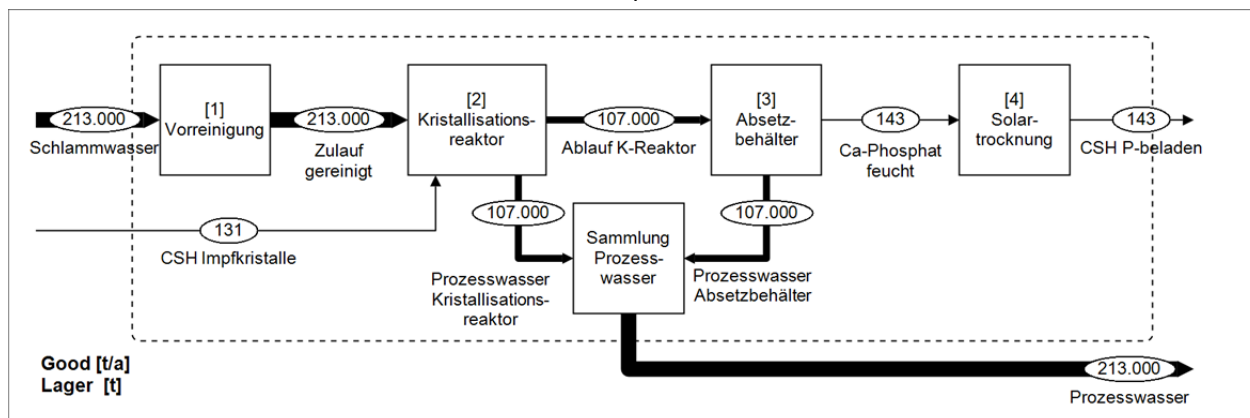


Abbildung 15: Ergebnis Güterflussanalyse P-RoC

### 1.3.2.6 Ergebnisse Energieflussanalyse

Auf Basis von Schätzungen wird im Fall der Implementierung des P-RoC Verfahren auf der Referenzkläranlage ein jährlicher Bedarf an elektrischer Energie von rund 50.000 kWh ermittelt (Tabelle 11). Bezogen auf die Referenzkläranlage mit einem Gesamtenergiebedarf von 23,15 kWh/EW\*a beträgt der zusätzliche Energieaufwand für den Betrieb rund 2 %.

	Produktspez. [kg $P_{\text{rückg.}}$ ]	Einwohnerspez. [EW*a]
kWh	4,2	0,5

Tabelle 11: Spezifischer Energiebedarf P-RoC

### 1.3.2.7 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Im Falle des CSH, es handelt sich um ein Abfallprodukt der Baustoffindustrie, ist die Ermittlung der indirekten Emissionen aus zweierlei Gründen schwierig.

- CSH ist nicht in der GEMIS Datenbank aufgelistet, alternativ könnte Klinker (Hauptbestandteil CSH) aus der Datenbank angenommen werden
- Es handelt sich um ein Neben bzw. Abfallprodukt. Fraglich ist ob und welche indirekten Emissionen berücksichtigt werden.

Auf Basis der Annahme einer Implementierung des P-RoC Verfahrens auf der definierten Referenzkläranlage, der Ergebnisse der Güterflussanalyse und der indirekten Emissionen der notwendigen Ressourcen (GEMIS-Datenbank) kann im Falle der Berücksichtigung des CSH-Inputs in Form von Klinker ein jährlicher Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bzw. SO<sub>2</sub>-Äquivalenten von rund 128.800 kg bzw. 220 kg errechnet werden. Ohne Berücksichtigung des CSH bzw. Klinker sind CO<sub>2</sub>- bzw. SO<sub>2</sub> Emissionen nur aus dem Energiebedarf in Höhe von rund 11.100 kg bzw. 22 kg zu erwarten. Die Emissionen bezogen auf 1 kg P<sub>rückg.</sub> sind aus Abbildung 16 zu entnehmen.

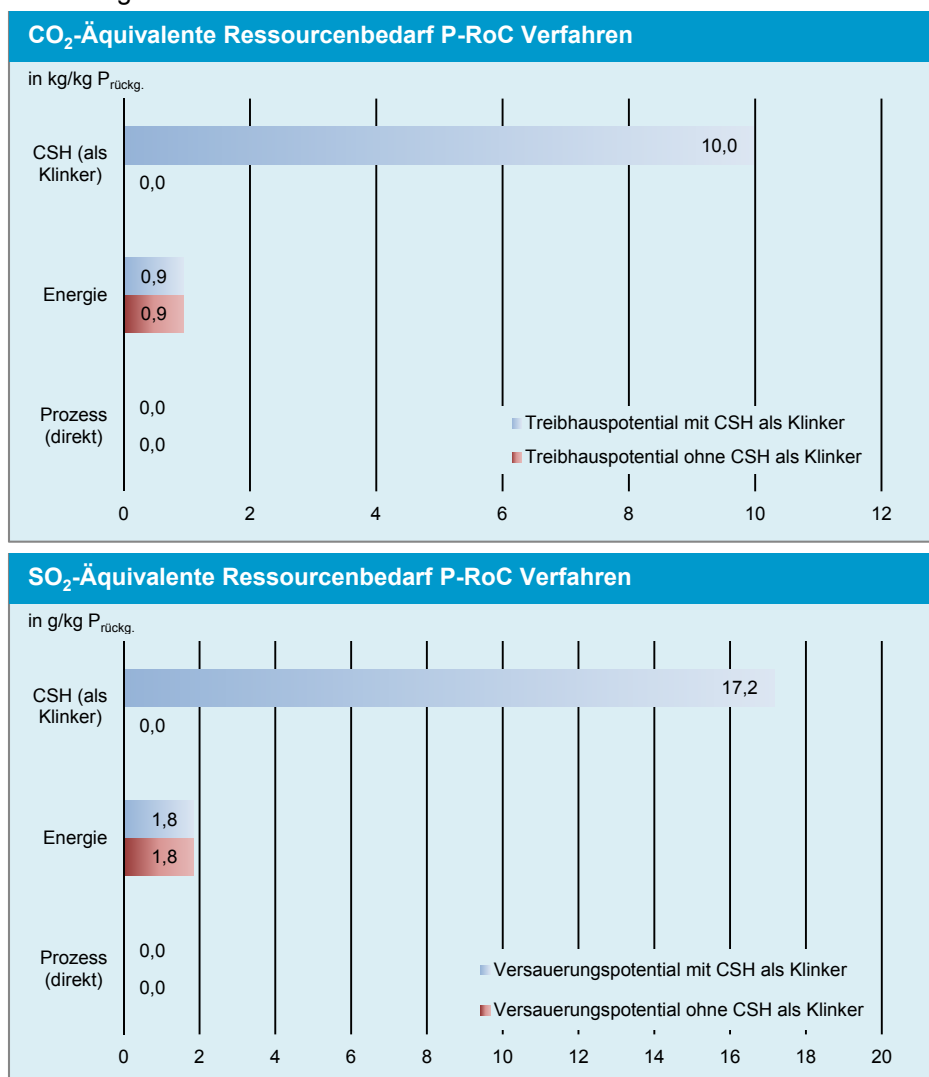


Abbildung 16: CO<sub>2</sub> bzw. SO<sub>2</sub>-Äquivalente [kg bzw. g/kg P<sub>rückg.</sub>] P-RoC



### 1.3.2.8 Indirekte Schwermetallemissionen P-RoC

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

Indirekt Emissionen	Atmosphäre (exkl. CSH) [g/a]	Atmosphäre (inkl. CSH) [g/a]	Hydrosphäre (inkl. CSH) [mg/a]	Hydrosphäre (inkl. CSH) [mg/a]
As	0,005	0,10	0,0000014	0,00006
Cd	0,003	0,12	0,0000035	0,0016
Cr	0,02	0,14	0,0000035	0,001
Cu	-			-
Hg	-		0,0000018	0,0007
Ni	0,03	2,28		-
Pb	0,14	0,59	0,000023	0,01
Zn	-			-
AOX	-			-
PAK	0,000019			-
PCDD/F	0,0000001			-

Tabelle 12: Indirekte SM-Emissionen P-RoC

### 1.3.2.9 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

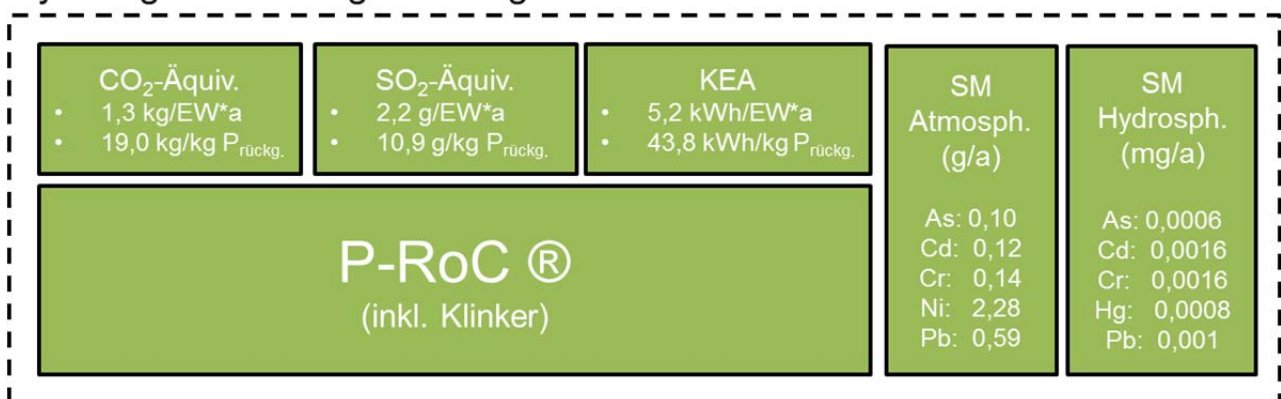
Wird das CSH als Abfallprodukt betrachtet, wird für dessen Herstellung kein zusätzlicher kumulierter Energieaufwand berücksichtigt und für das Verfahren wird nur der Energieaufwand aus dem Bedarf der elektrischen Energie angerechnet.

KEA	[kWh]	[kWh/EW*a]	[kWh/kg P <sub>rückg.</sub> ]
Chemikalien*	421.700	4,2	35,7
Elektrische Energie	95.700	1,0	8,1
<b>Gesamt</b>	<b>517.400</b>	<b>5,2</b>	<b>43,8</b>

Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand P-RoC mit Klinker

Abbildung 17 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen.

### Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren



## Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren

<b>CO<sub>2</sub>-Äquiv.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,1 kg/EW*a</li> <li>• 1,8 kg/kg P<sub>rückg.</sub></li> </ul>	<b>SO<sub>2</sub>-Äquiv.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,2 g/EW*a</li> <li>• 0,9 g/kg P<sub>rückg.</sub></li> </ul>	<b>KEA</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,0 kWh/EW*a</li> <li>• 8,1 kWh/kg P<sub>rückg.</sub></li> </ul>	<b>SM Atmosph. (g/a)</b> As: 0,005 Cd: 0,003 Cr: 0,02 Ni: 0,03 Pb: 0,14	<b>SM Hydrosph. (mg/a)</b> As: <0,0001 Cd: <0,0001 Cr: <0,0001 Hg: <0,0001 Pb: <0,0001
<b>P-RoC</b> (ohne Klinker)				

Abbildung 17: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren) mit Klinker (oben) ohne Klinker (unten)



### 1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung P-RoC

Die Implementierung des P-RoC Verfahrens hat Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess, der wiederum nachfolgende Prozesse beeinflussen kann, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

Faktor	Einfluss auf
Reduktion Fällmittel (-7,7%)	Verringerte Rückbelastung – verringerter Fällmittelbedarf, verringerte indirekten Emissionen aus Fällmittelproduktion, Kosten Abwasserreinigung
Bio-P und Faulung	Erhöhte Rücklösung von P und SM ->Veränderung SFA
Verringerte P Rückbelastung	Kosten Abwasserreinigung, Schlammanfall, Transport Klärschlamm,
Verringerter Schlammanfall (-1,5%)	Energieausbeute Verbrennung, Ascheanfall, Transportkosten, Entsorgungskosten, Ressourcenaufwand Verbrennung
Ressourcenaufwand P-RoC	Indirekte Emissionen, Kosten
CaP-Produktion	Kosten (Erlöse)

Tabelle 14: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung P-RoC

#### Berücksichtigung Transport

Infolge des verringerten Klärschlammmanfalles (-1,5 %) verringert sich sowohl die Klärschlammfracht zur Verbrennung als auch die Fracht zur Entsorgung der anfallenden Aschen und Filterkuchen (Tabelle 15).

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€/EW*a]
Klärschlamm – Mitverbrennung	4.900	685.900	0,96
Flug- und Bettasche - Reststoffdeponie	716	71.600	0,10
Filterkuchen - Untertagedeponie	32	32.100	0,04
<b>Gesamt Transport</b>		<b>789.600</b>	<b>1,11</b>

Tabelle 15: Transportwege P-RoC

#### 1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation ist eine Erhöhung der treibhausrelevante Gase (+32 %), sowie der Gase mit Versauerungspotential (+15 %) zu beobachten (Tabelle 16), wenn CSH als Klinker berücksichtigt wird. Ähnlich verhält es sich beim kumulierten Energieaufwand. Der zusätzliche Energieaufwand liegt bei 34 % in Relation zur Referenzsituation (Tabelle 17). Wird das CSH als Abfallprodukt und damit ohne ökologischen Rucksack betrachtet, schneidet das P-RoC Verfahren noch besser ab (ohne Klinker).

CO <sub>2</sub> -Äquivalente	Mit Klinker		Ohne Klinker	
	[kg]	[CO <sub>2</sub> -Äquiv./EW*a]	[kg]	[CO <sub>2</sub> -Äquiv./EW*a]
P-RoC	484.700	4,8	411.700	4,1
Referenz	368.600	3,7	368.600	3,7
Δ	+32 %		+12 %	
SO <sub>2</sub> -Äquivalente	Mit Klinker		Ohne Klinker	
	[kg]	[SO <sub>2</sub> -Äquiv./EW*a]	[kg]	[SO <sub>2</sub> -Äquiv./EW*a]
P-RoC	1.450	0,014	1.330	0,013
Referenz	1.260	0,013	1.260	0,013
Δ	+15 %		+6%	

Tabelle 16: CO<sub>2</sub> bzw. SO<sub>2</sub>-Äquivalente Prozesskette P-RoC

#### 1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA	Rohstoffe	Energie	[kWh/EW*a]
Kläranlage	648.000	1.006.000	10,9
P-RoC	421.700	95.700	5,2
Monoverbrennung	145.700	918.000	10,6
Deponie	13.100*		0,1
Transport	128.000**		1,3
<b>Gesamt</b>	<b>3.380.000</b>		<b>33,8</b>
Substitution Strom	-481.800		4,8

Substitution Wärme	-1.317.000	13,2
Substitution P Dünger	-61.100	0,6
<b>Gesamt</b>	<b>1.520.200</b>	<b>15,6</b>
Referenz	1.131.700	11,3
$\Delta$	+34%	

\*KEA auf kg Reststoff bezogen; \*\*KEA auf 1 tkm Transport bezogen. Unterteilung nach Rohstoff und Energie nicht möglich

Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

Wird CSH als Abfallstoff betrachtet, wird nur der Energieaufwand berücksichtigt. Dann liegt der zusätzliche KEA bei nur 0,5 %.

In Abbildung 18 werden die ökologisch relevanten Bewertungsparameter CO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen sowie der kumulierte Energieaufwand in Relation zur Referenzsituation zusammenfassend bezogen auf EW\*a dargestellt. Die ökologische Bewertung verdeutlicht, dass infolge der Implementierung des P-RoC Verfahrens nur geringe bzw. moderate Steigerungen der CO<sub>2</sub> bzw. SO<sub>2</sub>-Emissionen zu erwarten sind.

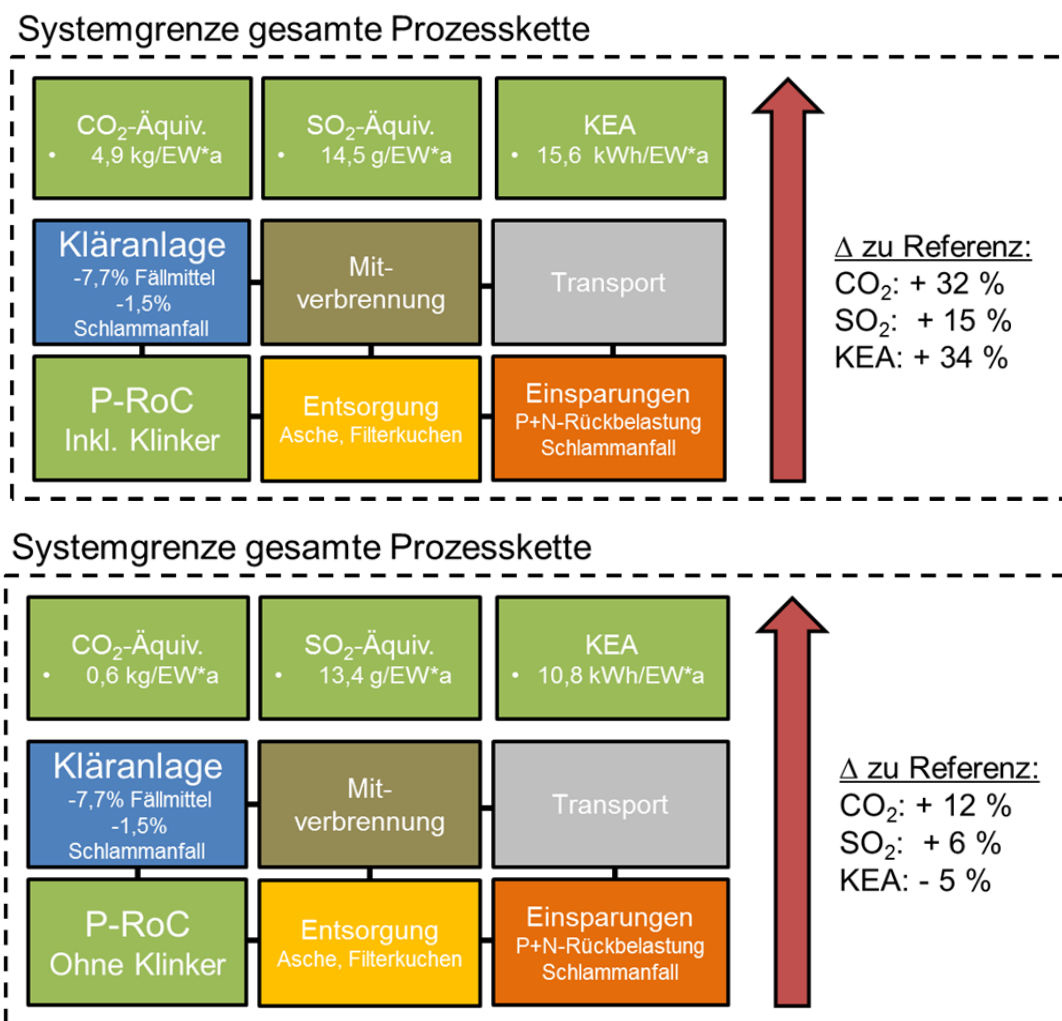


Abbildung 18: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation zur Referenzsituation für P-RoC mit (oben) und ohne Klinker (unten)

### 1.3.3.3 Ergebnis Schwermetallemissionen

Verglichen mit den direkten SM-Emissionen (Tabelle 19) haben die indirekten SM-Emissionen (Tabelle 12) nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamt-Schwermetallemissionen. Im Vergleich zur Referenzsituation kann Großteils eine Reduktion der Emissionen in die Atmosphäre und Hydrosphäre beobachtet werden. Die verringerten Emissionen in die Luft sind in erster Linie auf die fehlenden indirekten Emissionen aus dem Fällmittelbedarf zurückzuführen. Im Falle der Emissionen in die Gewässer ist die reduzierte Fracht





hauptsächlich auf die entfallenden direkten Schwermetalleinträge aus dem Fällmittelverzicht zurückzuführen. Der Anteil der indirekten Emissionen in die Gewässer aus dem Verzicht der Fällmittel ist dagegen gering.

	Atmosphäre [g/a]	Δ Referenz [%]	Hydrosphäre [kg/a]	Δ Referenz [%]
As	4,59	-4,5	2,12	1,0
Cd	3,83	-15,3	1,09	-9,9
Cr	30,15	-25,6	18,80	-27,4
Cu	-	-	-	-
Hg	-	-	0,39	-19,2
Ni	21,88	-11,8	-	-
Pb	89,10	-23,0	18,69	-3,7
Zn	-	-	-	-
AOX	-	-	338,7	0,0
PAK	0,2	0,01	4,40	-
PCDD/F	0,000001		3,73	-

Tabelle 18: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation

#### 1.3.3.4 Ergebnisse Stoffflussanalyse Schwermetalle und organische Spurenstoffe

Auf Basis der Stoffflussanalyse können die Phosphor- und Schwermetallpfade in eine mögliche finale Senke (Deponie), Atmosphäre, Hydrosphäre oder Landwirtschaft dargestellt werden (Abbildung 19). Die Phosphorbilanz verdeutlicht, dass in Relation zum P-Input einer Kläranlage mit dem P-RoC Verfahren rund 20 % in die Landwirtschaft gebracht werden kann. Jener P-Anteil der in die Gewässer geleitet wird bleibt konstant. Folglich gelangen rund 60 % des Phosphors auf eine Deponie. Aufgrund des geringen Transfers von SM in das Schlammwasser und folglich in das Endprodukt, gelangt der überwiegende Anteil der Schwermetalle nicht auf die landwirtschaftlichen Flächen. Hinsichtlich potentiell höherer SM-Einträge in Hydrosphäre oder Atmosphäre mit dem P-RoC, sind aufgrund der Prozessführung keine signifikanten Veränderungen gegenüber der Referenzsituation 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. Organische Spurenstoffe sind im Endprodukt nicht nachweisbar, womit auch keine Spurenstoffe über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

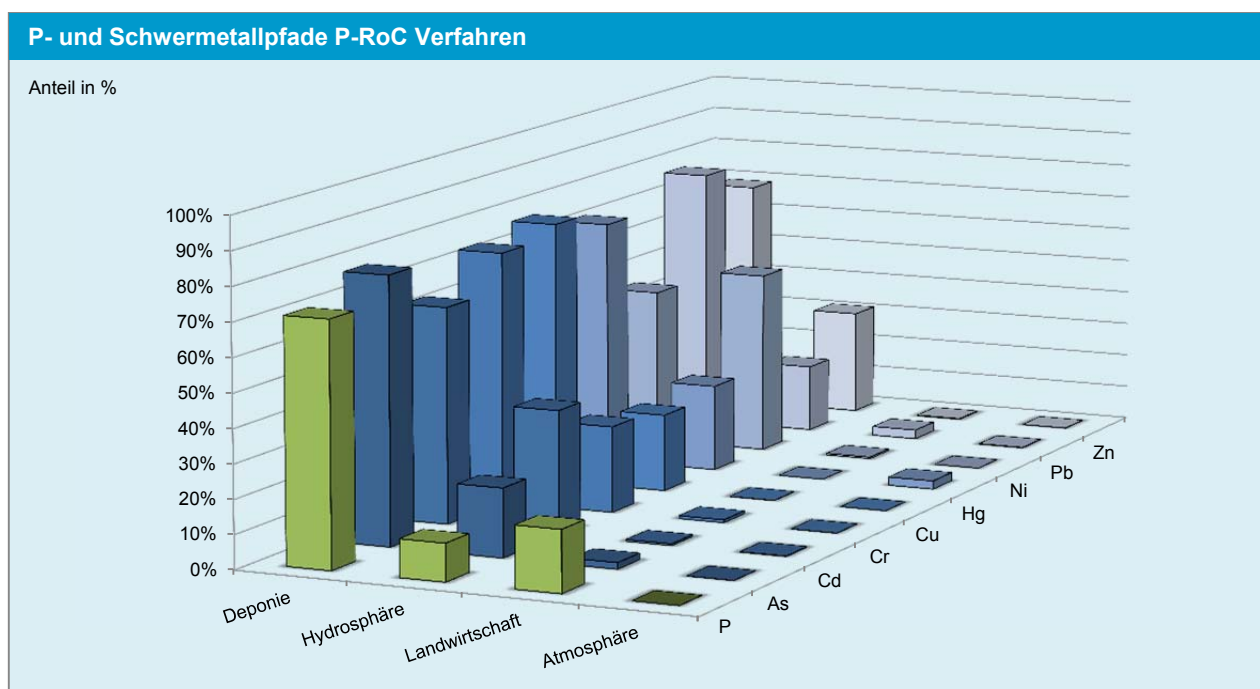


Abbildung 19: P- und SM-Pfade gesamte Prozesskette

### 1.3.3.5 Ergebnis Schwermetallemissionen

Verglichen mit den direkten SM-Emissionen machen die indirekten SM-Emissionen (Tabelle 12) nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamt-Schwermetallemissionen aus. Durch die Implementierung des P-RoC Verfahrens auf einer Anlage werden die direkten Emissionen nicht verändert. Geringe Veränderungen sind bei den indirekten Emissionen aufgrund des verringerten Fällmittelbedarfs und geringerem Schlammanfall (Transportaufwand, Ölbedarf bei Verbrennung), sowie durch Gutschriften der Nährstoffe P und N im Endprodukt zu erwarten. Die Veränderungen der Emissionen im speziellen in die Hydrosphäre sind aufgrund des kleinen Anteils der veränderlichen indirekten Emissionen, aber der als statisch angenommenen direkten Emissionen, sehr gering und liegen im Bereich der Unschärfe der Datensicherheit.

Emissionen Gesamt	Atmosphäre [g/a]	Δ Referenz [%]	Hydrosphäre [kg/a]	Δ Referenz [%]
As	7,9	-6,4	2,1	2,3
Cd	4,5	-4,3	1,2	0,1
Cr	45,8	-1,4	25,6	-0,1
Cu	-	-	-	-
Hg	-	-	0,47	-1,4
Ni	53,9	-11,3	-	-
Pb	130,3	-1,0	25,1	0,6
Zn	-	-	-	-
AOX	-	-	338,7	0,0
PAK	155,5	0,15	-	-
PCDD/F	0,000001	-137,4	-	-

Tabelle 19: Direkte Emissionen P-RoC Prozesskette, Vergleich Referenz

### 1.3.3.6 Ergebnis Endprodukt

Endprodukt ist ein mit Phosphor beladenes CSH, was einem Calciumphosphat entspricht. Die Schwermetallgehalte sind sehr gering und liegen deutlich unter den Anforderungen der Düngemittelverordnung. Bezogen auf den Hauptnährstoff Phosphor liegen sämtliche Schwermetallkonzentrationen ausser Arsen teils sehr deutlich unter jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP). Hintergrund dafür kein ein erhöhter Arsen Gehalt im Ausgangsprodukt CSH sein.

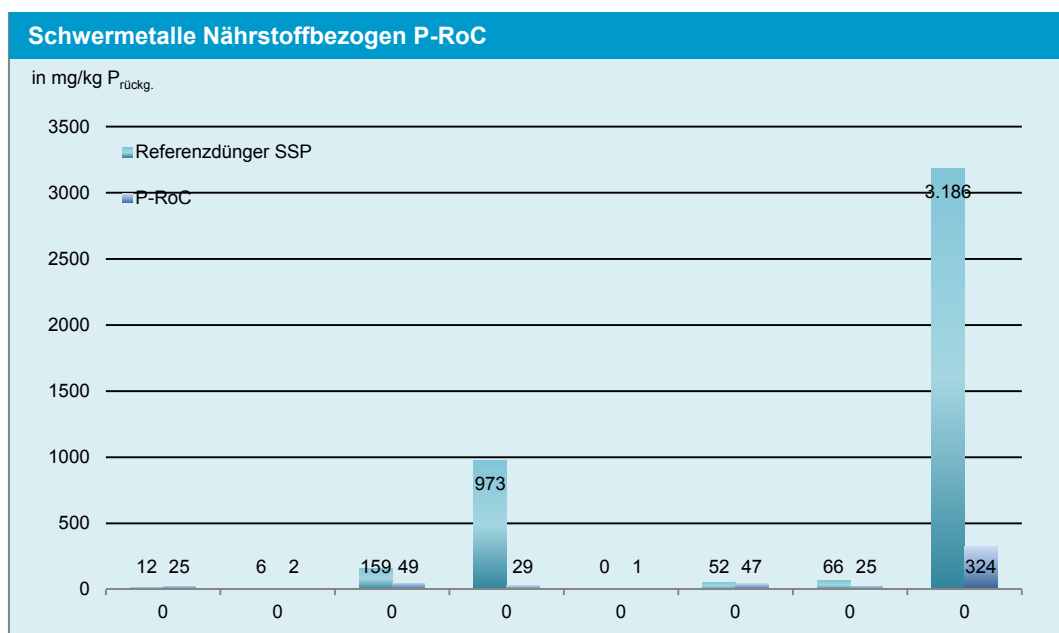


Abbildung 20: Nährstoffbezogene Schwermetallgehalte P-RoC Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)

Bewertung Endprodukt	P-RoC	SSP
Löslichkeit	Gut	Sehr Gut
Düngewirksamkeit	Schlecht/Mäßig	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	254	230
<b>Anorganische Verunreinigungen</b>		
SM:P [mg Cd/kg P]	1,6	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,007	1,26
Referenzbodenmethode [*]	20.400 (As*)	1.450 (Cd*)
Tolerierbare Menge bezogen auf Cd	12,1	-
<b>Organische Verunreinigungen</b>		
Keine organische Spurenstoffe	5 <sup>3</sup>	5 <sup>1</sup>
Keine hygienischen Bedenken	5 <sup>3</sup>	5 <sup>1</sup>
<b>Handhabung</b>		
Einfache Lagerung möglich	5	5
Direkter Einsatz in LW möglich	4	5

Tabelle 20: Bewertung CSH Endprodukt

Das Cd:P Verhältnis ist mit 1,6 mg Cd/kg P äußerst gering und liegt deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Das Schadeinheitenmodell und die Referenzbodenmethode verdeutlichen die geringen Gehalte an Schwermetallen. Theoretisch kann das P-RoC Endprodukt rund 20.400 Jahre aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. In diesem Fall ist Arsen das limitierende Element. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, könnte das P-RoC Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 12,1 häufiger ausgebracht werden. Organische Schadstoffe sind nur in äußerst geringen Konzentration (LAS, B(a)P) bzw. nicht im Endprodukt nachweisbar. Hygienische Bedenken sind aufgrund der Verfahrenstechnik der Kristallisation nicht zu erwarten. Eine direkte Ausbringung in der Landwirtschaft ist aufgrund der Körnung mithilfe moderner Ausbringungsgeräten nicht möglich. Eine Lagerung ist allerdings gut möglich.

### 1.3.4 Ökonomische Bewertung

#### 1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten P-RoC

Wesentliche Voraussetzung für größenabhängige Kostenkalkulationen ist die Annahme und Festlegung von Up- und Downscalingfaktoren. Auf Basis der vorliegenden Investitionskosten für ein P-RoC Verfahren mit einer Ausbaugröße von 100.000 EW wird eine Beziehung zur Ausbaugröße, den entsprechenden Kosten und dem rückgewinnbaren P-Potential hergestellt.

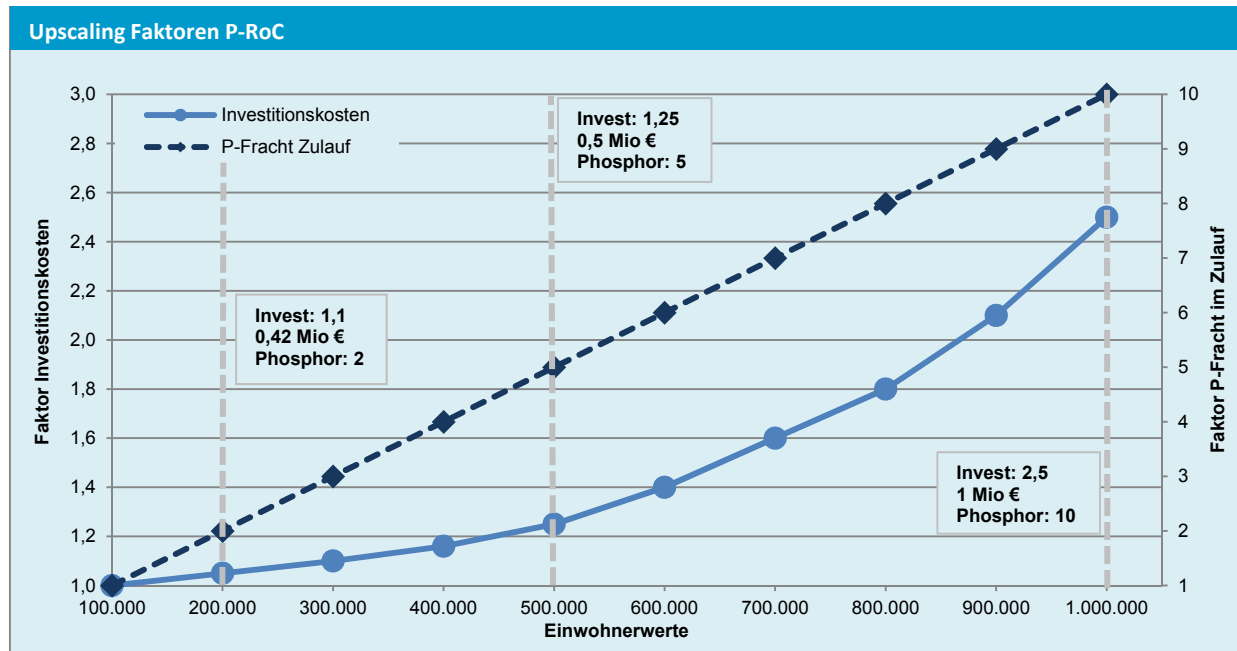


Abbildung 21: Upscaling Faktoren Investitionskosten P-RoC

Das P-RoC Verfahren ist ein technisch sehr einfach Verfahren, bei welchem ein Rührreaktor zur Vermischung des CSH mit dem Schlammwasser ausreicht. Dementsprechend werden für den Rührreaktor kleine Up-Scaling Faktoren in Anlehnung an das Ostara® Verfahren angenommen. Da bedeutet, dass im Falle einer Umsetzung auf einer 200.000 EW Anlage die Investitionskosten um den Faktor 1,1 steigen, während gleichzeitig die P-Fracht um den Faktor 2 zunimmt. Für die Umsetzung auf einer 500.000 EW Anlage wird ein Up-Scaling Faktor von 1,25, während für die Umsetzung auf einer 1.000.000 EW Kläranlage angenommen wird, dass 2 große Reaktoren benötigt werden (Faktor Invest: 2,5, Phosphor: 10)

#### 1.3.4.2 Jahreskosten

Die Investitionskosten für das P-RoC Verfahren liegen im Bereich von 0,4 Mio. Euro. Angenommen wird, dass 60 % der Kosten auf die Bautechnik (ND 30 Jahre) und 40 % auf die Maschinentechnik (ND 15 Jahre) Entfallen. Aufgrund des wartungsarmen Betriebes werden die Wartungskosten mit 1 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand ist gering und kann mit 0,1 MA/Jahr angenommen werden.

Jahreskosten	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a
<b>Kapitalkosten</b>			<b>28.300</b>
Wartung + Reparaturen			4.000
CSH	131.000	225 €/t	29.500
Energie	50.000	0,1 €/kWh	5.000
Personal	0,1	50.000 €/MA	5.000
Sonstiges	-	-	-
Entsorgung	-	-	-
<b>Betriebskosten</b>			<b>43.500</b>
<b>Gesamt</b>			<b>71.700</b>

Tabelle 21: Jahreskosten P-RoC (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Einsparungen/Erlöse	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a
CaP Erlöse	142.700	254 €/t	36.300
P-Reduktion	3.400		7.900
Schlammreduktion	23.000	290	6.600
<b>Gesamt</b>			<b>50.800</b>

Tabelle 22: Einsparungen und Erlöse P-RoC (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Spezifische Kosten	€
€/kg P <sub>rückgewonnen</sub>	6,1
€/EW*a	0,7
€/E*a	1,4

Tabelle 23: Spezifische Kosten P-RoC (100.000 EW)

Die Berechnungen zeigen, dass das P-RoC Verfahren unter den gegebenen Voraussetzungen (Referenzkläranlage 100.000 EW) nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Allerdings liegen die einwohnerspezifischen Kosten bereits ohne Berücksichtigung der Einsparungen deutlich unter 1 €. Werden diese berücksichtigt ist mit einwohnerspezifische Kosten von 0,2 € zu rechnen. Aufgrund der relativ geringen P-Rückgewinnungsquoten liegen die produktspezifischen Kosten auch nach der Berücksichtigung von Einsparungen und Erlösen bei rund 1,8 €/kg P rückgewonnen.

Anhand der Annahme unterschiedlicher Kläranlagengrößen sowie einer Variation der Rücklösung in der Schlammfaulung von  $20 \pm 5$  % kann von einer deutlichen Reduktion, sowohl der einwohner- als auch der produktspezifischen Kosten, ausgegangen werden. Bereits bei einer Kläranlagengröße von 200.000 EW, das entspricht der doppelten Phosphorzulaufkraft, kann das P-RoC Verfahren unter der Berücksichtigung einer hohen P-Rücklösung von 25 % und Berücksichtigung der Einsparungen und Erlöse wirtschaftliche betrieben werden. Das heißt, die Jahreskosten werden durch die möglichen Einsparungen und Erlöse gedeckt. Grund dafür sind die nicht proportional steigenden Investmentkosten. Die Kosten können weiter gesenkt werden, wenn das P-RoC Verfahren auf einer Kläranlage ab 500.000 EW implementiert wird. Dabei ist anzumerken, dass auch bei einer geringen Rücklösungen während der Faulung (15 %) im Falle einer Umsetzung auf einer KA mit 500.000 EW ein kostendeckender betrieb möglich ist.. Während die rückgewinnbare P-Fracht direkt proportional zur Kläranlagengröße zunimmt, gilt dies für die Investitionskosten für größere Reaktoren beim Up-Scaling nicht. Auch direkt proportional steigen die Kosten für das Kristallisationsmaterial, während die Kosten für Wartung und Personal nahezu gleich bleiben.

#### 1.3.4.3 Variantenrechnung/Kostendegression

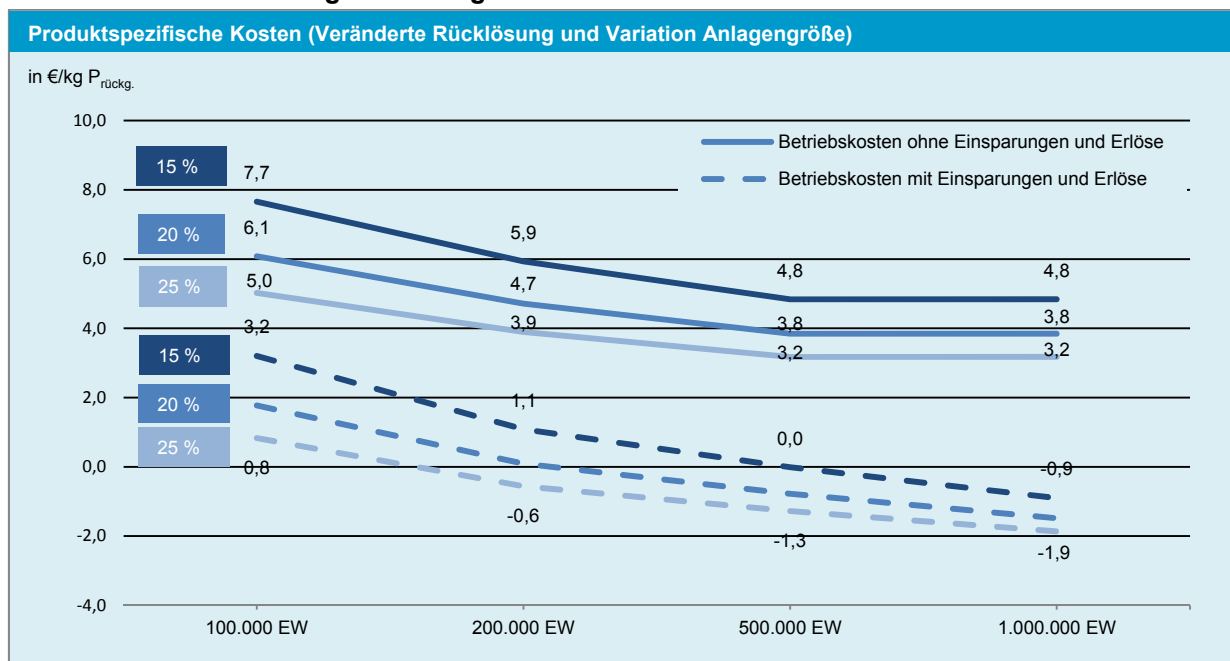


Abbildung 22: Produktspezifische Kosten P-RoC; Variation Rücklösung und Anlagengröße

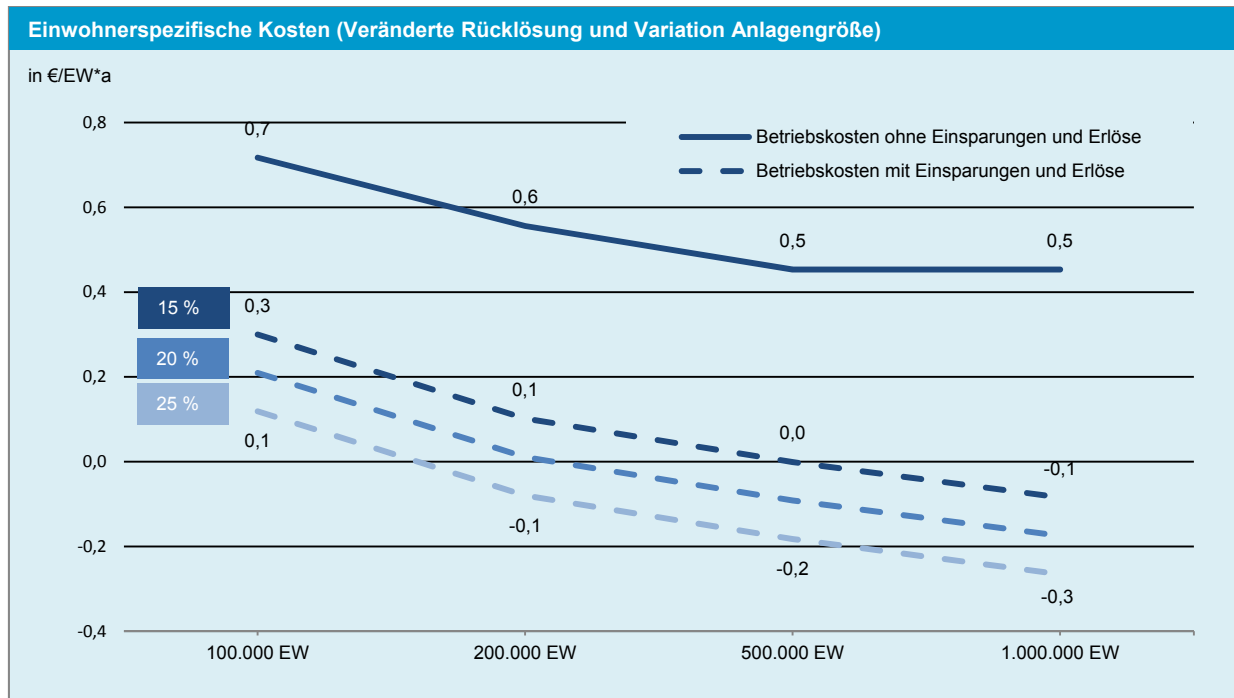


Abbildung 23: Einwohnerspezifische Kosten P-RoC; Variation Rücklösung und Anlagengröße

#### 1.3.4.4 Kostenaufgliederung

Anhand der Kostenaufgliederung wird deutlich, dass die Kapitalkosten infolge der hohen Investitionskosten für den kleinen Mischbehälter die Gesamtkosten dominieren und damit auch hauptverantwortlich für den unwirtschaftlichen Betrieb sind. Im Fall des Einsatzes eines großen Mischbehälters kann der Anteil der Kapitalkosten auf rund 17 % der Jahreskosten gedrückt werden.

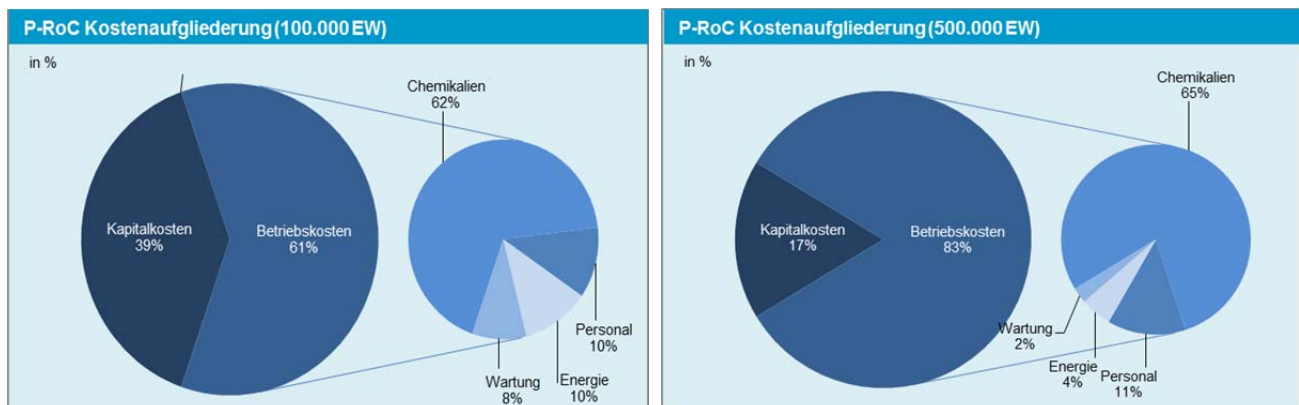


Abbildung 24: Kostenaufgliederung P-RoC 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)

#### 1.3.4.5 Amortisation

Anhand der Kapitalwertmethode (Jahreskosten ohne Kapitalkosten abzüglich sämtlicher Einsparungen bzw. Erlöse) wird für die 100.000 EW Anlage und eine Amortisationszeit von >15 Jahren errechnet. Das bedeutet, dass keine Amortisierung der Anlage vor der Neuinvestition der Maschinenteknik nach 15 Jahren stattfindet. Grund dafür ist primär die zu geringe P-Fracht in Relation zu den Kosten für das Kristallisationsmaterial. Ab einer Anlagengröße von 200.000 EW und einer Rücklösung von 20 % ist ein Amortisation nach 15 Jahre knapp, bei einer Rücklösung von 25 % bereits vor den 15 Jahren möglich.

Anlagengröße	Amortisationszeit [a]
100.000 EW	>15
200.000 EW	11-12
500.000 EW	6-7
1.000.000 EW	3-4

Tabelle 24: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße





### 1.3.4.6 Kosten gesamte Prozesskette

Die Umsetzung des P-RoC Verfahrens hat einen positiven Einfluss auf die Rückbelastung und damit die Kosten zur Entfernung der Nährstoffe (Fällmittelbedarf: - 7,7%) und den Schlammfall (- 1,5 %). Der verringerte Schlammbedarf hat zum einen geringen Einfluss auf die Kosten der Mitverbrennung als auch auf die Transportkosten. Einsparungen resultieren aus dem bereits genannten reduzierten Fällmittelbedarf und den verringerten Entsorgungskosten für den Klärschlamm. Die Erlöse stammen aus dem Verkauf des beladenen CSH. Im Vergleich zur Referenzsituation ist mit geringfügig höheren Kosten von rund 11,3 €/EW\*a zu rechnen. Das entspricht absoluten Mehrkosten von 0,1 €/EW\*a bzw. + 1 %. Im Fall einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit größerer Belastung ist aufgrund der reduzierten Verfahrenskosten, in erster Linie der Investitionskosten des P-RoC Verfahrens, ein geringer Anstieg (+/- 0 %; 200.000 EW) der Kosten bzw. eine Reduktion (- 1 %; 500.000 EW) der Kosten im Vergleich zur Referenzsituation möglich (Tabelle 25).

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	100.000 EW	200.000 EW	500.000 EW
<b>Kläranlage</b>			
Abwasserreinigung	4,50	4,50	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50	1,50	1,50
Kosten Kläranlage	6,00	6,00	6,00
<b>Rückgewinnungsverfahren</b>			
<b>Verbrennung (Mitverbrennung)</b>	0,72	0,56	0,45
<b>Entsorgung</b>	3,53	3,53	3,53
<b>Transport</b>			
Asche/Schlacke/Flugasche	0,36	0,36	0,36
Filterkuchen	0,06	0,06	0,06
<b>Summe Kosten</b>			
<b>Einsparungen und Erlöse</b>	11,70	11,54	11,44
Verringerte P Rückbelastung	0,08	0,08	0,08
Erlös Endprodukt	0,36	0,36	0,6
Summe Einsparungen und Erlöse	0,44	0,44	0,44
Gesamtkosten	11,26	11,10	10,99
<b>Δ zu Referenz</b>	<b>+1%</b>	<b>+/-0%</b>	<b>-1%</b>

Tabelle 25: Jahreskosten gesamte Prozesskette P-RoC

Verglichen mit den Referenzkosten von 11,1 €/EW\*a betragen die Kosten im Falle einer Implementierung rund 11,3 bzw. 11,1 €/EW\*a. Das entspricht einer geringen Zunahme von 2 % bzw. keiner Veränderung der Kosten.

Kläranlage	Mit- verbrennung	P-RoC	Entsorgung Asche, Filterkuchen	Transport	Einsparungen Rückbelastung P, Schlammfall, Verkauf CSH
6,0 €	3,5 €	0,7 €	0,4 €	1,1 €	0,4 €
Gesamt: 11,3 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: Δ absolut: + 0,1 €/EW*a; Δ %: + 1 %					

Abbildung 25: Kosten gesamte Prozesskette P-RoC 100.000 EW Anlage

Kläranlage	Mit- verbrennung	P-RoC	Entsorgung Asche, Filterkuchen	Transport	Einsparungen Rückbelastung P, Schlammanfall, Verkauf CSH
6,0 €	3,5 €	0,5 €	0,4 €	1,1 €	0,4 €
Gesamt: 11,1 €/EW*a					
Vergleich zur Referenz: $\Delta$ absolut: - 0,1 €/EW*a; $\Delta$ %: - 1 %					

Abbildung 26: Kosten gesamte Prozesskette P-RoC 500.000 EW Anlage

#### 1.3.4.7 Sensitivitätsanalyse

Dargestellt werden in die Sensitivitätsanalyse die anfallenden Kosten unter Berücksichtigung von Einsparungen und Erlösen sowie der verschiedenen Szenarien. Sie verdeutlicht in Abbildung 27, dass die Preisänderung für Rohstoffe (+20 %) einen großen auf die Gesamtkosten dieses Verfahrens (+37 %) haben. Auch die veränderlichen Investitionskosten (+20 %) haben einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten (+36 %). Szenario 4 zeigt die deutlich reduzierten produktspezifischen Kosten (-53 %), die im Falle einer höheren Rücklösung bei der anaeroben Behandlung (25 statt 20%) und damit einer höheren Rückgewinnungsquote anfallen. Grund dafür ist in erster Linie der steigende Erlös aus dem Verkauf des Endproduktes.

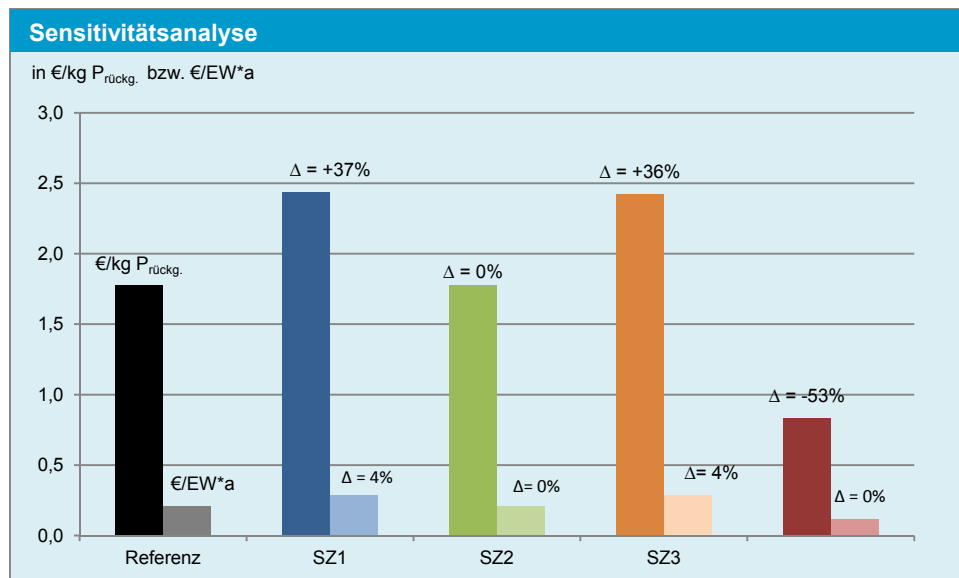


Abbildung 27: Sensitivitätsanalyse P-RoC

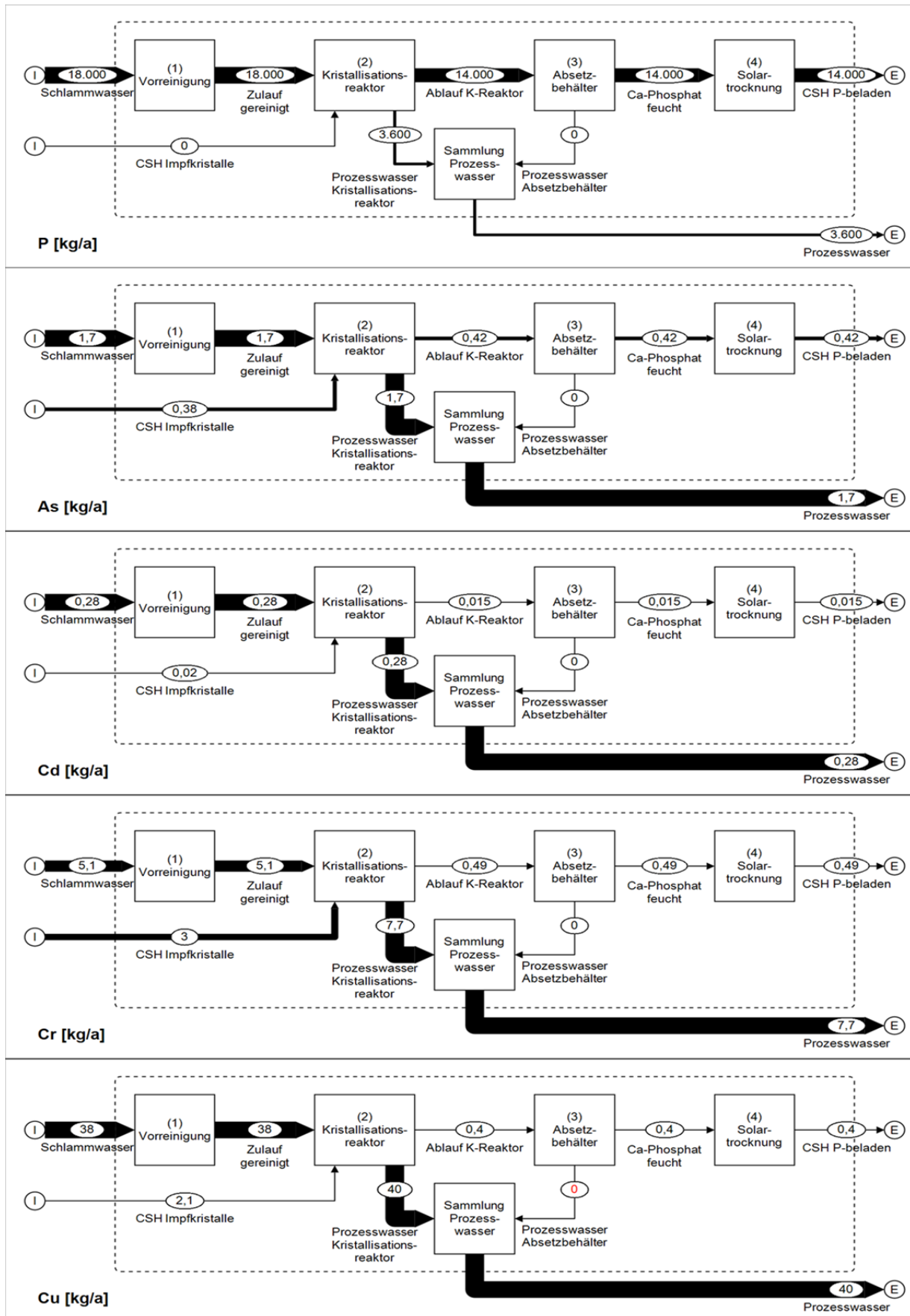


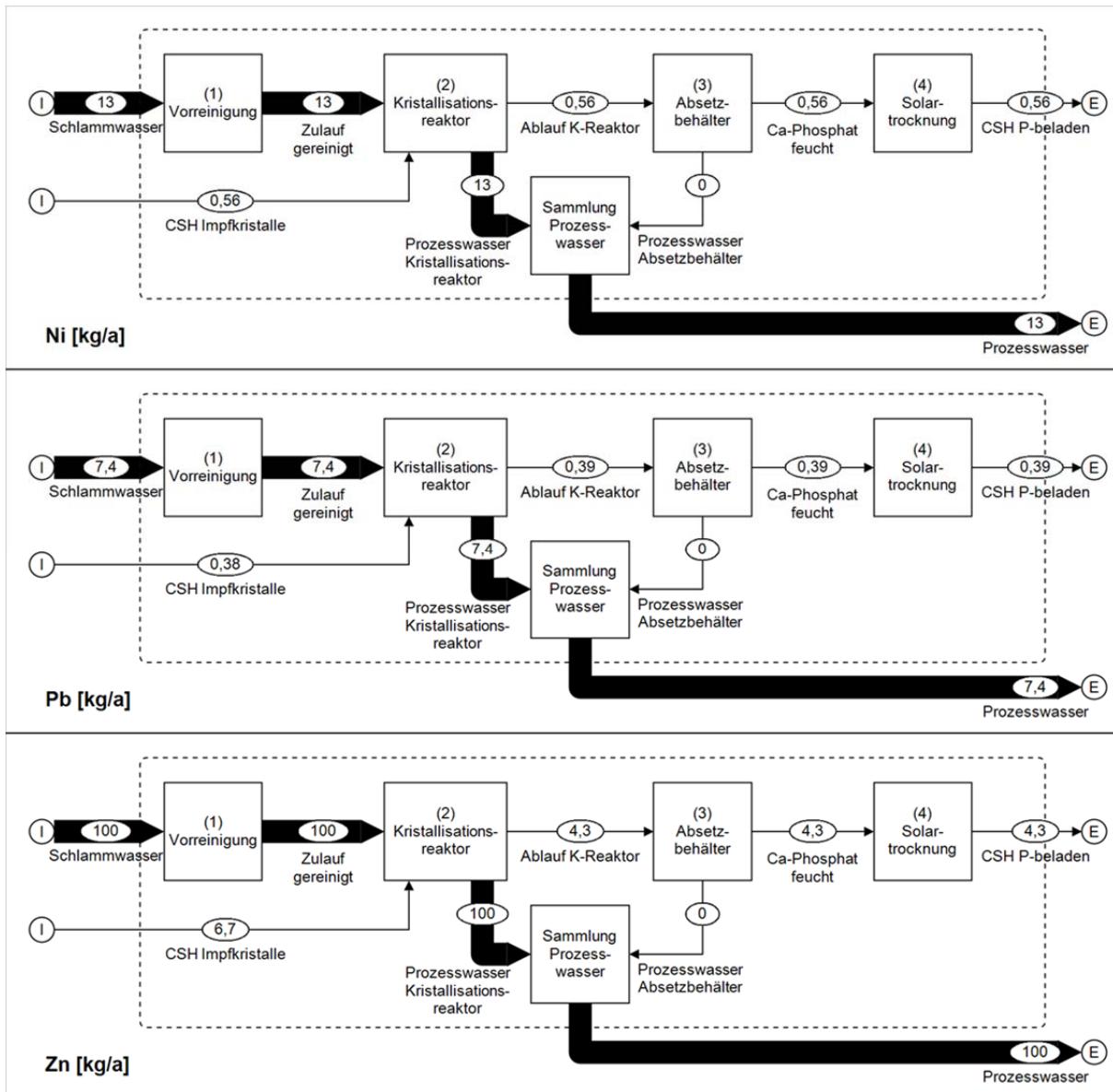
### 1.3.5 Literatur

- Berg, U. (2005) P-ROC - Ein Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwässern durch Abscheidung von Calciumphosphat-Mineralphasen an Tobermorit. In: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm - Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt.
- Berg, U., Donnert, D., Weidler, P.G., Kaschka, E., Knoll, G., Nüesch, R. (2006) Phosphorus Removal and Recovery from Waste Water by Tobermorite-seeded Crystallisation of Calcium Phosphate. *Water Science Technology* Vol.53 (3), pp.131 – 138.
- Berg, U., Ehbrecht, A., Röhm, E., Weidler, P.G., Nüesch, R. (2007a): „Impact of Calcite on Phosphorus Removal and Recovery from Wastewater Using CSH-Filled Fixed Bed Filters“. *J. Res. Sci.& Tech.* 4 (2), pp. 73 – 81.
- Berg, U., Knoll, G., Kaschka, E., Kreutzer, V., Donnert, D., Weidler, P.G., Nüesch, R. (2007b) P-RoC - Phosphorus Recovery from Wastewater by Crystallisation of Calcium Phosphate Compounds. *J.Res.Sci. & Tech.* 4 (3), pp. 117 – 122.
- BMLFUW (2004) Entwicklung eines Verfahrens zur Phosphatrückgewinnung aus Abwässern mittels Aktivfiltration. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. Projekt Nr. GZ A202190.
- Ehbrecht, A., Patzig, D., Schönauer, S., Schuhmann, R. (2008) Efficiency of CSH-substrates with regard to P-elimination from wastewater and the quality of the generated products. In: *Proceedings of the IWA World Water Congress*, Wien, Österreich, 8.-12. September, 2008.
- Ehbrecht, A., Schönauer, S., Fuderer, T., Schuhmann, R. (2011) P-Recovery from sewage by seeded crystallisation in a pilot plant in batch mode technology. *Water Science Technology*, Vol. 63 (2), pp. 339 – 344.
- Petzet, S., Cornel, P., Beier, M., Rosenwinkel, K. H., Pikula, R., Sperlich, V., Ehbrecht, A., Patzig, D., Schönauer, S., Schuhmann, R. (2011) BMBF-Verbundprojekt ProPhos: Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung. In: *Gewässerschutz - Wasser - Abwasser*, Band 228. Förderinitiative für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor. Schlusspräsentation. 14. 9.2011, Berlin.
- Schneider, T. (2012) Klärwerksleiter Kläranlage Neuburg an der Donau. Persönlicher Kontakt, Anlagenbesichtigung am 20.9.12.
- Wiebke, E., Pinnekamp, J. (2011) Kostenabschätzung von ausgewählten P-Rückgewinnungsverfahren. In: *Gewässerschutz - Wasser - Abwasser*, Band 228. Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor, Schlusspräsentation, 14.9.2011 Berlin.

## 1.4 Anhang

### 1.4.1 Stoffflussanalyse P-RoC





## 1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess

