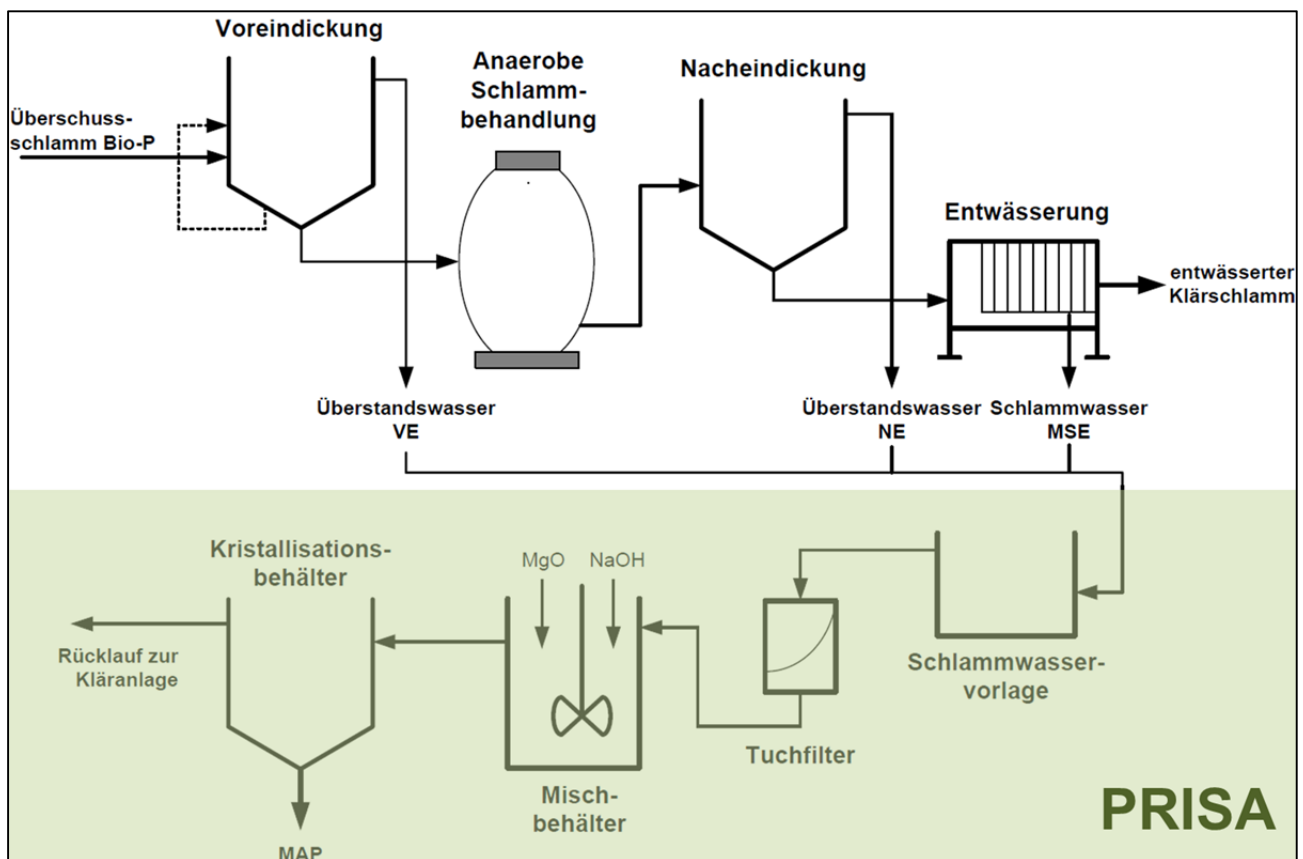


Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

PRISA





Inhaltsverzeichnis

1	PRISA Verfahren	5
1.1	Grundlagen allgemein	5
1.1.1	Prozessskizze PRISA Verfahren	5
1.1.2	Prozessskizze als STAN Modell	5
1.1.3	Verfahrensbeschreibung	6
1.1.4	Betriebsparameter PRISA Reaktor	8
1.2	Datengrundlage für Bewertung	9
1.2.1	Sachbilanz	9
1.2.2	Stoffflussanalyse	9
1.2.3	Charakteristik Endprodukt	10
1.2.4	Umsetzung	11
1.2.5	Flächenbedarf auf Kläranlage	11
1.2.6	Ökonomische Grundlagen	11
1.3	Ergebnis PRISA Verfahren	13
1.3.1	Technologie Bewertung	13
1.3.2	Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)	13
1.3.3	Ganzheitliche ökologische Bewertung PRISA	19
1.3.4	Ökonomische Bewertung	23
1.3.5	Literatur	29
1.4	Anhang	30
1.4.1	Stoffflussanalyse PRISA	30
1.4.2	Stoffflussanalyse Gesamtprozess PRISA	32

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessskizze Implementierung PRISA Verfahren auf Kläranlagen	5
Abbildung 2: STAN Modell PRISA	5
Abbildung 3: STAN Modell PRISA gesamte Prozesskette	6
Abbildung 4: Phosphat- und Feststoffkonzentrationen in einem Ständeindicker nach 24 h (Montag, 2008)	6
Abbildung 5: Links: Ergebnisse der Rücklöseversuche ($\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration im Schlammwasser). Rechts: Häufigkeit der Rücklösequoten in %. VE 1 (Referenz), VE 2 (PRISA)	7
Abbildung 6: Mittlere Phosphatrücklösung (%) durch Modifikation des Schwerkräfteinickers	7
Abbildung 7: Absackvorrichtung der PRISA Pilotanlage der Kläranlage Stuttgart-Mühlhausen	8
Abbildung 8: P-Entfernungsraten (Montag, 2008)	10
Abbildung 9: Veränderte TK Eindicker/Entwässerung und Effekt auf Schlammbehandlung (3 signifikante Stellen)	13
Abbildung 10: P-Stoffflussanalyse PRISA Verfahren (3 signifikante Stellen)	14
Abbildung 11: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette (2 signifikante Stellen)	15
Abbildung 12: Entfrachtungsleistung PRISA Verfahren (Endprodukt: Klärschlamm)	15
Abbildung 13: Transferkoeffizienten org. Spurenstoffe PRISA Verfahren ® und Entfrachtungsleistung (Endprodukt: Klärschlamm)	16

Abbildung 14: Ergebnis Güterflussanalyse PRISA	16
Abbildung 15: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente [kg bzw. g/kg P _{rückg.}] PRISA	17
Abbildung 16: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren).....	18
Abbildung 17: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation	20
Abbildung 18: P- und SM-Pfade gesamte Prozesskette	21
Abbildung 19: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung PRISA Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP).....	22
Abbildung 20: Upscaling Faktoren Investitionskosten PRISA.....	23
Abbildung 21: Produktspezifische Kosten PRISA; Variation Anlagengröße und erforderliche Investitionskosten	25
Abbildung 22: Kostenaufgliederung PRISA 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts) Variante 1 Neubau Gesamtanlage.....	26
Abbildung 23: Kostenaufgliederung PRISA 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts) Variante 2 bestehende Anlagenteile	26
Abbildung 24: Sensitivitätsanalyse PRISA.....	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter PRISA Verfahren	8
Tabelle 2: Nährstoff-, (Schwer-)metallgehalte und org. Spurenstoffe PRISA Endprodukt.....	10
Tabelle 3: Organische Spurenstoffe in PRISA Endprodukt.....	10
Tabelle 4: Löslichkeit in % bezogen auf P _{ges} (PRISA)	11
Tabelle 5: Löslichkeit in % bezogen auf P _{ges} (PRISA)	11
Tabelle 6: Flächenbedarf PRISA Verfahren	11
Tabelle 7: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential PRISA	13
Tabelle 8: Einsparungen Abwasserreinigung	14
Tabelle 9: Ressourcenbedarf PRISA und molare Masse Fällmittel	16
Tabelle 10: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf PRISA.....	16
Tabelle 11: Spezifischer Energiebedarf PRISA.....	16
Tabelle 12: Indirekte SM-Emissionen PRISA.....	18
Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand PRISA	18
Tabelle 14: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung PRISA.....	19
Tabelle 15: Transportwege PRISA.....	19
Tabelle 16: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente Prozesskette PRISA	19
Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette	20
Tabelle 18: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation...	21
Tabelle 19: Bewertung PRISA Endprodukt ®	22
Tabelle 20: Jahreskosten PRISA (Referenzkläranlage 100.000 EW).....	24
Tabelle 21: Einsparungen und Erlöse PRISA (Referenzkläranlage 100.000 EW).....	24
Tabelle 22: Spezifische Kosten PRISA (100.000 EW).....	24
Tabelle 23: Upscaling Investitionskosten PRISA Verfahren	24
Tabelle 24: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße.....	26
Tabelle 25: Jahreskosten gesamte Prozesskette PRISA Variante 1	27
Tabelle 26: Jahreskosten gesamte Prozesskette PRISA Variante 2	28



1 PRISA Verfahren

1.1 Grundlagen allgemein

Das PRISA Verfahren (Montag, 2008) ist ein einfacher Ansatz zur Rückgewinnung von P aus dem Schlammwasser und wurde im halbtechnischen Maßstab auf der Kläranlage Stuttgart-Mühlhausen umgesetzt. Dieses Verfahren wurde in erster Linie für die P-Rückgewinnung aus dem Schlammwasser des Voreindickers, Nacheindickers und der Entwässerung nach einer Faulung entwickelt. Durch entsprechende mechanische Vorbehandlung des Primär- und Überschussschlammes im Voreindicker wie Mischen und/oder längere Aufenthaltszeiten kann ein erhöhter Teil des biologisch gebundenen Phosphors in Lösung gebracht werden um diesen anschließend durch Zugabe von Mg-Fällmitteln als MAP rückzugewinnen. Eine ausschließlich biologische Phosphorentfernung (Bio-P) wird für das PRISA-Verfahren vorausgesetzt. Sämtliche Daten über dieses Verfahren stammen aus der Dissertation von Montag (2008) oder dem persönlichen Kontakt mit Montag. Bei der Fällung kann > 90 % des gelösten Phosphors rückgewonnen werden. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf ist das Rückgewinnungspotential stark von den Rücklöseprozessen abhängig und liegt im Bereich von 25 %.

1.1.1 Prozessskizze PRISA Verfahren

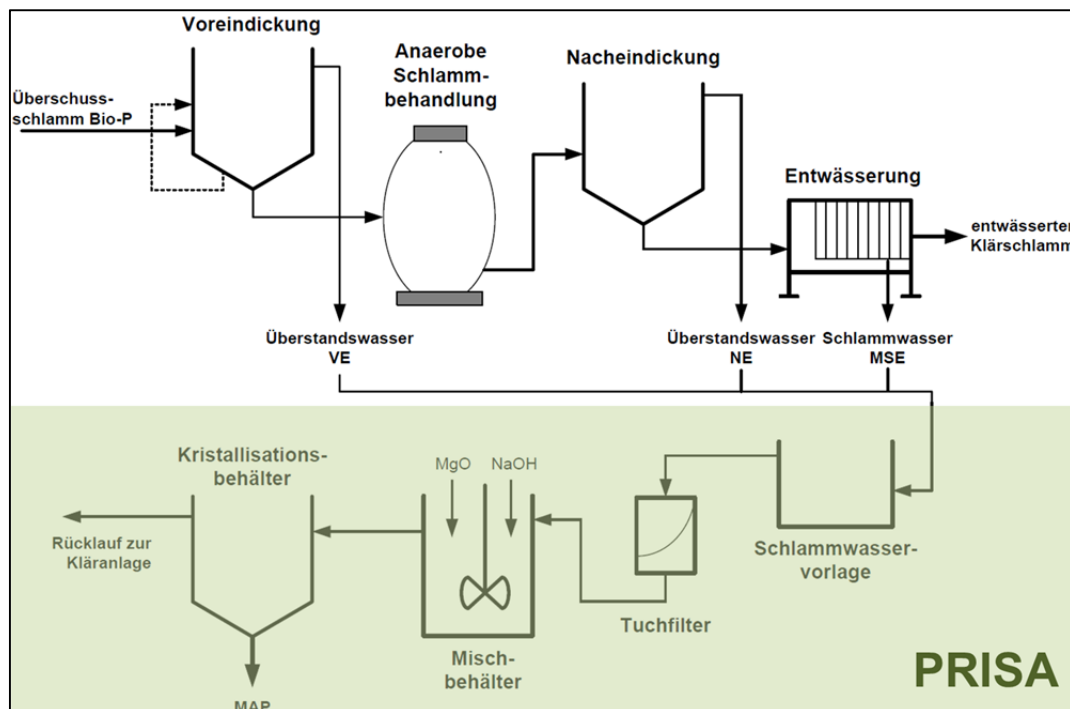


Abbildung 1: Prozessskizze Implementierung PRISA Verfahren auf Kläranlagen

1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell

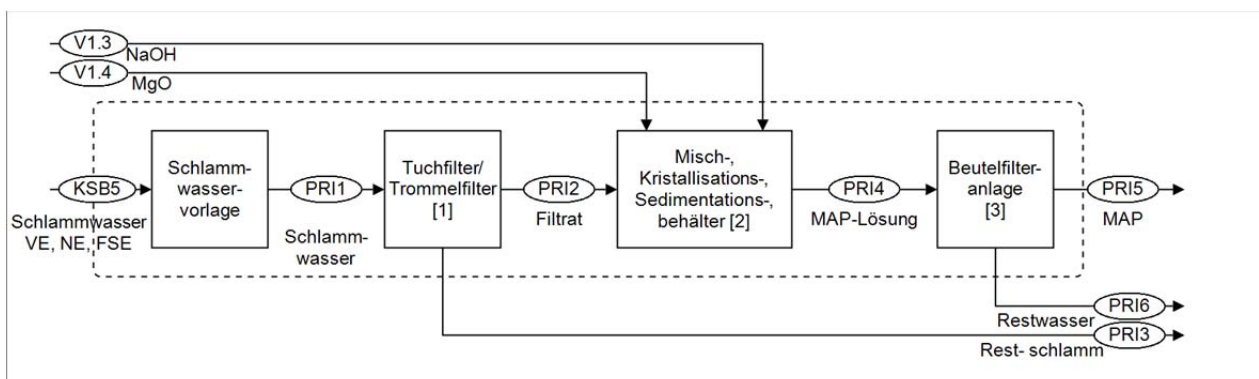


Abbildung 2: STAN Modell PRISA

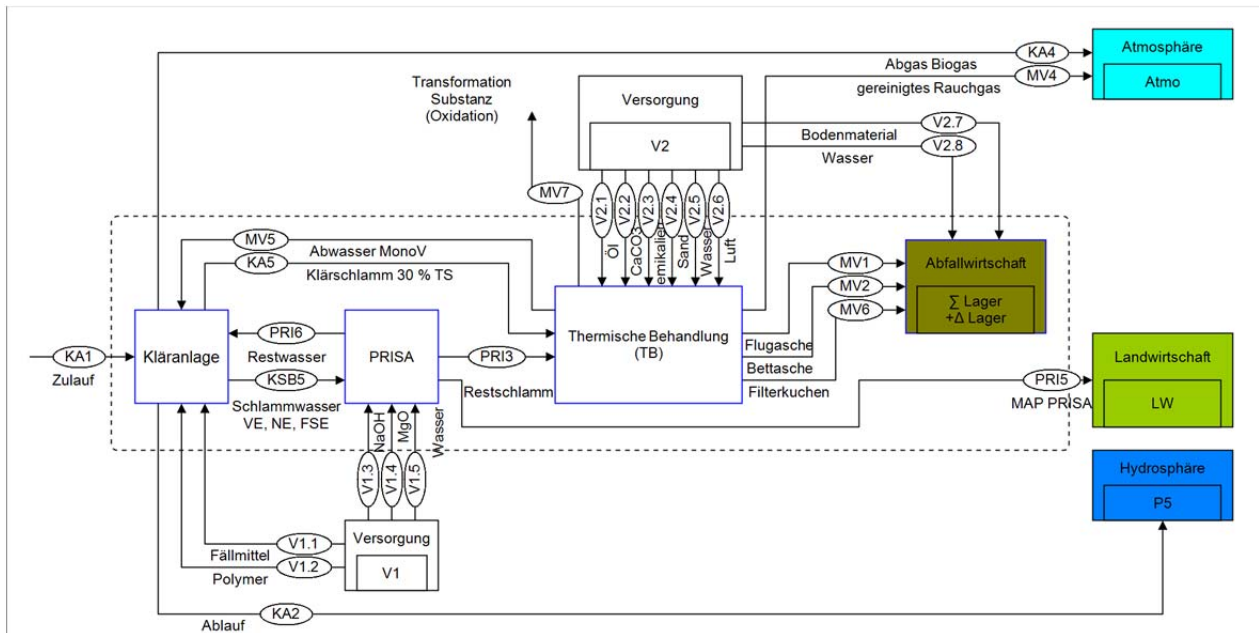


Abbildung 3: STAN Modell PRISA gesamte Prozesskette

1.1.3 Verfahrensbeschreibung

Rücklösung (im Prozess Kläranlage)

Die Rücklösung des Phosphors basiert auf der natürlichen Freisetzung des Polyphosphates zusammen mit modifizierten Bedingungen in dem mit Überschussschlamm beschickten Schwerkrafteindicker. Im Normalbetrieb eines Schwerkrafteindickers kann bereits die Freisetzung des Polyphosphates beobachtet werden. Das gelöste Phosphat ($\text{PO}_4\text{-P}$) verbleibt jedoch aufgrund des abnehmenden Durchlässigkeitsbeiwerts im absetzenden Schlamm in der flüssigen Phase der Schlammschicht. Eine höhere Konzentration mit gelöstem Phosphat ist daher im Überstandswassers nicht zu beobachten (Montag, 2008).

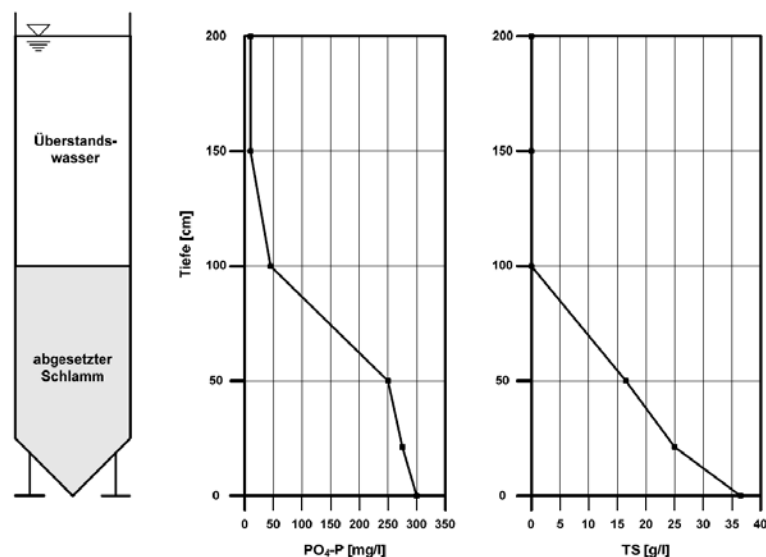


Abbildung 4: Phosphat- und Feststoffkonzentrationen in einem Ständeindicker nach 24 h (Montag, 2008)

Eine periodische vertikale Durchmischung des Eindickers ist nötig um eine Überführung des gelösten P in das Überstandswassers zu erreichen. Die notwendige Rührgeschwindigkeit liegt im Bereich von 150 – 1.600 U/min. Der Einfluss der Geschwindigkeit ist jedoch gering. Darüber hinaus müssen anaerobe Bedingungen im Eindicker herrschen. Montag (2008) zeigt, dass durch diese einfachen Veränderungen im Voreindicker die Konzentration an gelöstem Phosphat im Schlammwasser signifikant erhöht werden kann. Die Phosphatrücklösung kann in diesem Fall im Mittel von 1,9 % auf 21,6 % erhöht werden. Die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass Phosphatrücklösungen bis 28 % möglich sind (Abbildung 5).



Aufgrund verlängerter Aufenthaltszeiten und regelmäßiger Durchmischung kann die Phosphatrücklösung deutlich verbessert werden angehoben werden. Aus den 11 Versuchsreihen wird eine Rücklösung von 20 % im Voreindicker als realistisch angesehen und als Transferkoeffizient im Prozess Voreindicker festgelegt (Abbildung 6). Montag (2008) erwähnt, dass über einen langen Versuchszeitraum auch eine durchschnittliche Phosphatrücklösung von 22 % möglich ist. Üblicherweise wird die Eindickzeit zur Vermeidung von Rücklösungen auf einen Tag begrenzt. Rücklöseversuche zeigen, dass eine Aufenthaltszeit von drei Tagen mit zweimaliger Durchmischung eine optimale Einstellung für die Phosphatrücklösung ist. Zusätzliche Versuche mit Zugabe von vorgeklärtem Abwasser zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Rücklösung. Eine gesteigerte Rücklösung der Schwermetalle im Voreindicker kann durch den unveränderten pH Wert vernachlässigt werden (persönliche Mitteilung Svoldal (7.7.11))

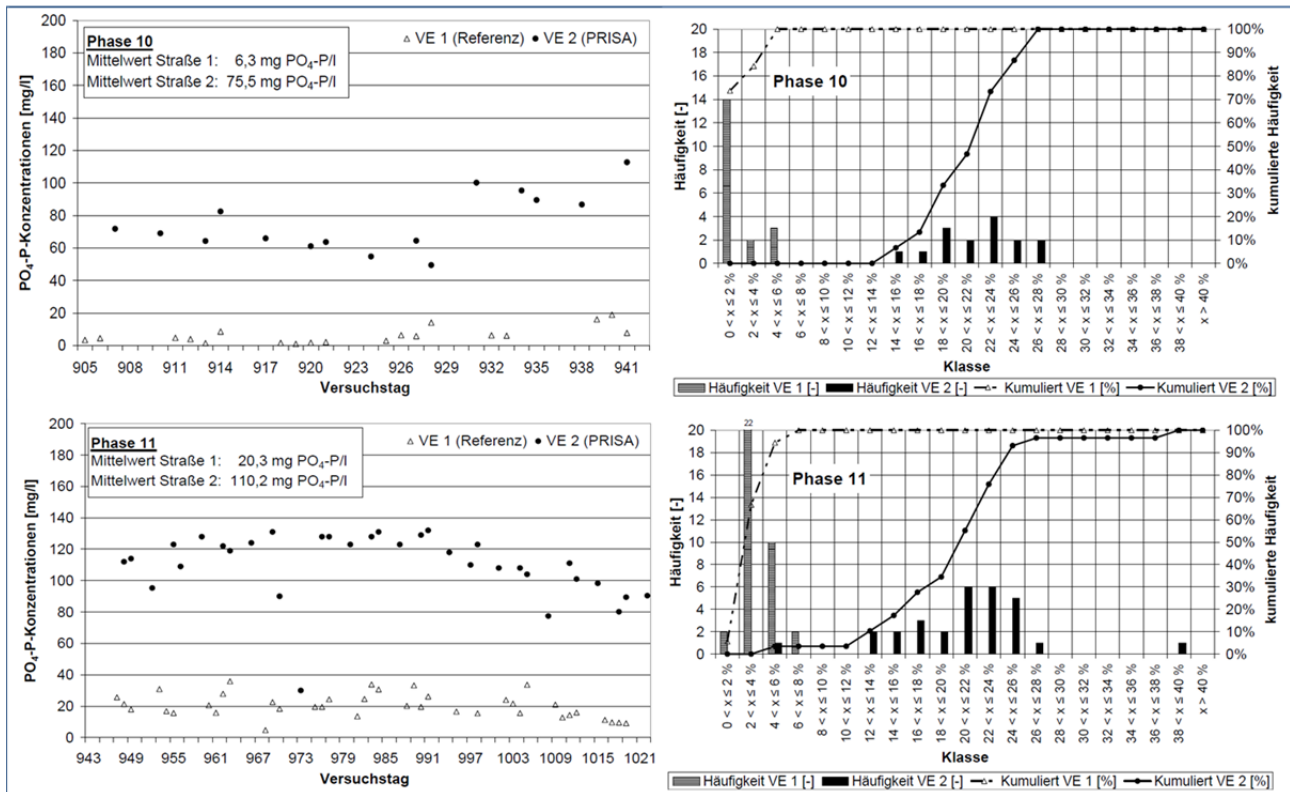


Abbildung 5: Links: Ergebnisse der Rücklöseversuche (PO₄-P Konzentration im Schlammwasser). Rechts: Häufigkeit der Rücklösequoten in %. VE 1 (Referenz), VE 2 (PRISA)

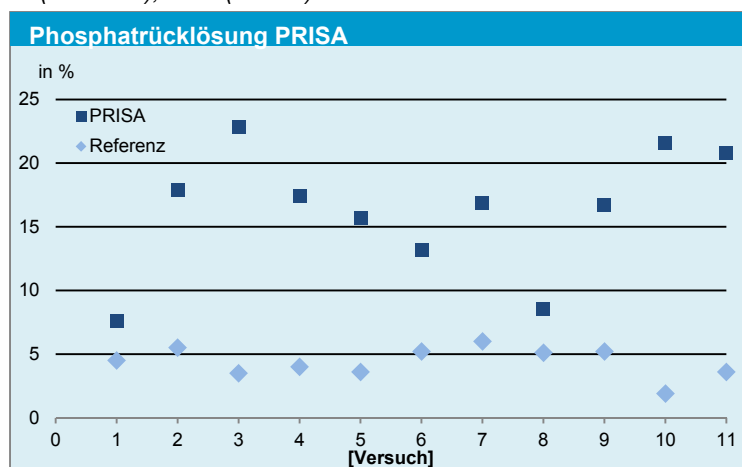


Abbildung 6: Mittlere Phosphatrücklösung (%) durch Modifikation des Schwerekräftedickers

Fest-Flüssigtrennung [1]

Über Tuch- bzw. Trommelfilter werden die noch vorhandenen Feststoffe aus dem Schlammwasser abgetrennt. Nicht gelöster Phosphor verbleibt im Schlamm, gelöster Phosphor gelangt über das Filtrat in die Kristallisationsbehälter. Schwermetalle verbleiben zum Großteil im Schlamm, da der pH-Wert während der

Eindickung nicht verändert wird. Es wird davon ausgegangen, dass 100 % des gelösten Phosphors die Filtereinrichtung passiert. Die P-reiche flüssige Phase gelangt in den Misch-, Kristallisation- und Sedimentationsbehälter. Dieser Schritt ist sehr wichtig um störende Feststoffe in der Fällung zu vermeiden.

MAP-Fällung [2]

Zur Fällung des Phosphors als Magnesium-Ammonium-Phosphat wird im ersten Schritt Natronlauge (NaOH) zur pH-Wertanhebung auf 9,5 in einen Rührbehälter zugegeben. Durch Zugabe von MgO fällt > 90 % des gelösten Phosphats als Endprodukt MAP aus. Das Mg:P Verhältnis wird auf 1,3 - 1,5:1 eingestellt. Die Reaktionszeit richtet sich nach der $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration (ca. 15 min bei 100 mg $\text{PO}_4\text{-P/L}$ bzw. ca. 45 min bei 50 mg $\text{PO}_4\text{-P/L}$). Absetzzeiten von 30 min sollten eingeplant werden.

Beutelfilteranlage [3]

In der nachgeschalteten Beutelfilteranlage wird das Restabwasser statisch vom MAP abtrennt (Abbildung 7). Gleichzeitig erfolgt eine Lufttrocknung des MAP wodurch Rücklösungen der Nährstoffe in der flüssigen Phase vermieden werden. Eine Entwässerung ist auch mit üblichen Kammerfilterpressen möglich.



Abbildung 7: Absackvorrichtung der PRISA Pilotanlage der Kläranlage Stuttgart-Mühlhausen

Das Restwasser wird in die Kläranlage zurückgeführt. Das gewonnene MAP kann direkt in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Während der Versuchsdurchführung wurden keine Schwermetallmessungen zur Erstellung von Bilanzen durchgeführt. Die Transferkoeffizienten für diesen Prozess werden aus dem Schwermetallgehalt im Schlammwasser der Referenzkläranlage und dem Endprodukt des PRISA Verfahrens berechnet.

Mögliche Betriebsprobleme

- Kapazität zur Zwischenlagerung des Überschussschlammes über 3 Tage
- Geruchsprobleme infolge der langen anaeroben Zwischenlagerung
- Schwankungen bei der P-Rücklösung -> Einfluss auf Magnesiumdosierung im Fällreaktor

1.1.4 Betriebsparameter PRISA Reaktor

Abgeleitet aus der Verfahrensbeschreibung können folgenden idealen Betriebsparameter definiert werden. (Tabelle 1).

Parameter	
Aufenthaltszeit Voreindicker	3 Tage
pH-Fällung	9,5
Mg:P	1,3-1,5:1
N:P	7-9:1
Dauer Fällung (h)	0,5-1

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter PRISA Verfahren



Über 90 % des gelöst im Schlammwasser vorliegenden Phosphors bildet schwerlösliche Salze und kristallisiert als MAP aus. Das MAP wird abgezogen und in Sackfiltern getrocknet.

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Sachbilanz

- Molares Verhältnis: Mg:P = 1,3-1,5:1 (++)
- Basenbedarf: 0,43 - 0,5 kg/kg P (+)
- Wasserbedarf: 0,05 m³/kg P (++)
- Energieaufwand: 0,2-0,5 kWh/EW*a (+)

In Fällprozessen zur MAP-Rückgewinnung wird Magnesium im stöchiometrischen Verhältnis Mg:P von 1,3 - 1,5:1 zugegeben. Der Basenbedarf wird von Montag (2008) mit ~0,5 kg NaOH/kg P_{rückg.} angegeben. Dieser Wert ist jedoch mit hohen Unsicherheiten behaftet, da der pH Wert des Schlammwassers abhängig von der Kläranlage stark schwanken kann und damit auch der Aufwand an Basen. Der Energiebedarf wird auf Basis der Kostenrechnung von Montag (2008) ermittelt. Die Kosten für Strom werden mit 4.000 - 5.000 €/a angenommen. Im Vergleich zum angenommenen Strompreis der Referenzanlage (0,1 €/kWh) wird von Montag (2008) ein Strompreis von 0,23 €/kWh angenommen. Unter dieser Annahme wird ein Stromverbrauch von rund 19.200 kWh/a oder rund 0,2 kWh/EW*a berechnet. Auf Basis der Energiekosten der Referenzkläranlage entspricht dies einem Stromverbrauch von ~45.000 kWh/a bzw. 0,45 kWh/EW*a

1.2.2 Stoffflussanalyse

Transferkoeffizient (TK) Voreindicker

Aufgrund der Rücklöseprozesse im Voreindicker wird der Transferkoeffizienten für P 5 auf 20 (+) geändert. Für Schwermetalle und org. Spurenstoffe wird keine Änderung der TK angenommen (+)

TK Entwässerung

Montag (2008) zeigt, dass trotz der vorangegangenen erhöhten Rücklösung im Voreindicker auch im Faulturm noch signifikante Rücklösungen stattfinden. Anhand einer P-Bilanz der von Montag (2008) betrachteten Kläranlage wird ein TK von 15 angenommen. TK für Schwermetalle und org. Spurenstoffe bleiben unverändert.

TK P-Fällung

Der Wirkungsgrad der P-Entfernung ist von der Konzentration an gelöstem PO₄-P, dem Stickstoff zu Phosphorverhältnis und dem pH-Wert abhängig (Abbildung 8). Im pH-Bereich von 8,5 – 10,5 kann > 90 % des P entfernt werden (TK für P = 90) (+). Hinsichtlich des Verhaltens von Schwermetallen während der Fällung liegen keine Daten vor. Anzunehmen ist, dass die gelösten Schwermetalle bei diesem pH Wert ebenfalls ausgefällt werden. 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.

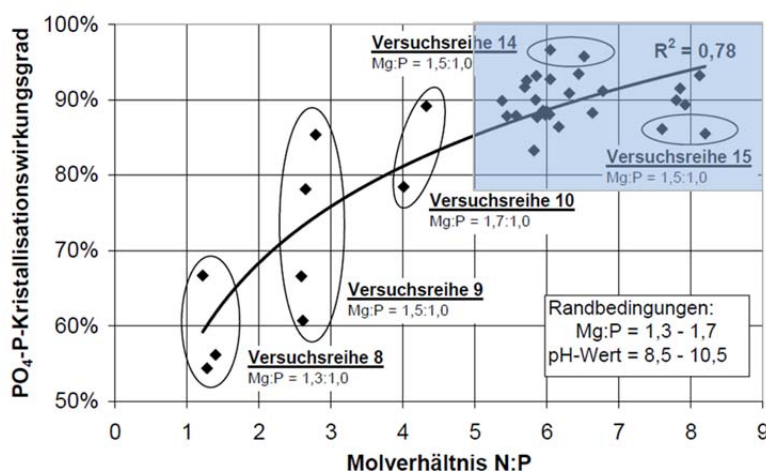


Abbildung 8: P-Entfernungsraten (Montag, 2008)

1.2.3 Charakteristik Endprodukt

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

Magnesiumoxid (MgO) wird im PRISA-Verfahren als Fällmittel zur MAP Erzeugung eingesetzt. Der P-Gehalt liegt im Bereich von 9,3 % und damit, so wie auch der Stickstoffgehalt deutlich unter den Gehalten eines reinen MAP. Grund dafür ist die nicht selektive Fällung des Phosphors als MAP. Beim PRISA Endprodukt wird deutlich, dass neben den MAP auch verschiedene Calciumphosphate gebildet werden, die zum einen den niedrigen Stickstoffgehalt und den hohen Calciumgehalt erklären. Unabhängige Laborversuche bestätigen, dass die Schwermetallgehalte sowohl deutlich unter den rechtlich vorgegebenen Grenzwerten als auch deutlich unter den Schwermetallgehalten vergleichbarer Mineraldünger liegen (++). Das PRISA Endprodukt wurde ausführlich auf org. Spurenstoffe untersucht. Zahlreiche Stoffe die z.B. im Klärschlamm nachweisbar sind wie z.B. verschiedenen Organozinnverbindungen oder Moschusverbindungen sind im MAP nicht oder nur vereinzelt nachweisbar. Ein Auszug der Ergebnisse ist in Tabelle 3 dargestellt (+). Aufgrund der Prozessführung und Erfahrungswerte anderer Verfahren (Ostara, DHV Crystalactor) sind keine hygienischen Bedenken zu erwarten (+).

	Nährstoffe [g/kg TS]	Schwermetalle [mg/kg TS]	Org. Spurenstoffe [mg/kg TS]
P	93	As 1,8	AOX 84
N	12	Cd 12	PAK <0,410
Mg	150	Cr 12	PCDD/F -
Ca	100	Cu 93	LAS <0,1
K	-	Hg 0,15	NPE 3,2
Metalle [mg/kg TS]		Ni 6,7	Bisphenol A/B 0,165
Al	2.010	Pb 13	6 DIN PCB 0,109
Fe	3.100	Zn 403	

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

Moschusverbindungen [mg/kg TS]		Organozinnverbindungen [mg/kg TS]		Tenside [mg/kg TS]	
Cashmeran	<0,05	Monobutylzinn	<0,01	LAS	<0,1
Celestolid	<0,05	Dibuylzinn	0,013	Nonylphenol	0,42
Phantolid	<0,05	Tribuylzinn	0,022	Nonylphenoethoxylate	3,2
Traseolid	<0,05	Tetrabutylzinn	<0,01	PAK [mg/kg TS]	
Tonalid	<0,05	Monooctylzinn	<0,01	Chrysen	0,025
Moschus Xylol	<0,05	Doctylzinn	<0,01	Benzo(a)pyren	0,02
Moschus Keton	<0,05	Triphenylzinn	<0,01	Summe PAK 10	<0,254
Galaxolid	<0,05	Tricyclohexylzinn	<0,01	Summe PAK 16	<0,410

Tabelle 3: Organische Spurenstoffe in PRISA Endprodukt



1.2.3.2 P-Löslichkeit

Es handelt sich beim Endprodukt um eine Mischung aus Magnesiumammonium- und Calciumphosphaten. Dieses Produkt weist eine geringe Wasserlöslichkeit (2 %) und eine 100 %ige Zitronenlöslichkeit auf. In Topfversuchen kann eine vollständige Aufnahme über die Pflanzen nachgewiesen werden (++) (Römer, 2006).

Tabelle 4: Löslichkeit in % bezogen auf P_{ges} (PRISA)

Extraktionsmittel	Löslichkeit [%]
Wasser	2
Zitronensäure	100
Ameisensäure	-
Mineralsäure	-
Ammoncitrat	-

Tabelle 5: Löslichkeit in % bezogen auf P_{ges} (PRISA)

1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Das MAP Endprodukt erfüllt die Anforderungen der Düngemittelverordnung. Allerdings weist das Endprodukt nicht jene Eigenschaften auf, die z.B. für eine direkte Ausbringung in der Landwirtschaft erforderlich sind. Eine Eingliederung als Sekundärrohstoffquelle in der Phosphorindustrie erscheint möglich. Die MAP-Teilchen haben zu Beginn durchschnittlich einen Durchmesser von 7 µm, dieser steigt nach mehrtägiger Lagerung auf ca. 25 µm an. Das MAP kann im Anschluss an den Reaktor in den Absackvorrichtungen luftgetrocknet werden (Abbildung 7). Eine zusätzliche Trocknung bei max. 40°C kann zur Abspaltung des Kristallwassers angestrebt werden. Das Endprodukt kann überdacht problemlos gelagert werden.

1.2.3.4 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus PRISA Verfahren

Keine

1.2.4 Umsetzung

Das PRISA Verfahren wurde als Pilotanlage auf der Kläranlage Stuttgart-Mühlhausen betrieben. Ob das Verfahren noch betrieben wird ist nicht bekannt. Nach derzeitigem Wissenstand erfolgte auch keine großtechnische Umsetzung.

1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage

Im Idealfall können bestehende Eindicker einer Kläranlage modifiziert und für das PRISA Verfahren verwendet werden. Ist dies nicht möglich, muss ein zusätzlicher Eindicker errichtet werden. In beiden Fällen ist der Platzbedarf für die Fällung des MAP (Reaktor, Lagerbehälter für Fällmittel und Lauge) und die Beutelfilteranlage (Abpackvorrichtung, Lagerfläche) erforderlich. Die klimatischen Bedingungen erfordern eine überdachte und geschlossene Bauweise wie z.B. eine Halle (+).

Anlagenteile	Flächenbedarf
2 Eindicker (bei Neuerrichtung)	600 m ²
2 MAP Reaktoren	200 m ²
Maschinenhaus	200 m ²

Tabelle 6: Flächenbedarf PRISA Verfahren

1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Für die Erfassung der Investitionskosten muss zwischen zwei Varianten der Umsetzung unterschieden werden. Zum einen kann das PRISA Verfahren unter der Voraussetzung installiert werden, dass die modifizierten Voreindicker neu gebaut werden müssen (Variante 1), oder bereits bestehen Voreindicker nur für die P-Rückgewinnung modifiziert werden können (Variante 2). Für Variante 1 sind für eine Umsetzung auf einer Kläranlage mit 100.000 EW Kosten von 1,6 Mio. € zu erwarten, während für Variante 2 rund 1,15 Mio. € und damit bei rund 70 % der ursprünglich veranschlagten Kosten zu erwarten sind (++) . Aufgrund des wartungsarmen Betriebes werden die Wartungskosten mit 1 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand ist gering und kann mit 0,5 MA/Jahr angenommen werden. Unter Sonstiges

sind Kosten in Höhe von 7.000 € für Beutelfilter und Tuchfilter enthalten (++). Chemikalien- und Energiekosten können aus den Güterfluss- bzw. Energieflussanalysen abgeleitet werden.



1.3 Ergebnis PRISA Verfahren

1.3.1 Technologie Bewertung

Das PRISA Verfahren ® lässt sich einfach im Schlammwasserstrom von bestehenden Kläranlagen mit biologischer P-Elimination implementieren. Hinsichtlich der Komplexität, kann die Modifikation des Voreindickers, die Fest/Flüssigtrennung mit Tuchfilter und die Fällung des gelösten Phosphors als einfach eingestuft werden. Lediglich im Falle eines Neubaus des Voreindickers sind komplexere Baumaßnahmen vor einer Implementierung erforderlich. Bisher wurde dieses Verfahren im Pilotmaßstab bzw. halbertechnisch umgesetzt. Das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf ist mit ~ 25 % mäßig.

Anlagenteile	
Entwicklungsstand	Halbtechnisch/Pilotanlage
Komplexität Technologie	Einfach, mechanische Rücklösung, anschließende Fällung
Implementierung	Nebenstrom, Schlammwasser
Wartungsaufwand	gering
Schlammbehandlung	Modifizierter Voreindicker, Faulung
Effektivität des Verfahrens	> 90 %
Potential bezogen auf KA-Zulauf	~25 %
Qualitativer Ressourcenaufwand	NaOH, MgO, Energie (elektrisch)
Abfallstoffe	keine
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 7: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential PRISA

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

Infolge der modifizierten Voreindickung kann die Rücklösung von 5 auf bis zu 20 % (+) erhöht werden. Gleichzeitig wird aber während der Faulung immer noch ein großer Anteil von rund 15 % rückgelöst (+).

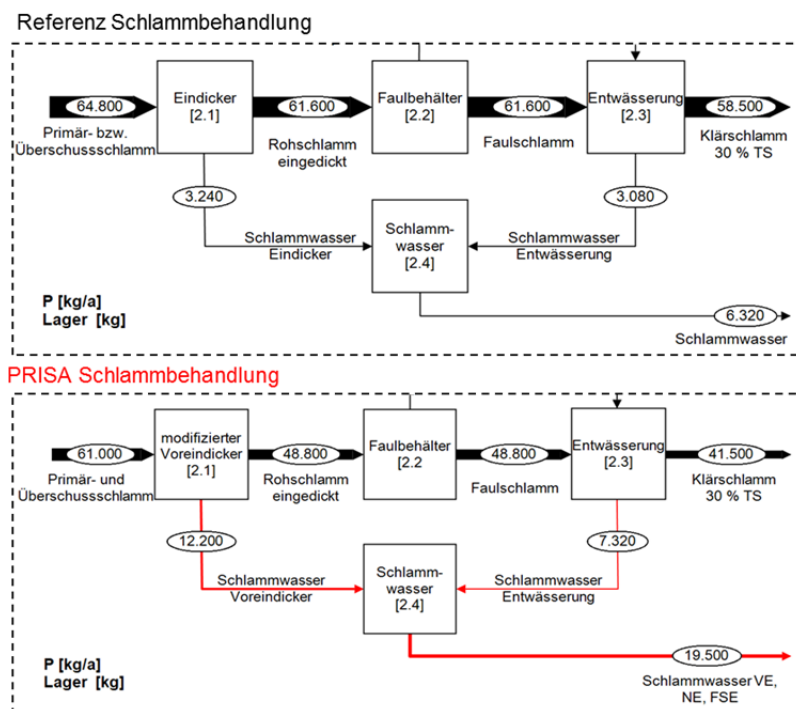


Abbildung 9: Veränderte TK Eindicker/Entwässerung und Effekt auf Schlammbehandlung (3 signifikante Stellen)

Damit ist eine gelöste P-Fracht von rund 19.500 kg/a für die Rückgewinnung verfügbar. Unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 90 % bei der Fällung können 17.600 kg P rückgewonnen werden, womit jährlich 189.000 kg MAP anfallen (P-Gehalt im MAP = 9,3 %). Damit liegt das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf bei rund 27 %. Der Reaktorablauf mit einer P-Fracht von rund 2.000 kg P gelang zurück in den Kläranlagenzulauf. Der N-Gehalt im Endprodukt beträgt 2 % und entspricht einer jährlichen Fracht von 2.300 kg N die aus dem Schlammwasser entfernt werden.

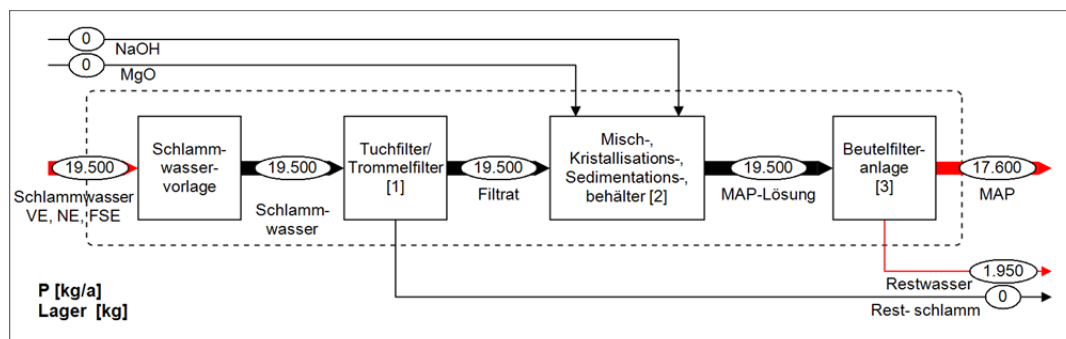


Abbildung 10: P-Stoffflussanalyse PRISA Verfahren (3 signifikante Stellen)

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 PRISA auf 1.900 kg P reduziert werden. Zusätzlich wird die Stickstoffrückbelastung um 2.300 reduziert. Infolge der verringerten P-Rückbelastung wird der Schlammanfall um 2 % und damit auch die Entsorgungskosten reduziert.

	Reduktion [kg/a]	[€/kg Nährstoff] bzw. [€/t KS TS]	Einsparung [€/a]
Phosphor (P)	4.400		10.300
Stickstoff (N)	2.300	0,75	1.725
Schlammanfall	29.500	290	8.600
Gesamt			38.310

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.

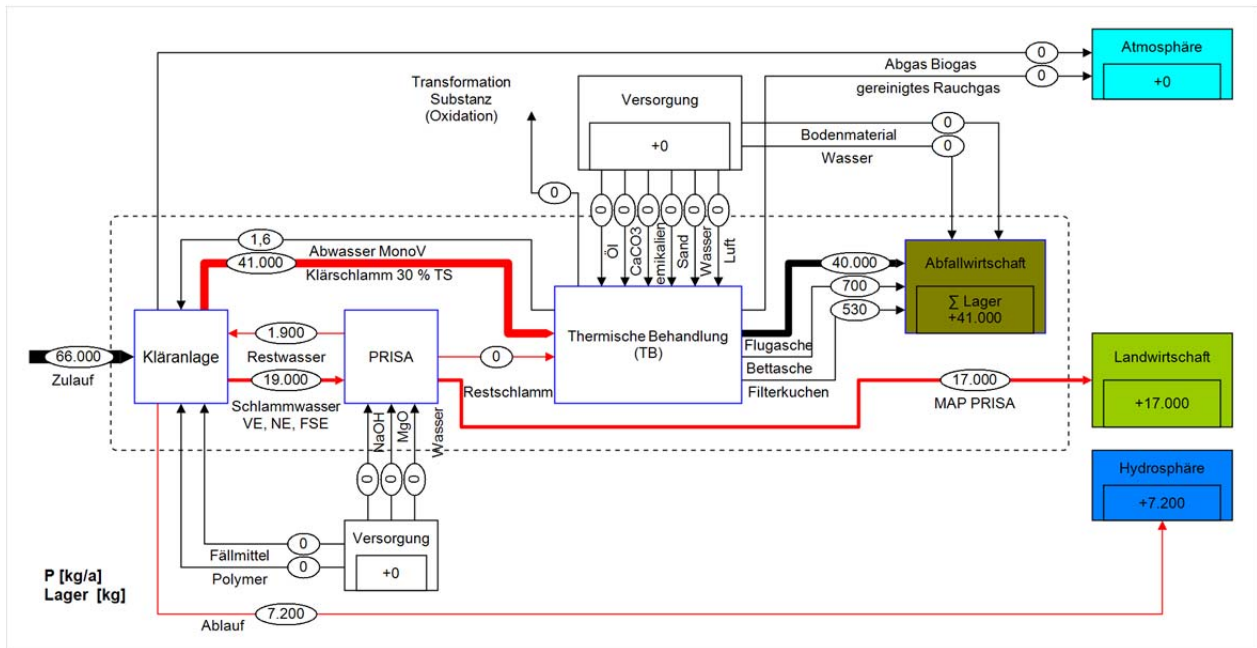


Abbildung 11: Stoffflussanalyse P: Gesamte Prozesskette (2 signifikante Stellen)

1.3.2.3 Stoffflussanalyse SM

Transfer Schwermetalle und org. Spurenstoffe

Die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle und organische Spurenstoffe werden aus den Frachten im Schlammwasser der Referenzkläranlage und den Frachten im Endprodukt aus der Literatur ermittelt. Die Schwermetallfracht im Schlammwasser ist bereits auf aufgrund der Veränderung der Transferkoeffizienten in Folge der Rücklösung in der Faulung mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Das bedeutet, dass die Transferkoeffizienten für die Schwermetalle im PRISA Verfahren zum einen von der Unsicherheit der Rücklösung der Schwermetalle in der Schlammlinie und den Schwermetallgehalten des Endproduktes abhängig sind. Folglich müssen für Schwermetalle erhöhte Unsicherheit hinsichtlich der SM-Transferkoeffizienten im Reaktor angenommen werden.

1.3.2.4 Entfrachtungsleistung

Auf Basis der anfallenden Endproduktmenge von 189.000 kg und den mittleren Gehalten an Schwermetallen und organischen Spurenstoffen werden die Frachten im Endprodukt und damit eine Entfrachtung in Relation zum Referenzklärslamm errechnet.

	Zulauf [kg/a]	Endprodukt [kg/a]	Rückgewinnung bzw. Entfrachtung [%]	Entfrachtung rel zu P. [%]
P	65.700	17.560	27	
As	10	0,1	99	97
Cd	3	0,3	81	48
Cr	70	2,3	97	92
Cu	550	14,3	97	91
Hg	1,5	0,03	98	94
Ni	120	1,9	97	92
Pb	90	2,5	97	93
Zn	2.300	76	95	87

Abbildung 12: Entfrachtungsleistung PRISA Verfahren (Endprodukt: Klärschlamm)

	Gehalt [mg/kg TS]	Fracht [kg/a]	Fracht in Klärschlamm [kg/a]	Entfrachtung [%]	Entfrachtung rel zu P. [%]
AOX	84	16	212	93	79
NPE	0,5	0,1	65,7	99,9	99,6
LAS	<0,1	0	10.950	100	100
Bisphenol A	0,17	0,03	2	99	96

Abbildung 13: Transferkoeffizienten org. Spurenstoffe PRISA Verfahren ® und Entfrachtungsleistung (Endprodukt: Klärschlamm)

1.3.2.5 Ergebnisse Güterflussanalyse

Magnesium, als limitierendes Element für Fällung des gelösten Phosphors, wird als MgO im P:Mg Verhältnis von 1:1,5 zu dosiert. Die für die jährliche P-Inputfracht von 19.500 kg notwendige MgO-Menge liegt bei 38.100 kg/a. Anzumerken ist, dass MgO nicht in der GEMIS Datenbank aufscheint, weshalb statt des MgO, MgCl_2 als Fällmittel herangezogen wird. Aus der Umrechnung ergibt sich ein MgCl_2 – Bedarf von rund 89.900 kg. Natronlauge wird zur pH-Wert Einstellung von 9,5 im Ausmaß von 8.800 kg/a zugegeben. Es fallen rund 189.000 kg des Endproduktes an. Der extern zugeführt Wasserbedarf liegt bei rund 1.300 m³/a.

Fällmittelbedarf [kg/a]	
Input P	19.500
Mg Bedarf	15.300
Mg Bedarf 1,5:1	23.000
MgO [100 %]	38.100
Basenbedarf [kg/a]	
NaOH [100 %]	8.800

Molare Masse [u]	
P	30,97
Mg	24,30
O	15,99

Magnesiumoxid:
MgO
Wasseranteil: 0 %
Molare Masse: 40,3

Tabelle 9: Ressourcenbedarf PRISA und molare Masse Fällmittel

	Produktspez. [kg P _{rückg.}]	Einwohnerspez. [EW*a]
MgO [100%]	2,2	0,4
NaOH [100 %]	0,5	0,09
Wasser	0,07	0,01
Endprodukt	10,8	1,9

Tabelle 10: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf PRISA

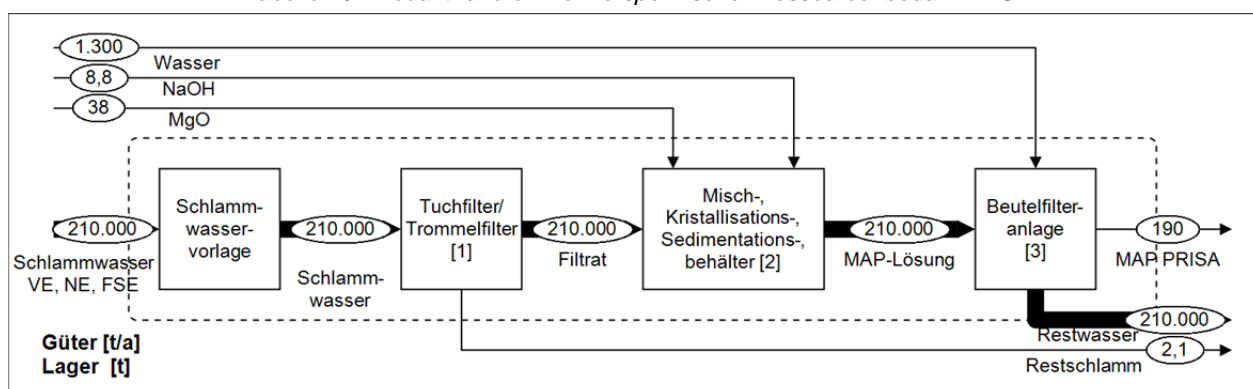


Abbildung 14: Ergebnis Güterflussanalyse PRISA

1.3.2.6 Ergebnisse Energieflussanalyse

Auf Basis der Kostenkalkulation von Montag (2008) wird im Fall der Implementierung des PRISA Verfahrens auf der Referenzkläranlage ein jährlicher Bedarf an elektrischer Energie von rund 45.000 kWh ermittelt (Tabelle 11). Möglich ist, dass der zusätzliche Energiebedarf aufgrund der periodischen Rührvorgänge geringer als bisher angenommen werden kann. Bezogen auf die Referenzkläranlage mit einem Gesamtenergiebedarf von 23,15 kWh/EW*a beträgt der zusätzliche Energieaufwand für den Betrieb rund 2 - 3 %.

	Produktspez. [kg P _{rückg.}]	Einwohnerspez. [EW*a]
kWh	2,56	0,45

Tabelle 11: Spezifischer Energiebedarf PRISA



1.3.2.7 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Auf Basis der Annahme einer Implementierung des PRISA Verfahrens auf der definierten Referenzkläranlage, der Ergebnisse der Güterflussanalyse und der indirekten Emissionen der notwendigen Ressourcen (GEMIS-Datenbank) kann ein jährlicher Ausstoß an CO₂-Äquivalenten bzw. SO₂-Äquivalenten 190.400 kg bzw. 990 kg ermittelt werden. Die Emissionen bezogen auf 1 kg P_{rückg.} sind aus Abbildung 15 zu entnehmen. Aus dem Prozess sind keine direkten gasförmigen Emissionen zu berücksichtigen. Dominierende Emissionsquelle ist das Mg-Fällmittel.

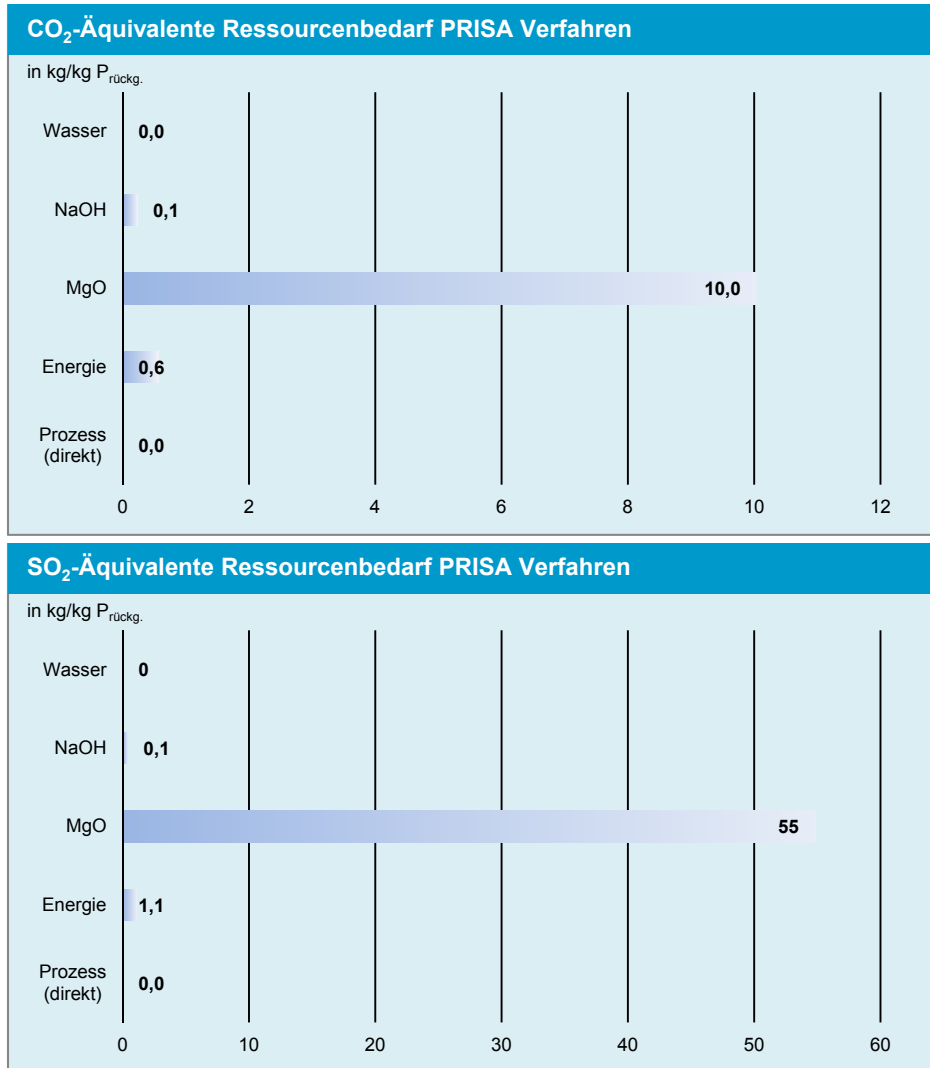


Abbildung 15: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente [kg bzw. g/kg P_{rückg.}] PRISA

1.3.2.8 Indirekte Schwermetallemissionen PRISA

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	0,076	0,0000024
Cd	0,04	0,0000059
Cr	0,17	0,0000059
Cu	-	-
Hg	-	0,000003
Ni	0,07	-
Pb	0,19	0,000039
Zn	-	-
AOX	-	-
PAK	0,000048	-
PCDD/F	0,000001	-

Tabelle 12: Indirekte SM-Emissionen PRISA

1.3.2.9 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	635.900	6,4	36,2
Elektrische Energie	86.200	0,9	4,9
Gesamt	722.100	7,2	41,1

Tabelle 13: Kumulierter Energieaufwand PRISA

Abbildung 16 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen.

Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren



Abbildung 16: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)



1.3.3 Ganzheitliche ökologische Bewertung PRISA

Die Implementierung des PRISA 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 (-10%)	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 und N Rückbelastung	Kosten Abwasserreinigung, Schlammanfall, Transport Klärschlamm,
Verringerter Schlammanfall (-2%)	Energieausbeute Verbrennung, Ascheanfall, Transportkosten, Entsorgungskosten, Ressourcenaufwand Verbrennung
Ressourcenaufwand PRISA	Indirekte Emissionen, Kosten
MAP-Produktion	Kosten (Erlöse)

Tabelle 14: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung PRISA

Berücksichtigung Transport

Infolge des verringerten Klärschlammmanfalles (-2 %) 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 – MonoV	4.726	661.700	0,93
Flug- und Bettasche - Reststoffdeponie	716	71.600	0,10
Filterkuchen - Untertagedeponie	32	29.100	0,04
Gesamt Transport		762.400	1,07

Tabelle 15: Transportwege PRISA

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation kann eine Zunahme der treibhausrelevante Gase (+49 %), sowie der Gase mit Versauerungspotential (+76 %) ermittelt werden (Tabelle 16). Infolge des verringerten Schlammanfalles sinken die zu transportierende Schlammfracht, der Rohstoffbedarf bei der Verbrennung und die zu entsorgenden Reststoffe. Ähnlich verhält es sich beim kumulierten Energieaufwand. Die Zunahme beträgt +51 % in Relation zur Referenzsituation. (Tabelle 17).

CO ₂ -Äquivalente	[kg]	[CO ₂ -Äquiv./EW*a]
PRISA	542.900	5,4
Referenz	368.600	3,7
Δ	+47%	
SO ₂ -Äquivalente	[kg]	[SO ₂ -Äquiv./EW*a]
PRISA	2.200	0,022
Referenz	1.260	0,013
Δ	+75%	

Tabelle 16: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente Prozesskette PRISA

1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA	Rohstoffe	Energie	[kWh/EW*a]
Kläranlage	631.800	1.006.000	16,7
PRISA	635.900	86.200	7,2
Monoverbrennung	145.700	946.600	10,9
Deponie	13.100*		0,1
Transport	130.700**		1,3
Gesamt	3.595.900		36,0
Substitution Strom	-481.800		4,8
Substitution Wärme	-1.317.000		13,2
Substitution P+N-Dünger	-123.400		1,2
Gesamt	1.673.700		17,1
Referenz	1.131.700		11,3
Δ	+48%		

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

Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

In Abbildung 16 werden die ökologisch relevanten Bewertungsparameter CO₂- und SO₂-Emissionen sowie der kumulierte Energieaufwand in Relation zur Referenzsituation zusammenfassend bezogen auf EW*a dargestellt. Die ökologische Bewertung verdeutlicht, dass infolge der Implementierung des PRISA Verfahrens, Steigerungen der CO₂ bzw. SO₂-Emissionen zu erwarten sind.

Systemgrenze gesamte Prozesskette

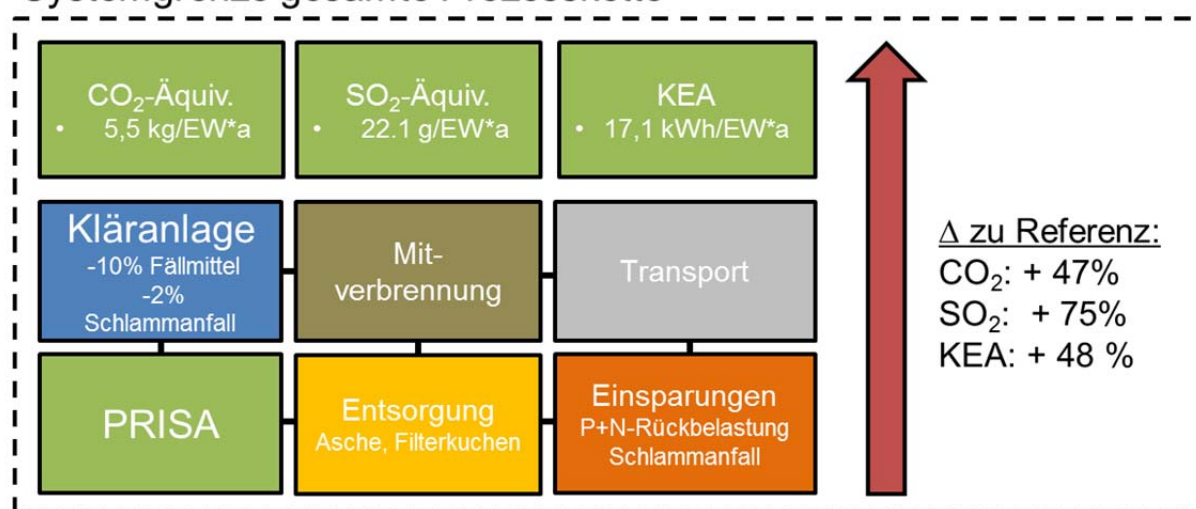


Abbildung 17: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation

1.3.3.3 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 18. Die Phosphorbilanz verdeutlicht, dass in Relation zum P-Input einer Kläranlage mit dem PRISA Verfahren rund 25 – 30 % 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 PRISA Verfahrens, 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 nur in geringem Ausmaß nachweisbar, womit auch nur eine sehr geringe Fracht an Spurenstoffen über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

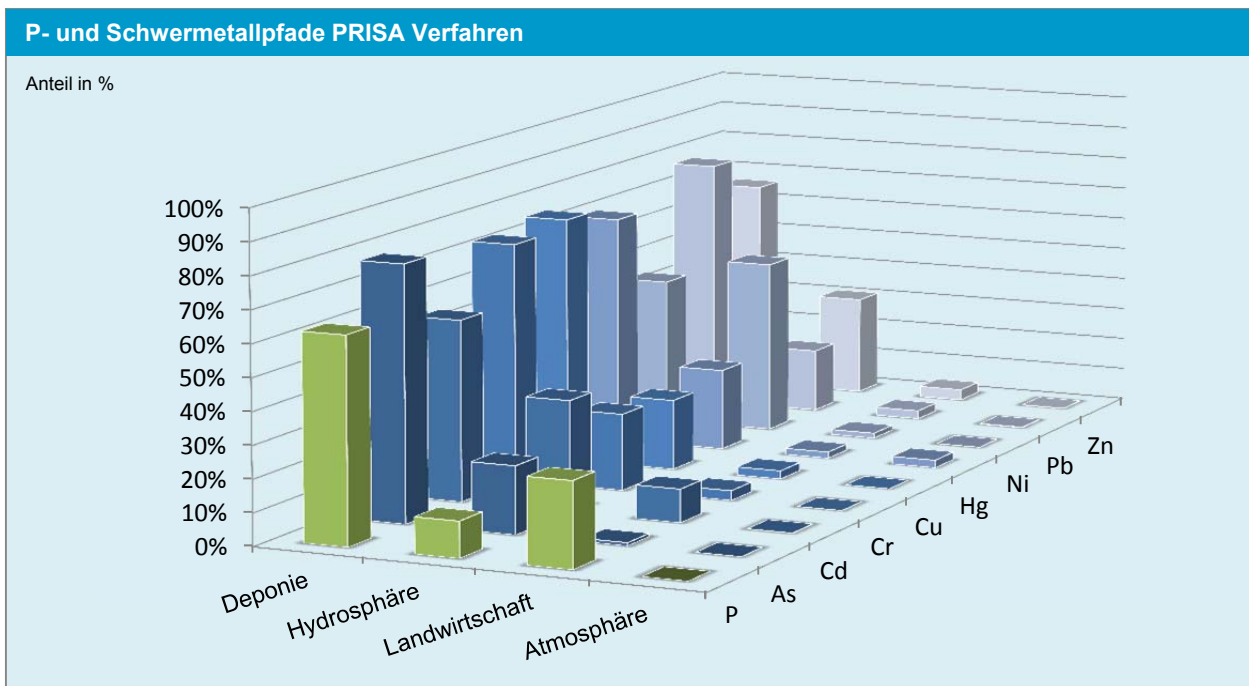


Abbildung 18: P- und SM-Pfade gesamte Prozesskette

1.3.3.4 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 PRISA 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 (Tabelle 18).

Emissionen Gesamt	Atmosphäre [g/a]	Δ Referenz [%]	Hydrosphäre [kg/a]	Δ Referenz [%]
As	8,1	-4,0	2,1	2,3
Cd	4,9	5,4	1,21	0,13
Cr	45,9	-0,95	25,87	-0,09
Cu	-	-	-	-
Hg	-	-	0,48	-1,4
Ni	61,9	1,7	-	-
Pb	129,7	-0,45	24,95	0,58
Zn	-	-	-	-
AOX	-	-	338,7	0,0
PAK	0,15	-0,15	-	-
PCDD/F	0,000001	-	-	-

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

1.3.3.5 Ergebnis Endprodukt

Das Endprodukt kann nicht eindeutig klassifiziert werden. Neben den gewünschten MAP Ausfällen werden aufgrund der Anwesenheit von weiteren Fällionen wie z.B. Calcium auch Calciumphosphate gebildet. Dies wird deutlich am hohen Calciumgehalt im Endprodukt. Magnesium ist deutlich erhöht, während Stickstoff für ein MAP mit 1,1 nur zu einem sehr geringen Anteil im Endprodukt nachweisbar. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass primär Magnesiumphosphate und keine Magnesiumammoniumphosphate gebildet werden. Grund dafür könnte der doch hoch eingestellte pH-Wert von 9,5 sein, bei dem vorzugsweise Magnesiumphosphate gebildet werden. Hinsichtlich der Schwermetalle kann gezeigt werden, dass ein Schadstoffarmes Produkt erzeugt wird. Im Vergleich zu einem handelsüblichen Dünger können vor allem Cu und Zn in höheren Konzentrationen nachgewiesen werden (Abbildung 19). In Bezug auf die Düngemittelverordnung liegen die SM-Konzentrationen deutlich unter den geforderten Grenzwerten.

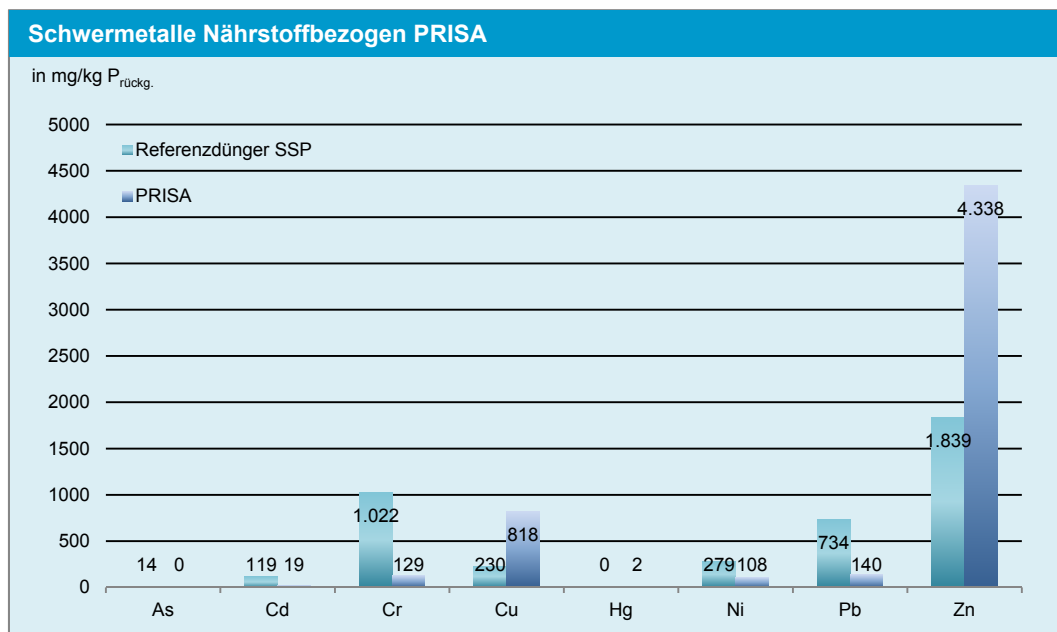


Abbildung 19: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung PRISA Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)

Bewertung Endprodukt	PRISA	SSP
Löslichkeit	Gut	Sehr Gut
Düngewirksamkeit	Gut/Sehr Gut	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	291	230
Anorganische Verunreinigungen		
SM:P [mg Cd/kg P]	18,9	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,07	1,26
Referenzbodenmethode [*]	9.100 (Ni*)	1.450 (Cd*)
Tolerierbare Menge bezogen auf Cd	0,7	-
Organische Verunreinigungen		
Keine organische Spurenstoffe	3	5
Keine hygienischen Bedenken	5	5
Handhabung		
Einfache Lagerung möglich	5	5
Direkter Einsatz in LW möglich	5	5

Tabelle 19: Bewertung PRISA Endprodukt ®

Das Cd:P Verhältnis ist mit 18,9 mg Cd/kg P gering und liegt deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Das Schadeinheitenmodell und die Referenzbodenmethode verdeutlichen die geringen Gehalte an Schwermetallen. Theoretisch kann das PRISA Endprodukt rund 9.100 Jahre aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. In diesem Fall ist Ni das limitierende Element. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, ergibt



sich die interessante Konstellation, dass das Endprodukt im Vergleich zum SSP schlechter abschneidet und im Vergleich dazu weniger häufig aufgebracht werden kann (Faktor 0,7). Warum dieser hohe Cd-Gehalt zustande kommt, ist unklar. Während organische Spurenstoffe wie Moschusverbindungen gar nicht nachweisbar sind, können einzelne Spurenstoffe wie z.B. AOX oder LAS in geringen Konzentrationen im Endprodukt nachgewiesen werden (++) . Hygienische Bedenken sind nach Angaben des Herstellers keine gegeben (+). Aufgrund der Verfahrenstechnik (Fällung) fällt ein kristallines pulverförmiges Endprodukt an, das vor einer Ausbringung zumindest pelletiert werden muss. Lagerbar ist das Endprodukt allemal.

1.3.4 Ökonomische Bewertung

1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten PRISA

Wesentliche Voraussetzung für größenabhängige Kostenkalkulationen ist die Annahme und Festlegung von Up- und Downscalingfaktoren. Auf Basis der vorliegenden Investitionskosten für den Ausbau des PRISA Verfahrens auf einer 100.000 EW Anlage wird eine Beziehung zur Ausbaugröße, den entsprechenden Kosten und dem rückgewinnbaren P-Potential hergestellt.

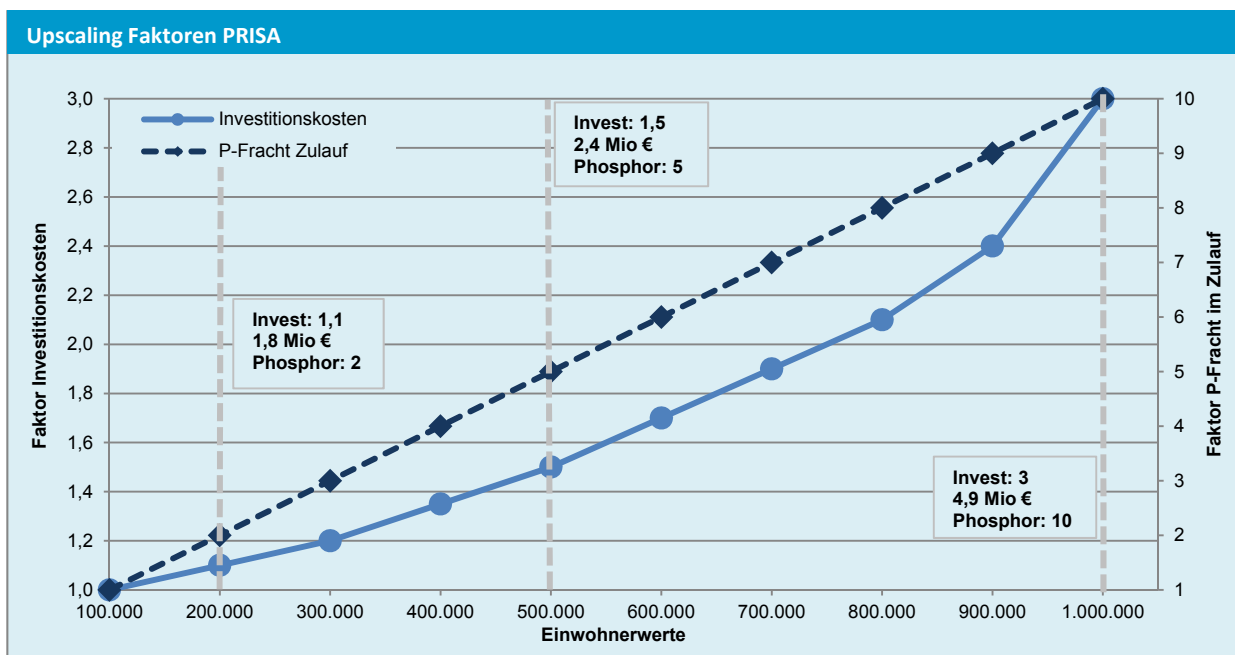


Abbildung 20: Upscaling Faktoren Investitionskosten PRISA

Folgendermaßen ist Abbildung 22 zu interpretieren: Ausgangssituation ist die Errichtung des PRISA Verfahrens auf der 100.000 EW Anlage. Das Investitionsvolumen im Falle des kompletten Neubaus der modifizierten Eindicker und der Anlagenteile zur MAP Fällung beträgt dabei im Mittel 1,6 Mio. €. Das P-Potential im Zulauf entspricht jenem der definierten Referenzkläranlage (Faktor 1). Bei einer Umsetzung auf einer 200.000 EW Anlage wird eine Investitionsfaktor von 1,1 angenommen, was bedeutet, dass bei geringfügig höherer Investitionskosten ein doppelt so großes P-Potential vorliegt (Faktor Invest: 1,1 Faktor Phosphor: 2). Für eine 500.000 EW Kläranlage wird ein Upscaling-Faktor von 1,5 berücksichtigt (Faktor Invest: 1,5, Phosphor: 5)

1.3.4.2 Jahreskosten

Die Kostenkalkulation erfolgt zum einen auf der Grundlage, dass ein modifizierter Eindicker neu errichtet werden muss (Var. 1) und zum anderen, dass der erforderliche Voreindicker besteht und nur geringfügige Modifikationen erforderlich sind (Var. 2). Für den Fall eines Neubaus der erforderlichen Anlagenteile werden von Montag (2008) Kosten von 1,6 Mio. errechnet. Können bestehende Anlagenteile genutzt werden, liegen die Investitionskosten bei rund 1,15 Mio. € und damit bei rund 70 % der ursprünglich veranschlagten Kosten. Die anteiligen Kosten für Bautechnik liegen bei ca. 53 % und werden mit einer Nutzungsdauer von 30 Jahre berücksichtigt. Maschinen- und EMSR Technik sind für 47 % der Kosten verantwortlich und werden mit einer Nutzungsdauer von 15 Jahre angenommen. Diese Annahme gilt für beide Varianten. Aufgrund des

wartungsarmen Betriebes werden die Wartungskosten mit 1 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand ist gering und kann mit 0,5 MA/Jahr angenommen werden. Unter Sonstiges sind Kosten für Beutelfilter und Tuchfilter enthalten.

Jahreskosten	Menge [kg/a]	Preis/Einheit	Var. 1 [€/a]	Var. 2 [€/a]
Kapitalkosten			118.700	83.100
Wartung + Reparaturen			16.000	11.500
MgO	38.000	350 €/t	13.300	13.300
NaOH	8.800	330 €/t	2.900	2.900
Wasser	1.300	1,5 €/m³	900	900
Energie	45.000	0,1 €/kWh	4.500	4.500
Personal	0,5	50.000 €/MA	25.000	25.000
Sonstiges	-	-	7.000	7.000
Entsorgung	-	-	-	-
Betriebskosten			69.600	69.600
Gesamt			189.400	149.300

Tabelle 20: Jahreskosten PRISA (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Einsparungen/Erlöse	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a
MAP Erlöse	189.000	291	55.100
P-Reduktion	4.400	3,45	15.700
N-Reduktion	2.250	0,75	1.700
Schlammreduktion	30.000	290	8.600
Gesamt			75.600

Tabelle 21: Einsparungen und Erlöse PRISA (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Spezifische Kosten	Var. 1 [€]	Var. 2 [€]
€/kg P _{rückgewonnen}	10,8	8,5
€/EW*a	1,9	1,5
€/E*a	3,8	3

Tabelle 22: Spezifische Kosten PRISA (100.000 EW)

Investitionskosten	Referenz 100.000 EW	Referenz 200.000 EW	Referenz 500.000	Referenz 1.000.000
Investitionskosten Var. 1	1.600.000			
Faktor		1,1	1,5	3
Investitionskosten Var. 1		1.710.000	2.450.000	4.890.000
Investitionskosten Var. 2	1.150.000			
Faktor		1,1	1,5	3
Investitionskosten Var. 2		1.200.000	1.710.000	3.400.000

Tabelle 23: Upscaling Investitionskosten PRISA Verfahren

1.3.4.3 Variantenrechnung/ Kostendegression

Die Berechnungen zeigen, dass das PRISA unter den gegebenen Voraussetzungen (Referenzkläranlage 100.000 EW) sowohl bei einem Neubau sämtlicher Anlagenteile, als auch bei der Nutzung bestehender Anlagenteile nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Grund dafür ist die zu geringe P-Fracht der Referenzkläranlage in Relation zu den hohen Investitionskosten. Anhand einer Umsetzung auf Kläranlagen mit größerer Belastung soll gezeigt werden, dass die Kosten deutlich reduziert werden können bzw. unter Umständen sogar ein wirtschaftlicher Betrieb möglich sein kann. In diesem Fall können z.B. Anlagenteile größer gebaut werden. Die Kosten steigen dabei allerdings nicht direkt proportional zur Anlagengröße. Daher wird ein Upscalingfactor berücksichtigt und dementsprechend erhöht. Für den Fall einer Umsetzung auf einer 1.000.000 EW Anlage ist kein Upscaling im Sinne noch größerer Becken sinnvoll, sondern eine zweite Anlage idente Anlage wird errichtet. Allgemein entsprechen die Kosten für die Variante 2 rund 70 % der Kosten für Variante 1.

Im Falle einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit einer Belastung von 500.000 EW und vorhandener modifizierbarer Eindicker (Variante 2) kann das PRISA Verfahren unter Berücksichtigung der Einsparungen

und Erlöse wirtschaftliche betrieben werden. Das heißt, die Jahreskosten werden durch die möglichen Einsparungen und Erlöse gedeckt bzw. kann ein Überschuss erwirtschaftet werden. Grund dafür sind die im Vergleich zur Anlagengröße nicht proportional steigende Investitionskosten. Während die P-Fracht direkt proportional zur Kläranlagengröße zunimmt, gilt dies für die Investitionskosten für den größeren Reaktor beim Up-Scaling nicht. Direkt proportional steigen die Kosten für Fällmittel, Basen und Wasser während die Kosten für Wartung, Energie und Personal um einen definierten steigen.

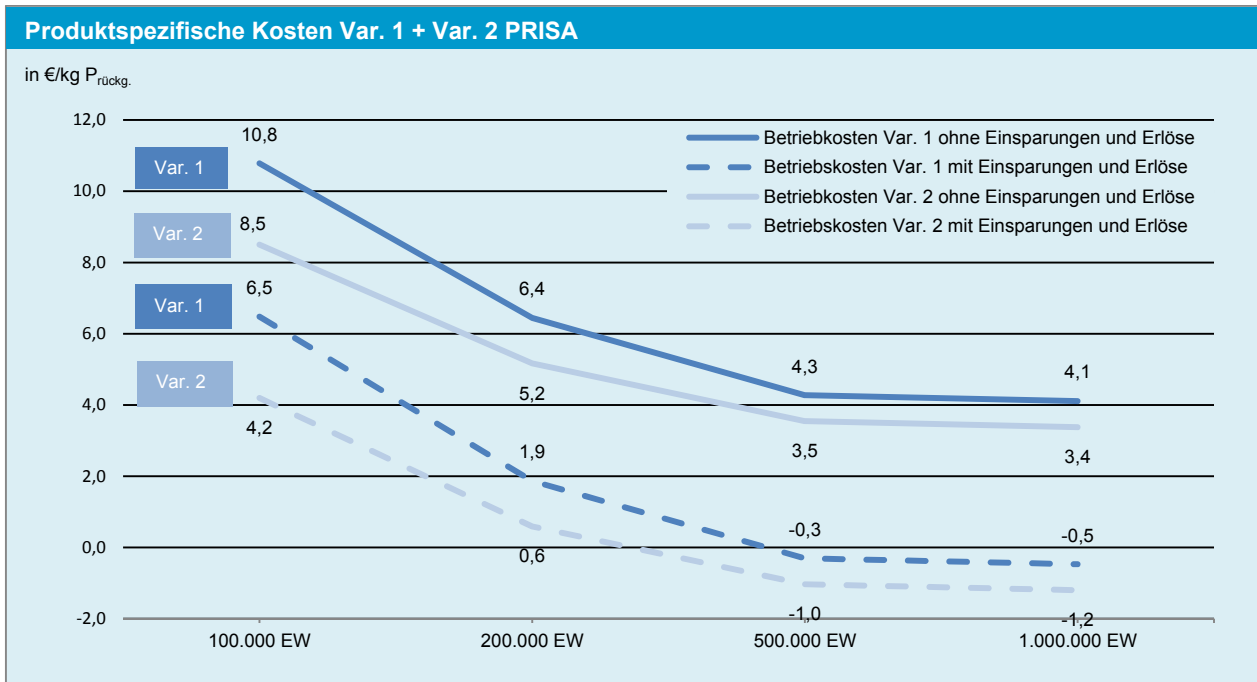


Abbildung 21: Produktspezifische Kosten PRISA; Variation Anlagengröße und erforderliche Investitionskosten

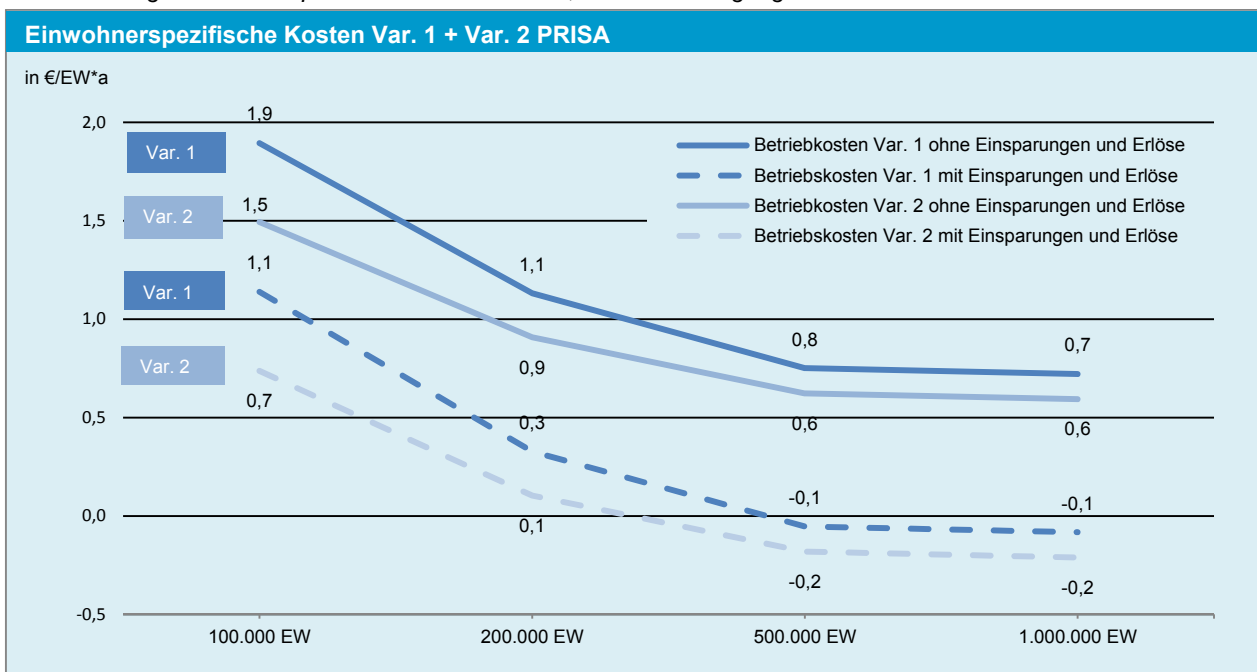


Abbildung 22: Einwohnerspezifische Kosten PRISA; Variation Anlagengröße und erforderliche Investitionskosten

1.3.4.4 Kostenaufgliederung

Anhand der Kostenaufgliederung wird deutlich, dass die Kapitalkosten infolge der hohen Investitionskosten im Falle einer Umsetzung auf einer 100.000 EW Anlage die Gesamtkosten dominieren und damit auch Hauptverantwortlich für den unwirtschaftlichen Betrieb sind. Im Fall des Einsatzes auf Kläranlagen mit größerer Belastung kann der Anteil der Kapitalkosten auf unter die Hälfte der Jahreskosten gedrückt werden.

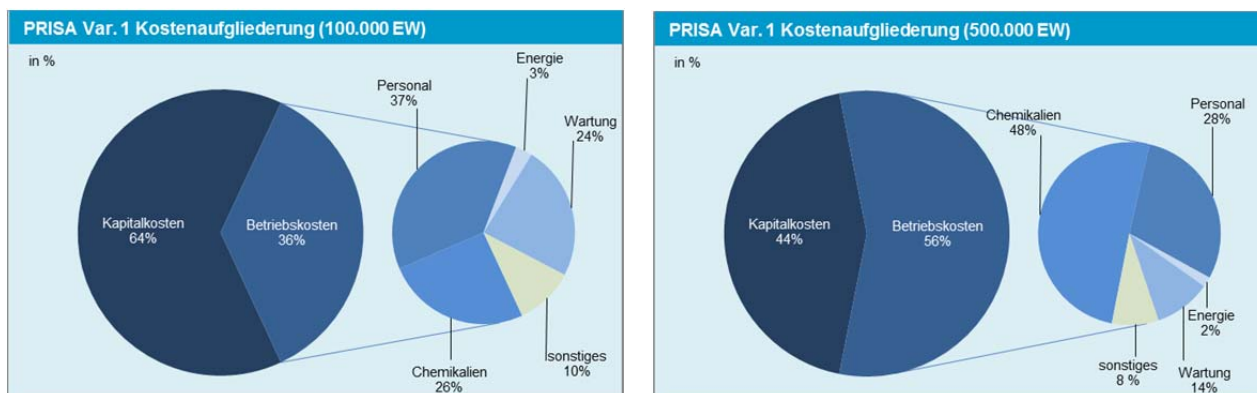


Abbildung 23: Kostenaufgliederung PRISA 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts) Variante 1 Neubau Gesamtanlage

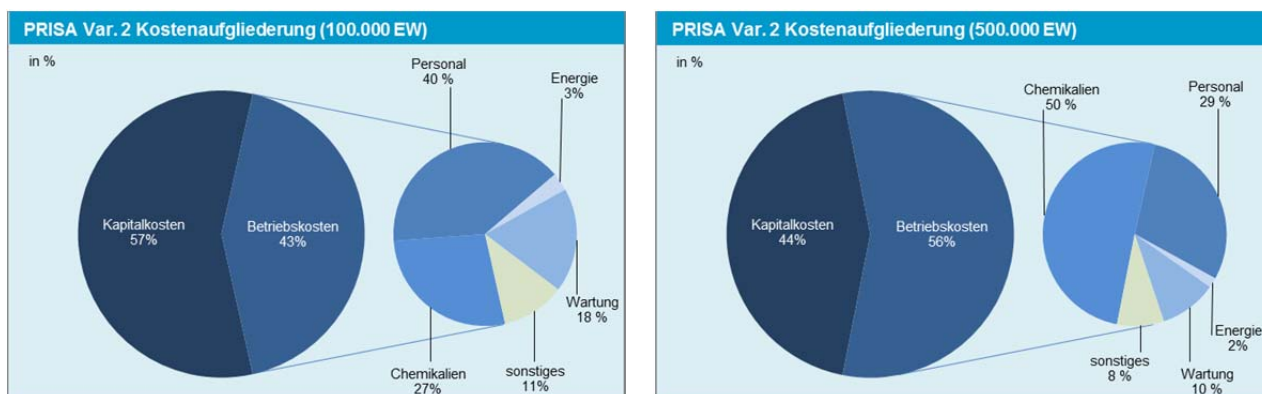


Abbildung 24: Kostenaufgliederung PRISA 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts) Variante 2 bestehende Anlagenteile

1.3.4.5 Amortisation

Anhand der Kapitalwertmethode (Jahreskosten ohne Kapitalkosten abzüglich sämtlicher Einsparungen bzw. Erlöse) wird für die Kläranlagengrößen 100.000 und 200.000 EW und einem vollständigen Neubau der Voreindicker eine Amortisationszeit von 17-18 Jahren errechnet. Im Falle der Nutzung bestehender Anlagenteile, ist eine Amortisation bereits vor der erforderlichen Neuinvestition für Maschinen- und ESMR Technik nach 15 Jahre möglich. Mit zunehmender Belastungsgröße sinkt die Amortisationszeit auf im Falle eines Neubaus der erforderlichen Anlagenteile auf unter 10 Jahre im Fall einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit 500.000 EW. Können Anlagenteile genutzt werden liegt die Amortisationszeit zwischen 6 – 7 Jahren.

Anlagengröße	Amortisationszeit Var. 1 [a]	Amortisationszeit Var. 2 [a]
100.000 EW	>30	>30
200.000 EW	17-18	11-12
500.000 EW	8-9	6-7
1.000.000 EW	8-9	6-7

Tabelle 24: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße



1.3.4.6 Kosten gesamte Prozesskette

Die Umsetzung des PRISA Verfahrens hat einen positiven Einfluss auf die P und N Rückbelastung und damit die Kosten zur Entfernung der Nährstoffe (Fällmittelbedarf: - 10,0 %) und den Schlammanfall (-2,0 %). 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, dem reduzierten Energiebedarf zur N-Entfernung, den verringerten Entsorgungskosten für den Klärschlamm. Die Erlöse stammen aus dem Verkauf des MAP. Verglichen mit den Referenzkosten von 11,1 €/EW*a belaufen sich die Kosten im Falle eines kompletten Neubaus der PRISA Anlage auf 12,2 €/EW*a, was Mehrkosten von rund 10 %. Entspricht Bei einer Ausbaugröße von 100.000 bzw. 200.000 EW können die Mehrkosten auf 3 % bzw. 1 % gedrückt werden. Deutlich geringere Mehrkosten sind im Falle einer Implementierung des PRISA Verfahrens mit Nutzung bestehender Anlagenteile zu erwarten. Die Mehrkosten für eine Umsetzung auf einer 100.000 bzw. 200.000 EW Anlage betragen +6 bzw. +1 %. Bei einer Umsetzung auf einer noch größer dimensionierten Anlage ist eine Reduktion der Gesamtkosten von rund - 2 % zu erwarten.

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	100.000 EW	200.000 EW	500.000 EW
Kläranlage			
Abwasserreinigung	4,50	4,50	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50	1,50	1,50
Kosten Kläranlage	6,00	6,00	6,00
Rückgewinnungsverfahren	1,87	1,12	0,74
Verbrennung (Mitverbrennung)	3,51	3,51	3,51
Entsorgung			
Asche/Schlacke/Flugasche	0,36	0,36	0,36
Filterkuchen	0,06	0,06	0,06
Transport			
Schlamm zu Verbrennung	0,96	0,96	0,96
Asche zu Deponie	0,10	0,10	0,10
Filterkuchen zu Untertagedeponie	0,04	0,04	0,04
Summe Kosten	12,86	12,10	11,72
Einsparungen und Erlöse			
Verringerte P+N Rückbelastung	0,12	0,12	0,12
Erlös Endprodukt	0,55	0,55	0,55
Summe Einsparungen und Erlöse	0,67	0,67	0,67
Gesamtkosten	12,2	11,43	11,00
Δ zu Referenz	+10%	+3%	-1%

Tabelle 25: Jahreskosten gesamte Prozesskette PRISA Variante 1

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	100.000 EW	200.000 EW	500.000 EW
Kläranlage			
Abwasserreinigung	4,50	4,50	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50	1,50	1,50
Kosten Kläranlage	6,00	6,00	6,00
Rückgewinnungsverfahren	1,49	0,91	0,76
Verbrennung (Mitverbrennung)	3,51	3,51	3,51
Entsorgung			
Asche/Schlacke/Flugasche	0,36	0,36	0,36
Filterkuchen	0,06	0,06	0,06
Transport			
Schlamm zu Verbrennung	0,96	0,96	0,96
Asche zu Deponie	0,10	0,10	0,10
Filterkuchen zu Untertagedeponie	0,04	0,04	0,04
Summe Kosten	12,46	11,87	11,49
Einsparungen und Erlöse			
Verringerte P+N Rückbelastung	0,12	0,12	0,12
Erlös Endprodukt	0,55	0,55	0,55
Summe Einsparungen und Erlöse	0,67	0,67	0,67
Gesamtkosten	11,79	11,20	10,87
Δ zu Referenz	+6%	+1%	-2%

Tabelle 26: Jahreskosten gesamte Prozesskette PRISA Variante 2

1.3.4.7 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 25 verdeutlicht, dass die Preisänderung für Rohstoffe (+10 %) bzw. ein Anstieg der Säurepreise keinen großen bzw. keinen Einfluss auf die Gesamtkosten dieses ressourcenarmen Verfahrens haben. Vielmehr haben wenig überraschend die höheren Investitionskosten (+20 %) einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten (+23 %). Das Szenario 4 wurde nicht in die Sensitivitätsanalyse aufgenommen, da die maximal mögliche Rücklösung bereits in der bisherigen Berechnung berücksichtigt wurde.

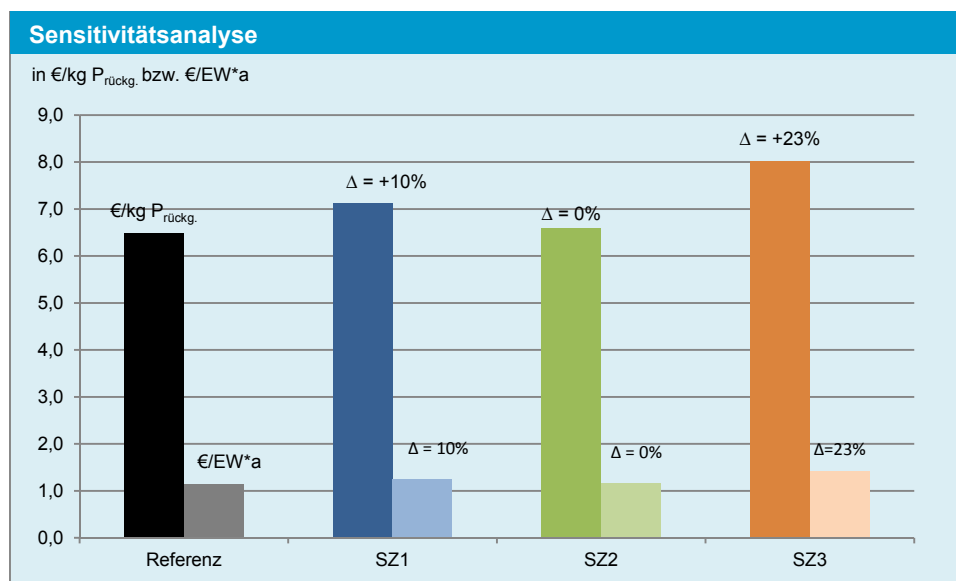


Abbildung 25: Sensitivitätsanalyse PRISA

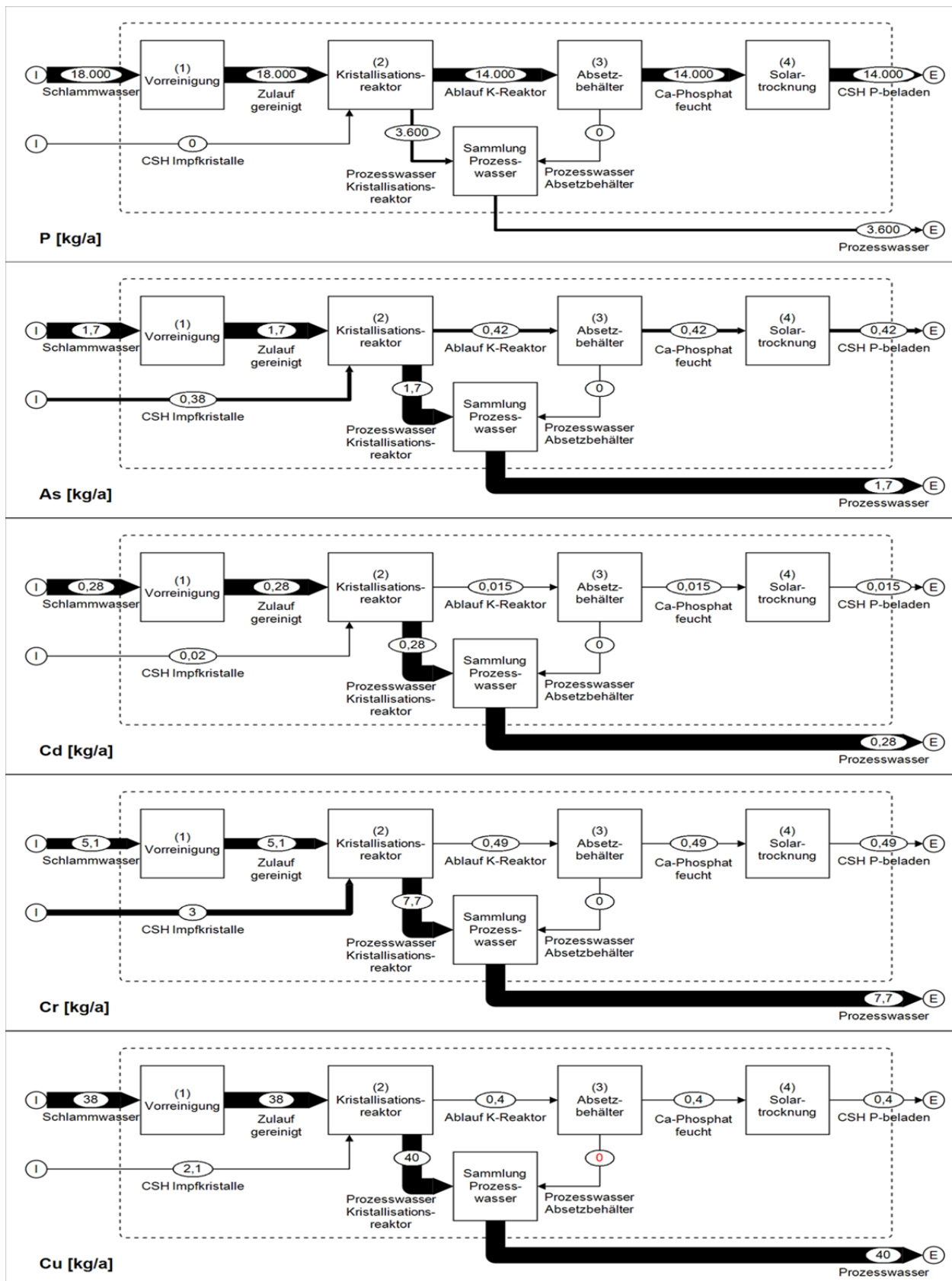


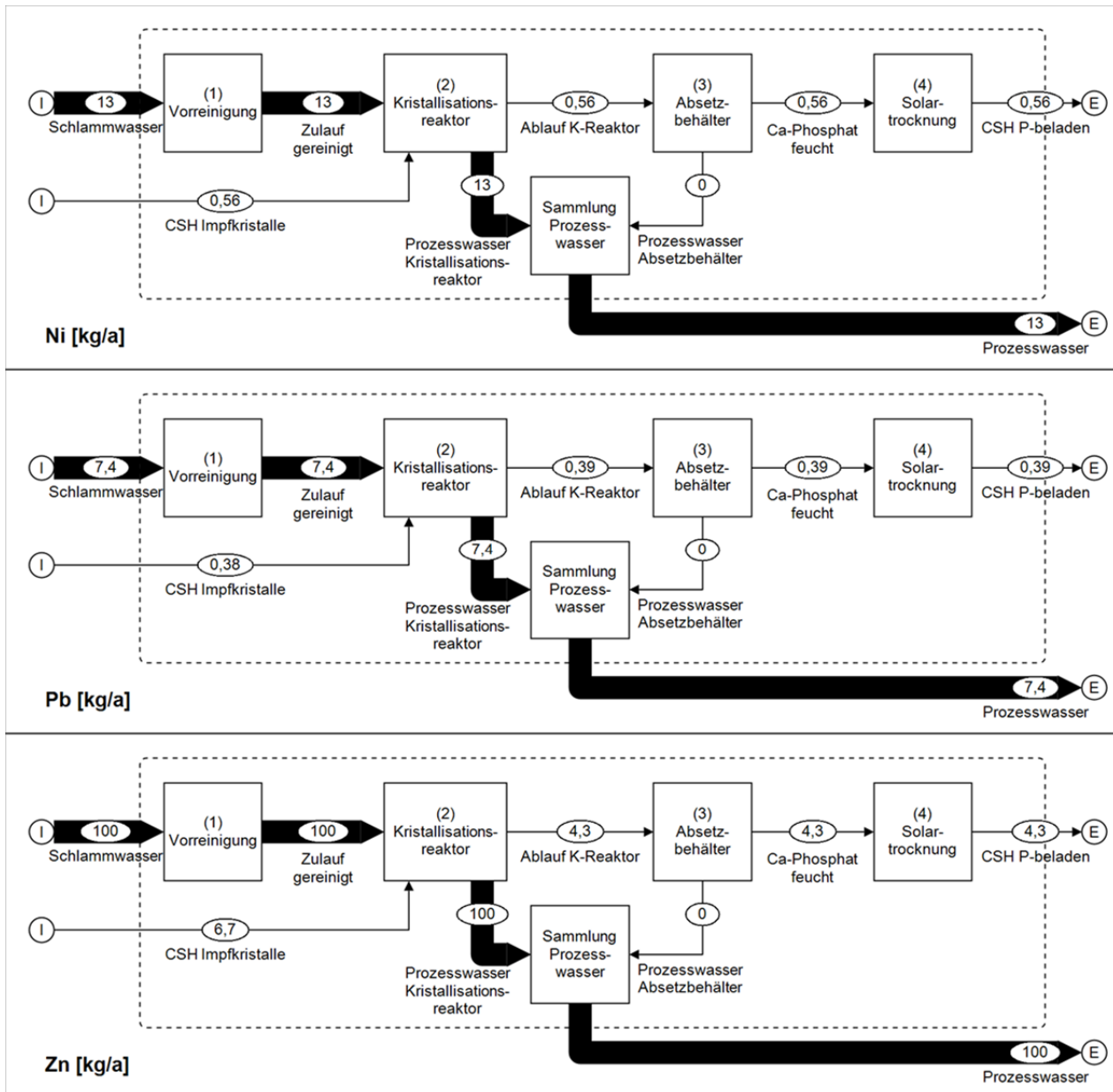
1.3.5 Literatur

- Montag, D. (2008) Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung - Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunalen Kläranlagen. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinischen-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- Montag, D (2011) persönlicher Kontakt, 10.5.2011 RWTH Aachen.
- Herbst, H., Montag, D., Gethke, K., Pinnekamp, J. (2007) Potenziale, Techniken und Kosten der Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Abwasser (Klärschlamm). Korrespondenz Abwasser Oktober.
- Römer, W. (2006) Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. Volume 169, pp.826-832.

1.4 Anhang

1.4.1 Stoffflussanalyse PRISA





1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess PRISA

