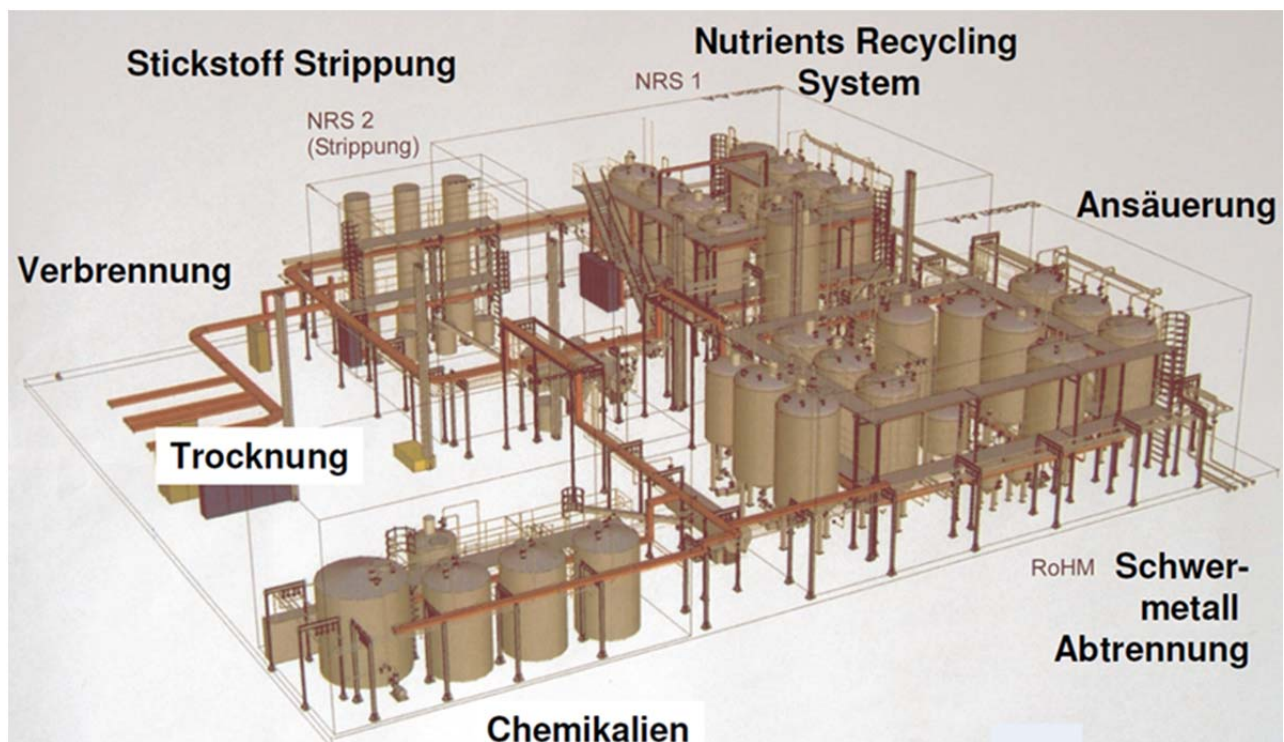


Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

Seaborne/Gifhorn





Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------|--|---|
| 1 | Seaborne ursprünglich bzw. Seaborne modifiziert..... | 7 |
| 1.1 | Grundlagen allgemein | 7 |
| 1.1.1 | Seaborne Verfahren | 7 |
| 1.1.2 | Prozessskizze als STAN Modell..... | 8 |
| 1.1.3 | Verfahrensbeschreibung | 9 |
| 1.1.4 | Betriebsparameter Seaborne Verfahren | 10 |
| 1.2 | Datengrundlage für Bewertung..... | 11 |
| 1.2.1 | Sachbilanz | 11 |
| 1.2.2 | Stoffflussanalyse P | 12 |
| 1.2.3 | Charakteristik Endprodukt | 12 |
| 1.2.4 | P-Löslichkeit | 13 |
| 1.2.5 | Eignung als Sekundärdünger | 13 |
| 1.2.6 | Einfluss auf Abwasserreinigung und Schlammlinie..... | 14 |
| 1.2.7 | Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus Seaborne Verfahren | 14 |
| 1.2.8 | Umsetzung..... | 14 |
| 1.2.9 | Flächenbedarf auf Kläranlage | 15 |
| 1.2.10 | Ökonomische Grundlagen..... | 15 |
| 1.3 | Ergebnis Seaborne Verfahren ursprünglich | 15 |
| 1.3.1 | Stoffflussanalyse P | 16 |
| 1.3.2 | Stoffflussanalyse SM | 17 |
| 1.3.3 | Ergebnisse Güterflussanalyse..... | 19 |
| 1.4 | Ergebnisse ganzheitliche Bewertung Seaborne ursprünglich..... | 23 |
| 1.4.1 | Ergebnis Gasemissionen..... | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| 1.4.2 | Ergebnis kumulierter Energieaufwand..... | 23 |
| 1.4.3 | Ergebnis Schwermetallemissionen..... | 24 |
| 1.4.4 | Ergebnis Endprodukt | 24 |
| 1.4.5 | Ökonomische Bewertung | 26 |
| 1.5 | Ergebnis SEABORNE MODIFIZIERT | 33 |
| 1.5.1 | Stoffflussanalyse P | 33 |
| 1.5.2 | Stoffflussanalyse SM modifiziertes Verfahren..... | 35 |
| 1.5.3 | Güterflussanalyse modifiziertes Seaborne Verfahren | 36 |
| 1.6 | Ergebnisse ganzheitliche Bewertung Seaborne modifiziert | 40 |
| 1.6.1 | Ergebnis Gasemissionen..... | 40 |
| 1.6.2 | Ergebnis kumulierter Energieaufwand..... | 40 |
| 1.6.3 | Ergebnis Schwermetallemissionen..... | 41 |
| 1.6.4 | Ergebnis Endprodukt | 41 |
| 1.6.5 | Ökonomische Bewertung | 42 |

| | | |
|-------|--|----|
| 1.6.6 | Kosten gesamte Prozesskette | 45 |
| 1.7 | Anhang | 47 |
| 1.7.1 | Ergebnisse Stoffflussanalyse Seaborne modifiziert | 47 |
| 1.7.2 | Ergebnisse Stoffflussanalyse Seaborne modifiziert gesamte Prozesskette | 48 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|---|
| Abbildung 1: | Systemskizze Seaborne Anlage Kläranlage Gifhorn | 7 |
| Abbildung 2: | STAN Modell Seaborne ursprünglich (Günther, 2011) | 8 |
| Abbildung 3: | STAN Modell Seaborne modifiziert (Esemen, 2011) | 8 |
| Abbildung 4: | STAN Modell Seaborne gesamte Prozesskette (Günther, 2011) | 9 |
| Abbildung 5: | STAN Modell Seaborne gesamte Prozesskette (Esemen, 2012) | 9 |
| Abbildung 6: | P-Rücklösung | 12 |
| Abbildung 7: | Seaborne Endprodukt | 13 |
| Abbildung 8: | Großtechnisch umgesetzte Seaborne Anlagen | 14 |
| Abbildung 9: | Ergebnis SFA Phosphor Seaborne ursprünglich | 16 |
| Abbildung 10: | Einfluss Seaborne auf P-Emission Gewässer und P-Fracht Klärschlamm | 17 |
| Abbildung 11: | Ergebnis Güterflussanalyse Seaborne ursprünglich | 20 |
| Abbildung 12: | CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente [kg bzw. g/kg P _{rückg.}] Seaborne ursprünglich | 21 |
| Abbildung 13: | KEA Ressourcenbedarf Seaborne Verfahren ursprünglich | 22 |
| Abbildung 14: | CO ₂ -bzw. SO ₂ -Äquivalente Emissionen ganzheitliche Betrachtung Seaborne ursprünglich | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| Abbildung 15: | Schwermetalle Nährstoffbezogen Seaborne Endprodukt ursprünglich Vergleich SSP .. | 25 |
| Abbildung 16: | Produkt- und Einwohnerspezifische Kosten Seaborne ursprünglich; Variation Anlagengröße | 28 |
| Abbildung 17: | Kostenaufgliederung Seaborne modif. 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts) .. | 27 |
| Abbildung 18: | Entwicklung der anteiligen Kosten in Abhängigkeit der Kläranlagengröße | 29 |
| Abbildung 19: | Sensitivitätsanalyse Seaborne ursprünglich | 30 |
| Abbildung 20: | Stoffflussanalyse Phosphor | 34 |
| Abbildung 21: | Einfluss Seaborne auf P-Emission Gewässer und P-Fracht Klärschlamm | 35 |
| Abbildung 22: | Entfrachtungsleistung (Seaborne modifiziert) | 36 |
| Abbildung 23: | Ergebnis Güterflussanalyse Seaborne modifiziert | 37 |
| Abbildung 24: | CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente [kg bzw. g/kg P _{rückg.}] Seaborne modifiziert | 38 |
| Abbildung 25: | KEA Ressourcenbedarf Seaborne Verfahren modifiziert | 39 |
| Abbildung 26: | CO ₂ -bzw. SO ₂ -Äquivalente Emissionen ganzheitliche Betrachtung Seaborne modifiziert | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| Abbildung 27: | Nährstoffbezogener Schwermetallgehalt Endprodukt vergleich Handelsdünger (SSP) .. | 41 |
| Abbildung 28: | Produkt- und Einwohnerspezifische Kosten Seaborne modifiziert; Variation Anlagengröße | 44 |
| Abbildung 29: | Kostenaufgliederung Seaborne modif. 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts) .. | 43 |
| Abbildung 30: | Entwicklung der anteiligen Kosten in Abhängigkeit der Kläranlagengröße | 45 |
| Abbildung 31: | Sensitivitätsanalyse Seaborne modifiziert | 46 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|---|----|
| Tabelle 1: | Optimale Betriebsparameter Seaborne Verfahren | 11 |
| Tabelle 2: | Sachbilanz Seaborne Verfahren | 11 |
| Tabelle 3: | Aufgliederung Energiebedarf Seaborne | 11 |

| | |
|--|----|
| Tabelle 4: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Endprodukt Seaborne ursprünglich | 13 |
| Tabelle 6: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Endprodukt Seaborne modifiziert | 13 |
| Tabelle 7: Löslichkeit in % bezogen auf P _{ges} (Seaborne)..... | 13 |
| Tabelle 8: Flächenbedarf Seaborne Verfahren | 15 |
| Tabelle 9: Kosten und Bedarf Anlagenbau Seaborne | 15 |
| Tabelle 10: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Seaborne ursprünglich | 16 |
| Tabelle 11: Transferkoeffizienten P Seaborne ursprünglich | 16 |
| Tabelle 12: Einsparungen Abwasserreinigung | 17 |
| Tabelle 13: Reduktion Schlammanfall | 17 |
| Tabelle 14: Transferkoeffizienten Rücklösung, Schwermetallentfernung und MAP-Fällung Seaborne Verfahren ursprünglich | 17 |
| Tabelle 15: Entfrachtungsleistung (Seaborne ursprünglich) | 18 |
| Tabelle 16: Direkte Emissionen Seaborne ursprünglich Prozesskette, Vergleich Referenz | 19 |
| Tabelle 17: Chemikalienbedarf Referenzanlage | 19 |
| Tabelle 18: Spezifische Gasemissionen Seaborne ursprünglich | 20 |
| Tabelle 19: Indirekte SM-Emissionen Seaborne ursprünglich | 21 |
| Tabelle 20: Kumulierter Energieaufwand Seaborne ursprünglich | 22 |
| Tabelle 21: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Seaborne ursprünglich | 23 |
| Tabelle 22: Transportwege Seaborne ursprünglich | 23 |
| Tabelle 23: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente Prozesskette Seaborne ursprünglich | 23 |
| Tabelle 24: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette Seaborne ursprünglich | 24 |
| Tabelle 25: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation... | 24 |
| Tabelle 26: Bewertung Seaborne Endprodukt | 25 |
| Tabelle 27: Jahreskosten Seaborne ursprünglich (Referenzkläranlage 100.000 EW) | 26 |
| Tabelle 28: Einsparungen und Erlöse Seaborne ursprünglich (Referenzkläranlage 100.000 EW) | 26 |
| Tabelle 29: Spezifische Kosten Seaborne ursprünglich (100.000 EW) | 26 |
| Tabelle 30: Kostenanpassung als Faktor zur Kläranlagengröße | 27 |
| Tabelle 31: Jahreskosten gesamte Prozesskette Seaborne ursprünglich | 29 |
| Tabelle 32: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Seaborne ursprünglich | 33 |
| Tabelle 33: Transferkoeffizienten Phosphor | 33 |
| Tabelle 34: Einsparungen Abwasserreinigung | 34 |
| Tabelle 35: Reduktion Schlammanfall | 34 |
| Tabelle 36: Reduktion Konditionierungsmittel | 34 |
| Tabelle 37: Tabelle 38: Transferkoeffizienten Rücklösung und MAP-Fällung Seaborne Verfahren modifiziert | 35 |
| Tabelle 39: Direkte Emissionen Seaborne modifiziert Prozesskette, Vergleich Referenz | 36 |
| Tabelle 40: Chemikalienbedarf Seaborne modifiziert | 36 |
| Tabelle 41: Fällmittelbedarf Seaborne modifiziert | 37 |
| Tabelle 42: Ressourcenbedarf Seaborne modifiziert | 37 |
| Tabelle 43: Spezifische Gasemissionen Seaborne modifiziert | 37 |
| Tabelle 44: Indirekte SM-Emissionen Seaborne modifiziert | 39 |
| Tabelle 45: Kumulierter Energieaufwand Seaborne modifiziert | 39 |
| Tabelle 46: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Seaborne modifiziert | 40 |
| Tabelle 47: Transportwege Seaborne modifiziert | 40 |
| Tabelle 48: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente Prozesskette Seaborne modifiziert | 40 |
| Tabelle 49: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette Seaborne modifiziert | 41 |
| Tabelle 50: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation... | 41 |
| Tabelle 51: Bewertung Seaborne Endprodukt | 42 |
| Tabelle 52: Jahreskosten Seaborne modifiziert (Referenzkläranlage 100.000 EW) | 43 |

| | |
|--|----|
| Tabelle 53: Einsparungen und Erlöse Seaborne modifiziert (Referenzkläranlage 100.000 EW) | 43 |
| Tabelle 54: Spezifische Kosten Seaborne modifiziert (100.000 EW)..... | 43 |
| Tabelle 55: Kostenanpassung als Faktor zur Kläranlagengröße | 43 |
| Tabelle 56: Jahreskosten gesamte Prozesskette Seaborne modifiziert | 45 |



Seaborne ursprünglich bzw. Seaborne modifiziert

1.1 Grundlagen allgemein

Das ursprüngliche Seaborne Verfahren (Günther, 2011; Bayerle, 2009; Günther et al., 2008; Müller et al., 2005a, Müller et al., 2005b) ist ein nasschemisches Verfahren (saurer Aufschluss) mit gezielter sulfidischer Schwermetallabtrennung, Fällung eines MAP Endproduktes und zusätzlicher Ammoniakstrippung. Seit 2006 wird eine großtechnische Anlage auf der Kläranlage Gifhorn mit Erfolg betrieben. Inzwischen wurden die Betriebsparameter der Anlage häufig modifiziert und angepasst. Als Datengrundlage für die Bewertung werden die Publikationen von Günther (2011) und Esemén (2012) herangezogen. Im Vergleich zu der ursprünglichen Anlagenkonfiguration von Günther (2011) mit Säureaufschluss bei pH 2 und Zusatz von verschiedenen Oxidationsmitteln, liegt der Fokus der Arbeit von Esemén (2012) in einer technischen und wirtschaftlichen Optimierung des Seaborne Verfahrens auf der Kläranlage in Gifhorn (56.000 EW). Wesentlicher Unterschied ist der höhere pH-Wert (pH 3) und damit geringere (Schwer-)Metallrücklösungen. Das ursprüngliche Seaborne Verfahren kann grundsätzlich in die zwei Hauptprozesse RoHM (**R**emoval of **H**eat **M**etals) und NRS (**N**utrient **R**emoval **S**ystem) unterteilt werden. Ziel des RoHM ist die Rücklösung des Phosphors und der Schwermetalle durch einen sauren Aufschluss und anschließende gezielte Fällung der Schwermetalle durch Sulfide und Zugabe von Oxalsäure. Der schwermetallhaltige Schlamm aus der Fällung muss gesondert entsorgt werden. Im NRS-Prozess wird durch Fällung ein MAP gewonnen. Der weiterhin stickstoffreiche Überstand wird in einer abschließenden Strippung als Ammoniumsulfat ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{SO}_4$) abgetrennt. Der Prozess der Strippung wird bei der Bewertung des Verfahrens jedoch nicht berücksichtigt. Die Rückgewinnungsquote bezogen auf den Faulschlamminput liegen im Bereich von 35 % Günther (2011) und max. 58 % (Esemén, 2012). Bezogen auf den Kläranlagenlagenzulauf kann max. 30 bzw. 50 % rückgewonnen werden.

1.1.1 Seaborne Verfahren

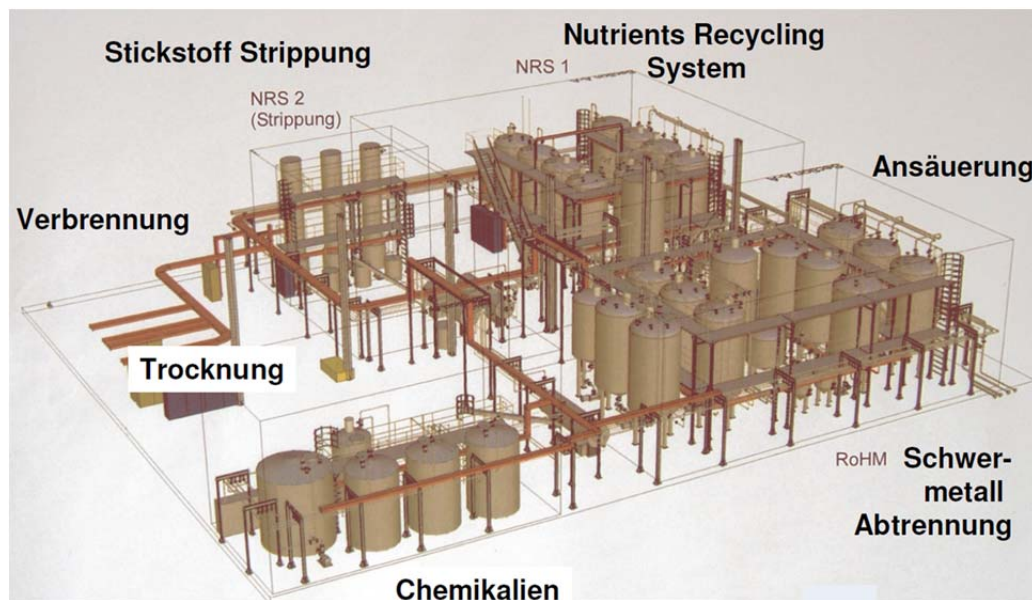


Abbildung 1: Systemskizze Seaborne Anlage Kläranlage Gifhorn

1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell

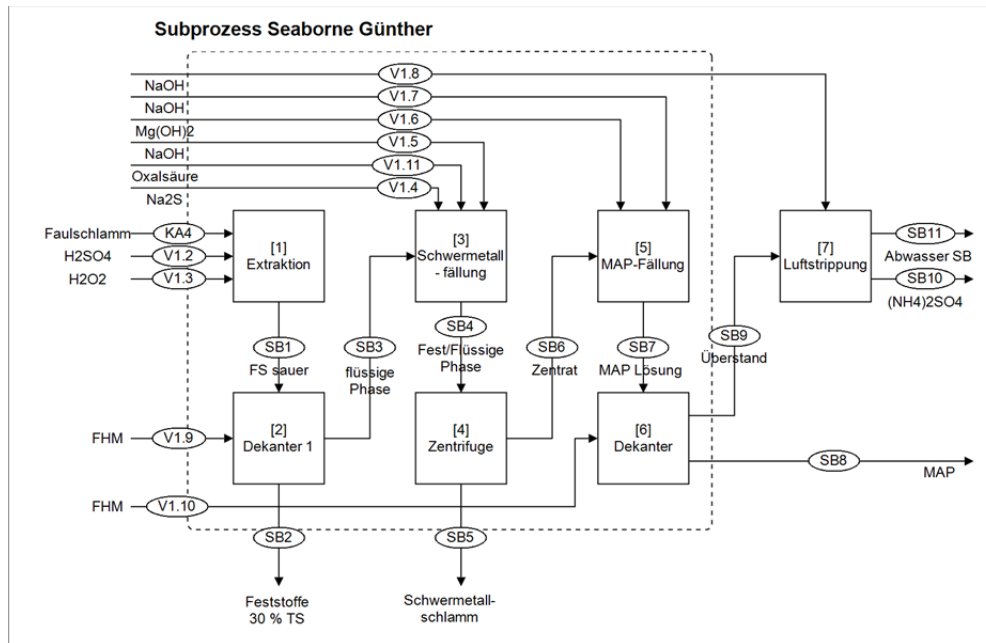


Abbildung 2: STAN Modell Seaborne ursprünglich (Günther, 2011)

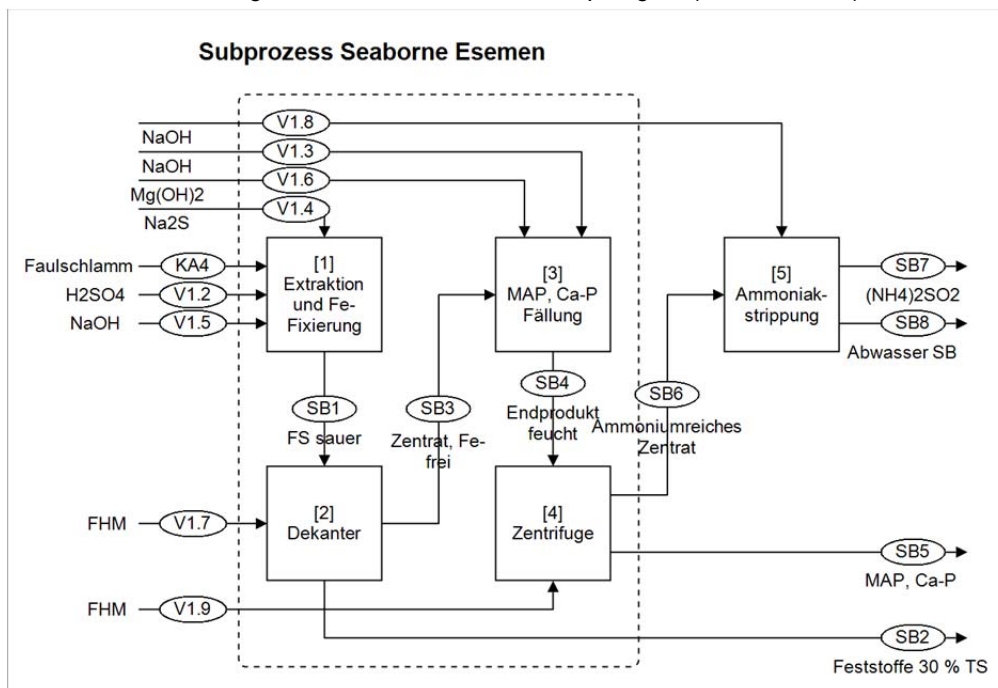


Abbildung 3: STAN Modell Seaborne modifiziert (Esemén, 2011)

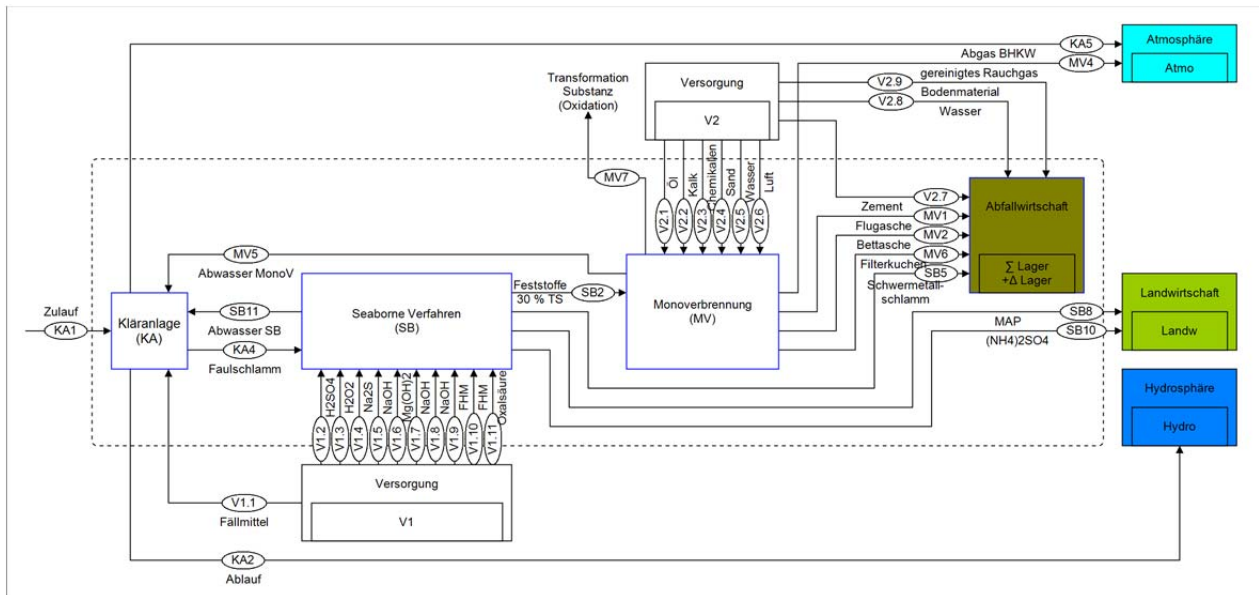


Abbildung 4: STAN Modell Seaborne gesamte Prozesskette (Günther, 2011)

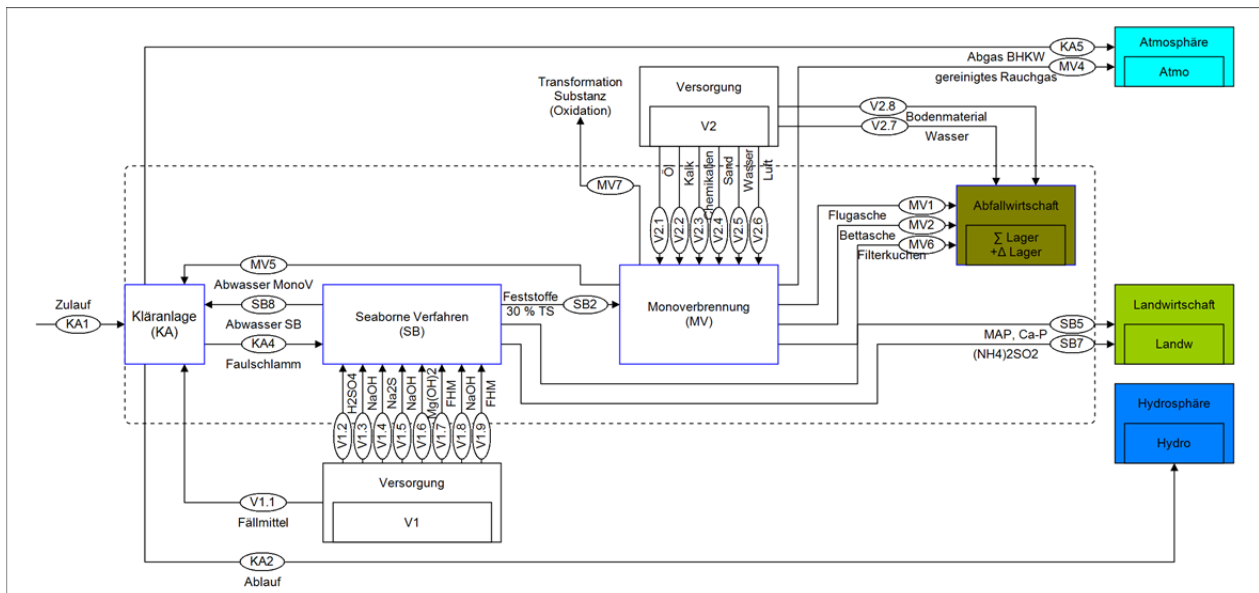


Abbildung 5: STAN Modell Seaborne gesamte Prozesskette (Esemen, 2012)

1.1.3 Verfahrensbeschreibung

Extraktion [1] + Fest/Flüssigtrennung [2] bzw. gleichzeitige Extraktion und Fe-Fixierung [1]

In den Versuchsausführungen von Günther (2011) wird Faulschlamm mittels H_2SO_4 - Zugabe auf einen pH von 2 angesäuert. Phosphor wird zu 90 % und auch für die spätere Fällung notwendigen Fällionen wie Ca (> 80%) und Mg (~25 %) werden rückgelöst. Problematisch ist dabei die simultane Rücklösung von Störionen wie Aluminium und Eisen sowie Schwermetalle in unterschiedlichem Ausmaß (siehe Kapitel nasschemische Rücklösung). Durch Zugabe von Wasserstoffperoxid (H_2O_2) soll zum einen die organische Substanz zusätzlich zerstört werden und zum anderen eine gezielte Fällung der gelösten zweiwertigen Eisenionen durch aufoxidation zu dreiwertigem Eisen erreicht werden. Neueste Untersuchungen zeigen, dass durch die Aufoxidation des Eisens, auch bei sehr niedrigen pH Werten eine Ausfällung mit gelösten Phosphationen stattfindet und somit die Rückgewinnungsquote bereits in diesem Prozessschritt nachteilig reduziert werden kann.

Im modifizierten Verfahren wird der Klärschlamm nur mehr auf pH 3 angesäuert. Nachteilig ist dabei die reduzierte P-Rücklösung im Mittel auf 60 % (50 – 73 %), gleichzeitig sinkt jedoch der Säurebedarf

signifikant. Schwermetalle gehen bei pH 3 kaum in Lösung und können über die Feststoffabtrennung aus dem Prozess ausgeschleust werden. Die Verweilzeit im Rücklösebehälter beträgt 30 - 60 min.

Im anschließenden Fest/Flüssig Trennverfahren werden die Feststoffe unter Zuhilfenahme von Flockungshilfsmittel abgetrennt. Auffällig ist, dass ein Teil (bis 10%) des vormals gelöst vorliegenden Phosphoranteils über die Feststoffe abgetrennt wird.

Sulfidische Fe- und Schwermetallfällung [3] + Zentrifuge [4]

In der sulfidischen Fällung wird mit Natronlauge (NaOH) ein pH-Wert von 5 – 5,6 eingestellt. In der Ausführung von Günther (2011) werden mit Natriumsulfid (Na_2S) und Oxalsäure die gelöst vorliegenden Schwermetalle teilweise ausgefällt. Die Reaktionszeit beträgt ca. 30 min. Die schwerlöslichen Metallsulfide werden in der anschließenden Zentrifuge als Schwermetallschlamm aus dem System geschleust. Mit der pH Wert Anhebung werden allerdings 30 - 40 % der gelöst vorliegenden Phosphate als Eisenphosphat ausgefällt und reduziert die mögliche Rückgewinnungsquote des Verfahrens deutlich. Das teilweise SM-entfrachtete Zentrat wird in den NRS 1 Prozess geführt. Bei Esemén (2012) werden die Schwermetalle kaum rückgelöst. Das gelöste Eisen wird bei der Fe-fixierung direkt nach der Rücklösung bei einem pH von 5 – 5,6 wieder gebunden. Die unerwünschten P-Ausfällungen können im Vergleich zum ursprünglichen Verfahren deutlich reduziert werden.

MAP-Fällung [5] + Fest/Flüssigtrennung 2 [6]

Der für die Fällung nötige pH-Wert von 8,7 - 9 wird mit Natronlauge eingestellt. Zur Ausfällung des gelösten Phosphors wird Magnesium im Verhältnis Mg:P 1,5:1 in Form von Magnesiumhydroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) zu dosiert. Nach einer Verweilzeit von rund 120 min. ist die Fällung abgeschlossen und das Fällprodukt kann mit Zentrifugen und Filtern abgetrennt werden. Neben den gewünschten MAP werden mit den in der flüssigen Phase vorhandenen Ca- und Fe-Ionen auch Calcium- und Eisenphosphate gebildet. Esemén (2012) zeigt, dass aufgrund der parallelen Rücklösung von Ca und Mg bereits hohe Konzentration an Fällionen im Zentrat vorliegen. Fällmittel können dadurch deutlich unter dem sonst üblichen Fällmittelbedarf im stöchiometrischen Verhältnis zum Phosphor von 1,5:1 angesetzt werden kann.

Luftstrippung [7]

Der überschüssige Stickstoff, der nach der MAP-Fällung im Zentrat verbleibt, wird über eine Luftstrippung als $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ abgetrennt. Das Nährstoff- und Schadstoffarme Prozesswasser wird zurück in die biologische Stufe der Kläranlage geführt. Dieser Prozess wird bei der Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens allerdings nicht berücksichtigt.

Mögliche Betriebsprobleme

Die nun dargestellten Betriebsprobleme treten vor allem beim ursprünglichen Seaborne Verfahren auf und wurden von Esemén (2012) aufgegriffen und optimiert.

- Bei der sulfidischen (Schwer-)Metall Fällung wird ein Teil des rückgelösten Phosphors (30-40 %) als Eisenphosphat ausgefällt und anschließend über die Feststoffe aus dem System geschleust.
- Die entstehenden kleinen Partikel der sulfidisch gefällten (Schwer-)Metalle konnten bei der Fest/Flüssigtrennung nicht vollständig abgetrennt werden. Das heißt, dass ein Teil der Schwermetalle in den Prozess der MAP-Fällung gelangten. Zusätzlich traten Probleme durch Belegung der Filter auf.
- Die Entwässerbarkeit von Faulschlamm ist bei pH 2 deutlich reduziert. Zudem sind gängige Flockungsmittel bei diesen pH-Werten unbrauchbar.
- Massive Schaumbildung und Geruchsbelästigung durch CO_2 Ausgasung und Schwefelwasserstoffbildung

1.1.4 Betriebsparameter Seaborne Verfahren

Das Seaborne Verfahren bzw. die Optimierung des Prozesses war Gegenstand von zwei Dissertationen an der Technischen Universität Braunschweig. Daraus abgeleitet werden zusammenfassend die optimalen Betriebsparameter für die Phosphorrückgewinnung mit dem Seaborne Verfahren dargestellt (Tabelle 1).

| Parameter | Seaborne urspr. | Seaborne modif. |
|----------------------------|---|------------------------------|
| Nasschemischer Aufschluss | pH 2 | pH 3 |
| Zusatzstoffe Aufschluss | Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂) | - |
| Schwermetallrücklösung | Ja | Kaum |
| Schwermetallentfernung | Gesonderte sulfidisch Fällung | Fe-Fixierung nach Aufschluss |
| Zusatzstoffe SM-Entfernung | Oxalsäure | - |
| pH bei SM-Entfernung | 5,6 | 5,6 |
| Fällung | pH 8,5-9 | pH 8,5-9 |
| Mg:P Verhältnis | 1,5:1 | 1,5:1 |

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter Seaborne Verfahren

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Sachbilanz

Der Schwefelsäure- und Basenaufwand ist bei der Aufstellung von Esem (2012) deutlich reduziert. Ausschlaggebend ist der höhere pH Wert (pH-Wert 3) und die damit auch verringerte Menge an Basen zur Neutralisierung des Zentrates. Der Na₂S Bedarf kann ebenfalls reduziert werden (+). Verantwortlich ist die verringerte Rücklösung störender Schwermetall- und Eisenionen bei pH 3.

| Input [kg/kg TS] | Seaborne urspr. | Seaborne modif. |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Prozess RoHM | | |
| H ₂ SO ₄ (96 %) | 0,59 | 0,35 |
| H ₂ O ₂ (35 %) | 0,33 | - |
| FHM (50 % WS) | 0,01 | 0,01 |
| Na ₂ S (30 bzw. 15 %) | 0,15 | 0,24 |
| NaOH (40 %) | 0,83 | -* |
| Oxalsäure | 0,09 | - |
| Prozess NRS1 | | |
| Mg(OH) ₂ (50 %) | 0,02 | 0,02 |
| NaOH (40 %) | 0,48 | 0,59* |
| FHM (50 % WS) | 0,01 | 0,01 |

*Gesamt für alle Teilprozesse zusammen, keine Aufschlüsselung möglich

Tabelle 2: Sachbilanz Seaborne Verfahren

Die benötigte elektrische Energie von 350.400 bzw. 141.900 für die Kläranlage Gifhorn kann sehr genau aufgeschlüsselt werden (Esem, 2012, Günther, 2011; Müller et al., 2008) (++). Der thermische Energieaufwand für das Seaborne Verfahren beträgt zusätzlich 11,5 kWh/(EW*a) und ist auf die offenen Heißwasserkessel sowie die Thermalölanlage zurückzuführen. Diese Energie wird bei der Bewertung allerdings nicht berücksichtigt. Der Faulschlammfall (3,6 % TS) der Referenzanlage entspricht täglich 118 m³/d, im Vergleich dazu die 95 m³/d der Kläranlage Gifhorn. Der Energiebedarf der einzelnen Anlagenteile wird daher mit dem Faktor 1,2 multipliziert (+).

| Stufe | Aggregate | Seaborne urspr. | Seaborne modif. |
|--|---|-----------------|-----------------|
| Extraktion | Rührwerk, Bandfilter* | 66.600 | 43.800 |
| Schwermetallfällung | Rührwerk und Pumpen Filter, Bandfilter | 40.700 | - |
| Äquivalenzeinstellung/ Fällung/Neutralisation | Rührwerk und Pumpen MAP Zentrifuge | 206.200 | 96.400 |
| Anlagenperipherie | | 36.800 | 1.700 |
| Gesamt | | 350.400 | 141.900 |

*Energiebedarf der Feststoffzentrifuge wird nicht berücksichtigt, da die Entwässerungseinheit bereits Teil der bestehenden Schlammlinie der Referenzkläranlage ist

Tabelle 3: Aufgliederung Energiebedarf Seaborne

1.2.2 Stoffflussanalyse

Transferkoeffizienten (TK) Rücklösung

Phosphor wird bei pH 2 zu rund 90 % und bei pH 3 im Mittel zu 60 % rückgelöst (++). Problematisch ist bei einem pH 2 die simultane Rücklösung von Schwermetallen (siehe Kapitel Verhalten von Nährstoffen und (Schwer-)Metallen bei sauren nasschemischen Aufschlüssen). Der Pfad von P und der ausgewählten Schwermetalle wird in den Ergebnissen dargestellt (++).

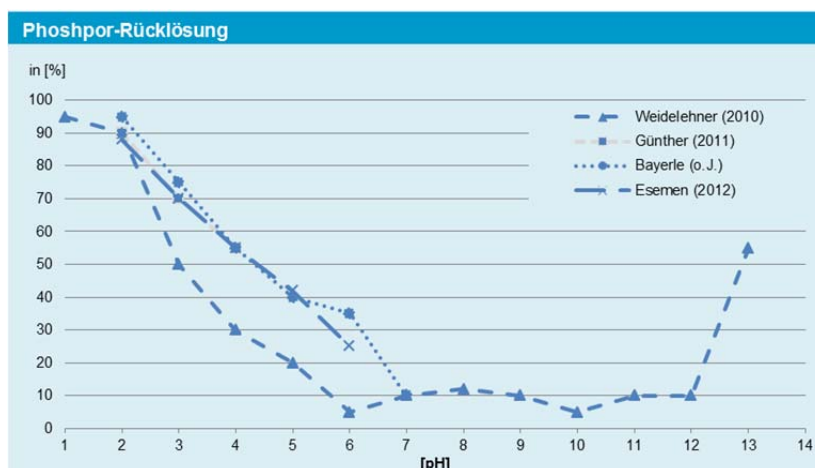


Abbildung 6: P-Rücklösung bei saurem Aufschluss

1.2.3 Charakteristik Endprodukt

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

Das Endprodukt des Seaborne Verfahrens kann nicht eindeutig klassifiziert werden. Untersuchungen mittels Ionenchromatographie zeigen eine Zusammensetzung aus verschiedenen Magnesiumphosphaten (MgNH_4PO_4 , $\text{Mg}_3(\text{PO})_4$, MgHPO_4), Calciumphosphaten und auch geringe Anteile an Eisenphosphaten sowie Eisenoxide, Siliziumoxide, Natrium, Chloriden und Sulfaten. Der Phosphorgehalt liegt im Bereich von 9,8 - 12 % (++). Die Schwermetallgehalte liegen deutlich unter den Schwermetallgehalten handelsüblicher Mineraldünger (++). Vorsicht ist bei der Beurteilung der Nickelgehalte geboten. Die Stoffflussanalyse zeigt eine höhere Nickelfracht in der flüssigen Phase auf, als über den Faulschlamm in das System eingebracht wird. Vermutlich ist dies auf das saure Milieu im Extraktionsbehälter und die daraus resultierende Lösung von Nickel aus der Behälterwand zurückzuführen. Erkennbar ist, dass mit dem modifizierten Seaborne Verfahren ein Endprodukt mit höherem P-Gehalt und geringeren Schwermetallgehalten hergestellt werden kann (++). Für beide Endprodukte gilt, dass sie die Anforderungen der Düngemittelverordnung erfüllen (++).

Für organische Verunreinigungen wurde im Rahmen des Deutschen PhoBe-Projektes ein Messprogramm gestartet, wobei geringe Verunreinigungen nachgewiesen werden konnten (Tabelle 4) (++). Es liegen keine Hygieneparameter für das Endprodukt vor. Weidelehner (2011) zeigt, dass Bakterienkulturen in einem Endprodukt eines nasschemischen Rückgewinnungsverfahrens nachgewiesen werden können. Hygienische Bedenken sind allerdings nicht zu erwarten(++).

| | Nährstoffe [g/kg TS] | Schwermetalle [mg/kg TS] | Org. Spurenstoffe [mg/kg TS] |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| P | 98 | As - | AOX 197 |
| N | 40 | Cd 1,6 | PAK - |
| Mg | 49 | Cr 24 | PCDD/F - |
| Ca | 20 | Cu 356 | B(a)P 0,005 |
| K | - | Hg 1,5 | LAS 40 |
| Metalle [mg/kg TS] | | Ni 18 | NPE 2 |
| Al | - | Pb 49 | Phthalate 1 |
| Fe | - | Zn 767 | |

Tabelle 4: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Endprodukt Seaborne ursprünglich

| | Nährstoffe [g/kg TS] | Schwermetalle [mg/kg TS] | Org. Spurenstoffe [mg/kg TS] |
|----|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| P | 120 | As - | AOX - |
| N | 23 | Cd <0,2 | PAK - |
| Mg | 38 | Cr 1,5 | PCDD/F - |
| Ca | 130 | Cu 11,5 | B(a)P 0,01 |
| K | 2 | Hg <0,2 | LAS 300 |
| | Metalle [mg/kg TS] | Ni 1,7 | NPE 8 |
| Al | - | Pb <1 | Phthalate 0 |
| Fe | 16.000 | Zn 23 | |

Tabelle 5: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe Endprodukt Seaborne modifiziert

1.2.3.2 P-Löslichkeit

Düngeversuche mit Ertragsaufzeichnung zeigen, dass die mit dem Seaborne Endprodukt gedüngten Pflanzen, entsprechende Erträge wie handelsübliche Dünger erzielen, obwohl die Wasserlöslichkeit kleiner als 1 % ist (++) . Die Zitronensäurelöslichkeit liegt bei 65 % Ameisensäure-, Mineralsäure- und Ammoncitratlöslichkeit liegen im Bereich von 80 – 90 % (++) .

| Extraktionsmittel | Löslichkeit [%] |
|-------------------|-----------------|
| Wasser | <1 |
| Zitronensäure | 65 |
| Ameisensäure | 80 |
| Mineralsäure | 90 |
| Ammoncitrat | 80 |

Tabelle 6: Löslichkeit in % bezogen auf P_{ges} (Seaborne)

1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Das Seaborne Endprodukt erfüllt die Anforderungen der Düngemittelverordnung und darf als Dünger auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausgebracht werden. Das anfallende Endprodukt ähnelt optisch einem festen Schlamm, in welchem die einzelnen MAP-Kristalle erkennbar sind. Eine Ausbringung mit modernen Geräten ist jedoch nicht möglich. Allerdings ist das Endprodukt staubfrei und kann gelagert werden (Abbildung 7) (++) .



Abbildung 7: Seaborne Endprodukt nach Zentrifuge

1.2.4 Einfluss auf Abwasserreinigung und Schlammlinie

- Die Rückbelastung von P und N im Schlammwasser aus der Entwässerung entfällt. Es sind positive Auswirkungen auf den Fällmittelbedarf bzw. den Energiebedarf für die Entfernung der Stickstoffverbindungen zu erwarten.
- Die Extraktion des Faulschlammes hat eine Reduktion des Trockensubstanzgehaltes zur Folge. Der TS-Anteil kann um bis zu 7 % reduziert werden.
- Auf pH 3 angesäuerter Schlamm lässt sich bei deutlich reduziertem Flockungsmittelbedarf besser entwässern. Bei pH 2 nimmt die Entwässerbarkeit des Klärschlammes jedoch deutlich ab und handelsübliche Flockungsmittel können nicht eingesetzt werden. Folglich wird eine pH Absenkung auf max. 3 angestrebt.

1.2.5 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus Seaborne Verfahren

Aus der Fest-Flüssigtrennung im Anschluss an die nasschemische Schlammbehandlung fallen Feststoffe mit stark saurem pH-Wert an. Aufgrund des Schwefelsäureeinsatzes ist eine deutliche Erhöhung der Schwefelfracht bzw. des Schwefelgehaltes im festen Rückstand der Entwässerung zu erwarten. Aufgrund seiner Eigenschaften, primär aufgrund des pH-Wertes und des Geruches ist eine direkte oder indirekte landwirtschaftliche Verwertung ausgeschlossen. Bei der Verbrennung ist Schwefel aufgrund seiner korrosiven Wirkung problematisch. Wie im Falle einer großtechnischen Umsetzung mit den sauren Schlamm weiter verfahren wird ist derzeit nicht bekannt.

Bei der ursprünglichen Seaborne Variante fallen bei der gezielten SM-Fällung schwermetallhaltige Schlämme an die einer gesonderten Behandlung (Immobilisierung und Stabilisierung) zugeführt werden müssen.

1.2.6 Umsetzung

Das Seaborne Verfahren wurde 2007 großtechnisch auf der Kläranlage Gifhorn (56.000 EW) implementiert. Seitdem wurden zahlreiche Modifikationen infolge verschiedener Probleme und damit verbundener fehlender Betriebsstabilität vorgenommen.

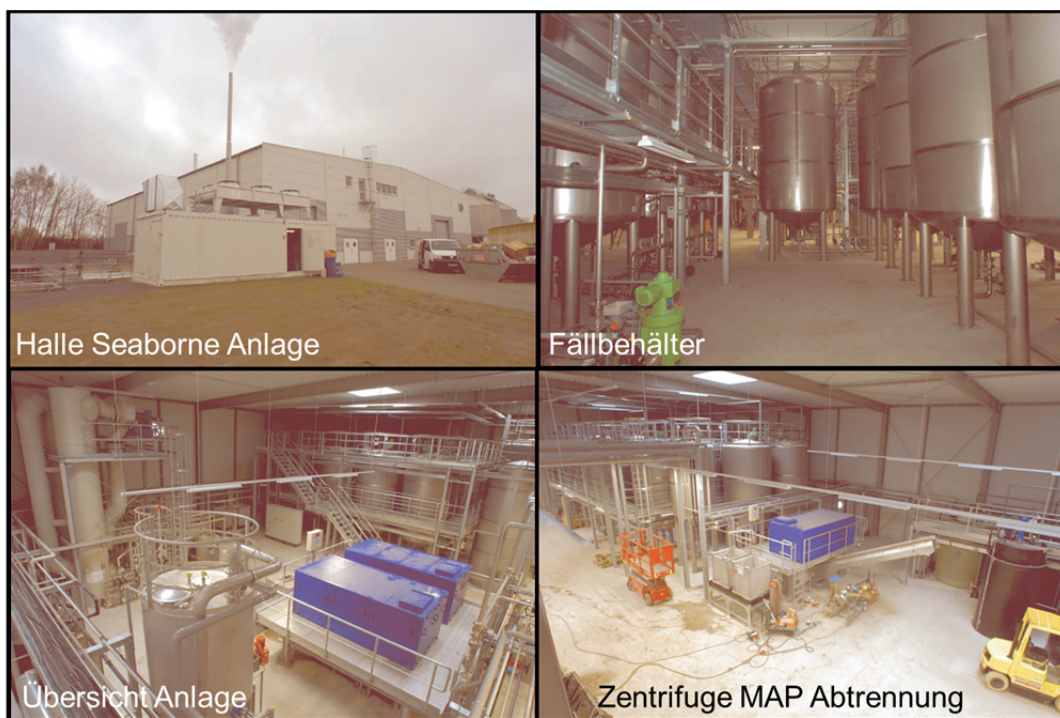


Abbildung 8: Großtechnisch umgesetzte Seaborne Anlagen



1.2.7 Flächenbedarf auf Kläranlage

Sämtliche Anlagenteile werden in einer Halle untergebracht. Der Flächenbedarf für diese Halle kann mit 1.600 m² angenommen werden (++).

| Anlagenteile | Flächenbedarf |
|----------------|----------------------|
| Seaborne Halle | 1.600 m ² |

Tabelle 7: Flächenbedarf Seaborne Verfahren

1.2.8 Ökonomische Grundlagen

Nach Berechnungen von Günther (2011) belaufen sich die Investitionskosten für eine Anlage mit einem Durchsatz von 95 m³ Faulschlamm pro Tag (56.000 EW Kläranlage Gifhorn) für die Prozesse RoHM, NRS1, NRS2, Trocknung und Verbrennung inkl. Ingenieurleistung auf ca. 3,5 Mio. €. Inklusive Halle, Investition in Faulstufe und wissenschaftliche Begleitung fallen Kosten von 7,6 Mio. € an. In der Berechnung für die Referenzanlage werden die Kosten für NRS 2, Trocknung und Verbrennung, sowie Kosten für die Halle, Faulstufe und wissenschaftliche Begleitung nicht berücksichtigt. Die Investitionskosten der einzelnen Prozesse enthalten die anteiligen Kosten der EMSR Technik und etwaige Nebenkosten. Esemén (2012) rechnet in seiner optimierten Variante mit Investitionskosten von rund 430.000 €. Grund ist die deutlich reduzierte Menge an Behältern und damit auch Pumpen aufgrund der geplanten Mehrfachbeschickung der Behälter pro Tag. Die für das ursprüngliche Seaborne Verfahren benötigten Anlagenteile können aus der Literatur nicht eindeutig erhoben werden.

| Stufe | Aggregate [€/Stk.] | Seaborne urspr. | Seaborne modif. |
|---------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| Prozessbehälter | 20.000 | 24 | 4 |
| Chemikalienbehälter | 15.000 | 7 | 4 |
| Pumpen | 3.000 | >4 | 4 |
| Beschickungspumpen | 6.000 | >3 | 3 |
| Dosierstation | 1.500 | >4 | 4 |
| FFT Trennung | 160.000 | 2 | 1 |

Tabelle 8: Kosten und Bedarf Anlagenbau Seaborne

1.3 Ergebnis Seaborne Verfahren ursprünglich

1.3.1 Technologie Bewertung

Das Seaborne Verfahren ist ein äußerst komplexes Verfahren zur direkten Rückgewinnung von P aus dem Faulschlamm. Begonnen mit der Rücklösung des Phosphors, der separaten Abtrennung der Schwermetalle und der notwendigen Abtrennungsverfahren (Dekanter, Zentrifugen) muss die Prozesssteuerung optimal aufeinander abgestimmt sein. Trotz oder gerade aufgrund der Komplexität des Verfahrens ist das Rückgewinnungspotential in Relation zum theoretisch möglichen Potential im Faulschlamm gering. Darüber hinaus sind häufige Beprobungen über zahlreiche Parameter der einzelnen Stoffströme und komplexe Messvorrichtungen notwendig. Das Seaborne Verfahren kann auf bestehenden Kläranlagen sowohl mit biologischer als auch chemischer P-Elimination implementieren werden. Dieser technologische Ansatz wurde großtechnisch umgesetzt, jedoch aufgrund zahlreicher Probleme bei der Prozessführung häufig modifiziert (Esemén, 2012).²

| Seaborne urspr. | |
|---------------------------------|--|
| Entwicklungsstand | Großtechnisch (einmalig) |
| Komplexität Technologie | Nasschemischer Aufschluss, gezielte SM-Entfernung, MAP-Fällung |
| Implementierung | Faulschlamm |
| Wartungsaufwand | Hoch |
| Veränderung Schlammbehandlung | Einfluss auf Entwässerbarkeit bei pH 2 |
| Effektivität des Verfahrens | ~ 30 % |
| Potential bezogen auf KA-Zulauf | 20 % |

| | |
|--|---|
| Qualitativer Ressourcenaufwand | H ₂ SO ₄ , H ₂ O ₂ , Oxalsäure, NaS, NaOH, MgCl ₂ , Energie (elektrisch) |
| Abfallstoffe | Angesäuerter Schlamm, Schwermetallschlamm |
| Negative Effekte auf Abwasserreinigung | Keine |
| Umsetzungspotential Österreich | gering |

Tabelle 9: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Seaborne ursprünglich

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

1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

1.1.1.2 Stoffflussanalyse P

Auf Basis der SFA kann für die Rückgewinnung eine P-Fracht von rund 60.000 kg P/a erhoben werden. Die SFA des ursprünglichen Seaborne Verfahrens zeigt signifikante P-Verluste durch die entwässerten Feststoffe und den Schwermetallschlamm aufgrund der Bildung von unerwünschten Eisenphosphaten. Rund 50 % des gelösten P-Anteils wird bei der Schwermetallfällung aufgrund der pH-Anhebung ausgefällt. Die potentielle Rückgewinnungsfracht beträgt 20.200 kg P/a, was rund 35 % der P-Fracht im Schlamm und rund 30 % der jährlichen P-Zulauf fracht der Referenzkläranlage entspricht.

Der Überstand mit einer P-Fracht von 1.290 kg/a gelangt zurück in den Kläranlagenzulauf. Der N-Gehalt im Endprodukt beträgt 5 % und entspricht einer jährlichen Fracht von 5.180 kg N die aus dem Schlammwasser entfernt werden.

| TK | Filtrat SB3 | Feststoff SB2 | UL | Zentrat SB6 | SM-Schlamm SB5 | UL | MAP SB8 | Überstand SB9 | UL |
|----|-------------|---------------|-----|-------------|----------------|-----|---------|---------------|-----|
| P | 73 | 27 | 0,5 | 49 | 51 | 0,5 | 94 | 6 | 0,5 |

Tabelle 10: Transferkoeffizienten P Seaborne ursprünglich

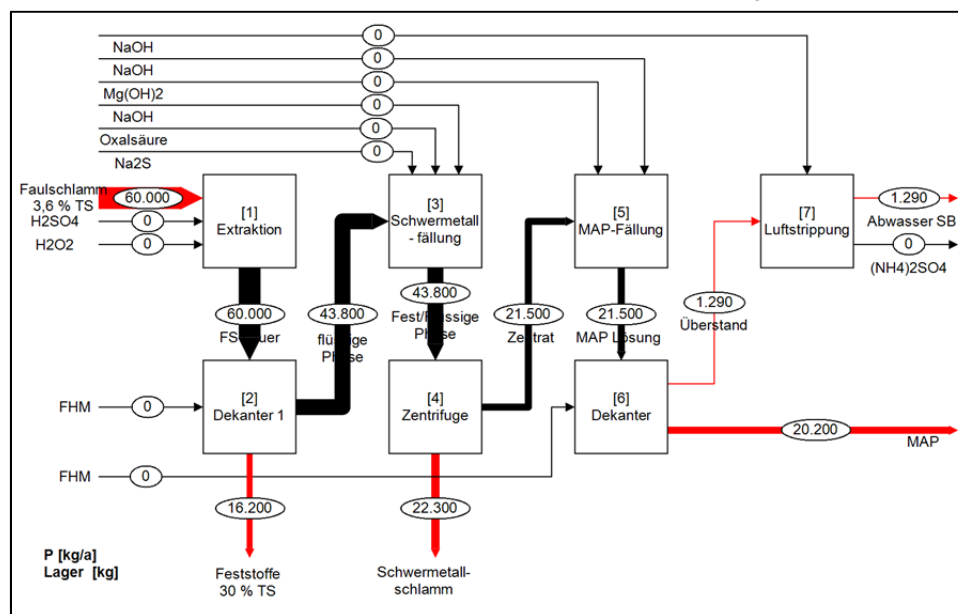


Abbildung 9: Ergebnis SFA Phosphor Seaborne ursprünglich

Einsparung P- und N-Rückbelastung und Schlammreduktion

Im Vergleich zur Referenzkläranlage mit einer P-Rückbelastung im Schlammwasser von rund 6.320 kg/a kann dem Seaborne Verfahren auf 4.450 kg P reduziert werden. Zusätzlich wird in beiden Fällen die Stickstoffrückbelastung auf Basis des Stickstoffgehaltes im Endprodukt berücksichtigt.

| Seaborne urspr. | Reduktion [kg/a] | [€/kg Nährstoff] | Einsparung [€/a] |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Phosphor (P) | 1.870 | 3,45 | 6.452 |

| | | | |
|----------------|-------|------|---------------|
| Stickstoff (N) | 5.731 | 0,75 | 4.298 |
| Gesamt | | | 50.530 |

Tabelle 11: Einsparungen Abwasserreinigung durch reduzierte P und N Rückbelastung

Reduktion Schlammanfall

Infolge der Extraktion des Faulschlammes wird der Feststoffanteil um bis zu 7 % reduziert. Diese Reduktion wird für beide Verfahren berücksichtigt. Der reduzierte Schlammanfall wirkt sich auf die Entsorgungskosten sowie die Transportkosten aus.

| | Reduktion [t/a] | [€/t TS] | Einsparung [€/a] |
|---------------|-----------------|----------|------------------|
| Schlammanfall | ~ 98 | 290 | 28.500 |

Tabelle 12: Reduktion Schlammanfall

Reduktion P-Emissionen Gewässer und P-Fracht im Klärschlamm

Infolge der reduzierten P-Rückbelastung im Schlammwasser kann eine geringe Reduktion der P-Ablauffracht von 7.200 auf 7.010 kg bilanziert werden (Abbildung 10).

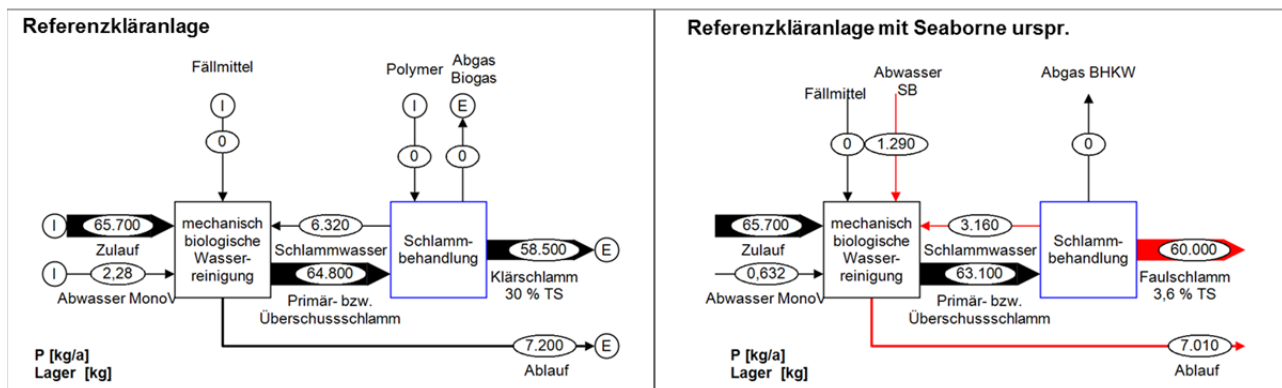


Abbildung 10: Einfluss ursprüngliches Seaborne auf P-Emission Gewässer und P-Fracht Klärschlamm

• Stoffflussanalyse SM

Transfer Schwermetalle und org. Spurenstoffe

Auf Basis detaillierter Schwermetallanalysen sowohl für das ursprüngliche, als auch für das modifizierte Seaborne Verfahren können aussagekräftige Stoffflussanalysen erstellt werden. Da beide Varianten für Arsen keine Daten vorliegen, wurden für alle Prozesse ein TK von 50 % angenommen. Die Analysen für Nickel sind teilweise nicht plausibel. Günther (2011) führt dies auf etwaige Rücklösevorgänge in den Reaktionsbehältern zurück. Zu den organischen Spurenstoffen liegen Daten zu den Gehalten im Endprodukt für AOX, NE, LAS und Phthalat vor. Die grafischen Darstellungen der MFA finden sich im Anhang.

| TK | Filtrat SB3 | Feststoff SB2 | UL | Zentrat SB6 | SM-Schlamm SB5 | UL | MAP SB8 | Überstand SB9 | UL |
|--------|-------------|---------------|-----|-------------|----------------|-----|---------|---------------|-----|
| P | 73 | 27 | 0,5 | 49 | 51 | 0,5 | 94 | 6 | 0,5 |
| As | - (50) | - (50) | 3 | - (50) | - (50) | 3 | - (50) | - (50) | 3 |
| Cd | 76 | 24 | 1 | 73 | 27 | 1 | 41 | 59 | 1 |
| Cr | 59 | 41 | 1 | 53 | 47 | 2 | 19 | 81 | 2 |
| Cu | 86 | 24 | 1,5 | 3 | 97 | 1 | - | - | |
| Hg | 3,4 | 96,6 | 1 | 1 | 99 | 1 | 100 | 0 | 1 |
| Ni | 95 | 5 | 2 | 25 | 85 | 2 | 68 | 32 | 2 |
| Pb | 64 | 36 | 1,5 | 85 | 15 | 1,5 | 24 | 74 | 1,5 |
| Zn | 90 | 10 | 1 | 4 | 96 | 1 | 100 | 0 | 1 |
| AOX | - | - | | - | - | - | - | - | - |
| PAK | - | - | | - | - | - | - | - | - |
| PCDD/F | - | - | | - | - | - | - | - | - |

Tabelle 13: Transferkoeffizienten Rücklösung, Schwermetallentfernung und MAP-Fällung Seaborne Verfahren ursprünglich

2 Entfrachtungsleistung Seaborne ursprünglich

Die Entfrachtungsleistung des Seaborne Verfahrens bezogen auf den Faulschlamm liegt für die meisten Schwermetalle im Bereich > 95 %. Cadmium und Chrom werden zu ~87% bzw. ~78 % entfernt. Die Betrachtung der tatsächlichen Entfrachtungsleistung in Relation zum rückgewonnen Phosphor liegt für die Schwermetalle, As, Cd, Cr, Ni, Pb und die organische Substanz AOX deutlich darunter. Für Cd und Cr bei nur 33 bzw. 53 %. Grund dafür ist, dass z.B. Cd und Chrom bei pH 2 zu 60 – 70 % in Lösung gehen, jedoch bei der sulfidischen Fällung in Relation zu den weiteren Schwermetallen schlechter ausgefällt und damit aus dem Prozess entfernt werden. Organische Verunreinigungen sind im Endprodukt nachweisbar. AOX kann bezogen auf den P zu 45 % entfernt, während NPE und LAS zu >98 % entfrachtet werden (Tabelle 14*Ermittlung der Entfrachtungsleistung auf Basis des Gehaltes im Referenzklärschlamm und Endprodukt des Seaborne Verfahrens

Tabelle 14).

| TK | Faulschlamm [kg/a] | Endprodukt [kg/a] | Rückgewinnung bzw. Entfrachtung [%] | Tatsächliche Entfrachtung [% rel. zu P] |
|--------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|---|
| P | 60.000 | 20.200 | 34 | |
| As | 8,85 | 1,11 | 87,5 | 63 |
| Cd | 2,69 | 0,60 | 77,6 | 33 |
| Cr | 85,58 | 13,61 | 84,1 | 53 |
| Cu | 458,92 | 11,01 | 97,6 | 93 |
| Hg | 1,12 | 0,00 | 99,9 | 99,9 |
| Ni | 63,18 | 4,51 | 92,8 | 79 |
| Pb | 111,13 | 16,00 | 96,0 | 57 |
| Zn | 1.664 | 52,75 | 97,0 | 91 |
| AOX* | 228 | 42,4 | 81,4 | 45 |
| PAK | 14,7 | - | - | - |
| PCDD/F | 36,5 | - | - | - |
| NPE* | 65,7 | 0,4 | 99 | 98 |
| LAS* | 10.950 | 8,6 | 99,9 | 99,9 |
| B(a)P* | 2,19 | 0,001 | 99,99 | 99,99 |

*Ermittlung der Entfrachtungsleistung auf Basis des Gehaltes im Referenzklärschlamm und Endprodukt des Seaborne Verfahrens

Tabelle 14: Entfrachtungsleistung (Seaborne ursprünglich)

Das ursprüngliche Seaborne Verfahren hat signifikanten Einfluss auf die direkten Schwermetallemissionen in die Hydro- und besonders in die Atmosphäre. Im Ablauf der Kläranlage können erhöhte direkte Emissionen für Cd, Cr und Blei festgestellt werden. Zurückzuführen ist dies auf die gute Löslichkeit im nasschemischen Aufschluss und eine schlechte Entfernung in der RoHM-Stufe. Werden diese Schwermetalle bei der Fällung nicht mitausgefällt, gelangen sie in den Überstand und damit zurück in den Kläranlagenzulauf. Wesentlich deutlicher fallen die Veränderungen für die direkten Emissionen in die Atmosphäre aus. Aufgrund der Rücklösung und der teils guten Entfernung in der RoHM-Stufe liegen die Schwermetalle nicht im entwässerten Feststoff vor, der thermisch Behandlung wird, sondern werden im Stofffluss Schwermetallschlamm auf konzentriert. In der Folge werden die direkten Schwermetallemissionen in Relation zur Referenzsituation, die über das gereinigte Rauchgas in die Atmosphäre gelangen, teils deutlich um bis zu 80 % (Cu und Zn) reduziert.

| Ablauf [kg/a] | Referenz | Seaborne urspr. | Δ absolut | Δ % | Rauchgas [kg/a] | Referenz | Seaborne urspr. | Δ absolut | Δ % |
|---------------|----------|-----------------|-----------|-------|-----------------|----------|-----------------|-----------|------|
| As | 2,10 | 2,26 | 0,15 | 7,5% | As | 0,004 | 0,002 | -0,002 | -48% |
| Cd | 1,21 | 1,52 | 0,31 | 25,8% | Cd | 0,004 | 0,001 | -0,002 | -66% |
| Cr | 25,87 | 28,82 | 2,94 | 11,4% | Cr | 0,040 | 0,016 | -0,022 | -57% |
| Cu | 124,26 | 118,28 | -5,98 | -4,8% | Cu | 0,071 | 0,014 | -0,057 | -80% |
| Hg | 0,48 | 0,53 | 0,05 | 11,2% | Hg | 0,045 | 0,038 | -0,007 | -15% |
| Ni | 66,75 | 65,81 | -0,94 | -1,4% | Ni | 0,003 | 0,004 | -0,007 | -69% |
| Pb | 24,96 | 28,64 | 3,70 | 14,8% | Pb | 0,112 | 0,085 | -0,026 | -23% |



| | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|-------|----|-------|-------|--------|------|
| Zn | 730,96 | 720,77 | -10,18 | -1,4% | Zn | 1,022 | 0,205 | -0,817 | -80% |
|----|--------|--------|--------|-------|----|-------|-------|--------|------|

Tabelle 15: Direkte Emissionen Seaborne ursprünglich Prozesskette, Vergleich Referenz

• Ergebnisse Güterflussanalyse

Güterflussanalyse ursprüngliches Seaborne Verfahren

Auf Grundlage des Säurebedarfs von 0,5 kg H₂SO₄/kg TS und dem Referenzklärschlammanfall von 1.492 t TS/a wird ein Säurebedarf von 746 t/a ermittelt. Der H₂O₂, Na₂S, NaOH und Oxalsäurebedarf wird auf Basis der Daten von Günther (2011) für eine 56.000 EW Anlage mit einem Schwermetallschlammanfall von rund 660 t TS/a. berechnet.

Der Fällmittelbedarf wird auf Basis der P-Inputfracht von 21.500 kg/a in den Fällungsreaktor berechnet. Ideale Betriebsparameter für die Fällreaktion sind ein pH 8,5 - 9 und ein stöchiometrisches Verhältnis von Mg:P 1,5:1. Im Falle des Seaborne Verfahren liegen Fällionen wie Mg und Ca aufgrund der vorangegangenen Rücklösung bereits in großem Umfang gelöst im Zentrat vor. Eine quantitative Erhebung ist jedoch kaum möglich. Aufgrund der großen Rücklösung bei pH 2 wird das Fällmittel im Mg:P Verhältnis 0,7:1 zugegeben.. Jährlich fallen rund 215.100 kg des Endproduktes an. Die Kalkulation des Schwermetallschlammanfalles der Referenzanlage basiert auf der von Günther (2011) errechneten jährlichen Menge von 263 t für eine 56.000 EW Anlage. Für die Referenzanlage wird der SM-Schlammanfall durch den Faktor 2 (doppelte EW-Belastung) bzw. um den Faktor 3 (dreifach TS-Fracht) berechnet und daraus der Mittelwert ermittelt. Das entspricht einem SM-Schlammanfall von rund 660 t/a. (o)

| Chemikalienbedarf Extraktion + RoHM | [t/a] | Reinsubstanz [t/a] |
|--|---------|--------------------|
| H ₂ SO ₄ (100 %ig) | | |
| H ₂ O ₂ (35 %ig) | 491,0 | 171,9 |
| Na ₂ S (30 %ig) | 224,4 | 67,3 |
| NaOH (40 %ig) | 1.243,3 | 497,5 |
| Oxalsäure (99 %) | 140,0 | 139,9 |
| Nährstoffgewinnung | | |
| Mg(OH) ₂ (53 %) | 27,7 | 29,0 |
| NaOH (40 %) | 289,4 | 723,3 |
| FHM (50 % WS) | 6,6 | 13,2 |

Tabelle 16: Chemikalienbedarf Referenzanlage

| Ressourcen | kg/kg TS | [kg/kg P _{rückg.}] | kg/[EW*a] |
|--------------------------------|----------|------------------------------|-----------|
| H ₂ SO ₄ | 0,5 | 37,0 | 7,5 |
| H ₂ O ₂ | 0,12 | 8,5 | 1,7 |
| NaOH | 0,53 | 39,0 | 2,2 |
| Na ₂ S | 0,15 | 11,3 | 0,74 |
| Oxalsäure | 0,09 | 6,9 | 1,4 |
| Mg(OH) ₂ | 0,02 | 1,4 | 0,28 |
| FHM | 0,004 | 0,33 | 0,07 |
| kWh | 0,14 | 21,7 | 4,38 |

Der Bedarf an elektrischer Energie wird im Vergleich zu den von Günther (2011) ermittelten Daten um den Faktor 1,5 erhöht. Der Energiebedarf wird mit rund 438.000 kWh/a angenommen.

Infolge der teilweisen Rücklösung der Feststoffe durch das Ansäuern des Schlammes, wird die Trockensubstanzfracht um 7 % reduziert. Bei gleichbleibender Entwässerung auf 30 % TS wird die thermisch zu behandelnde Schlammfracht auf 4.650 t/a verringert.

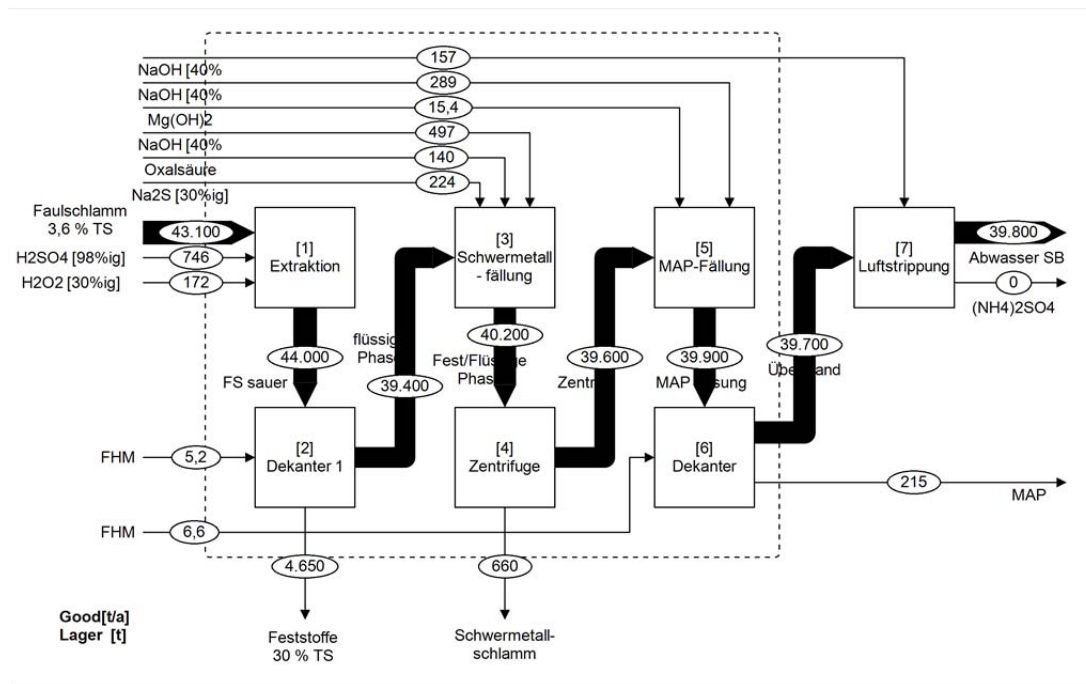


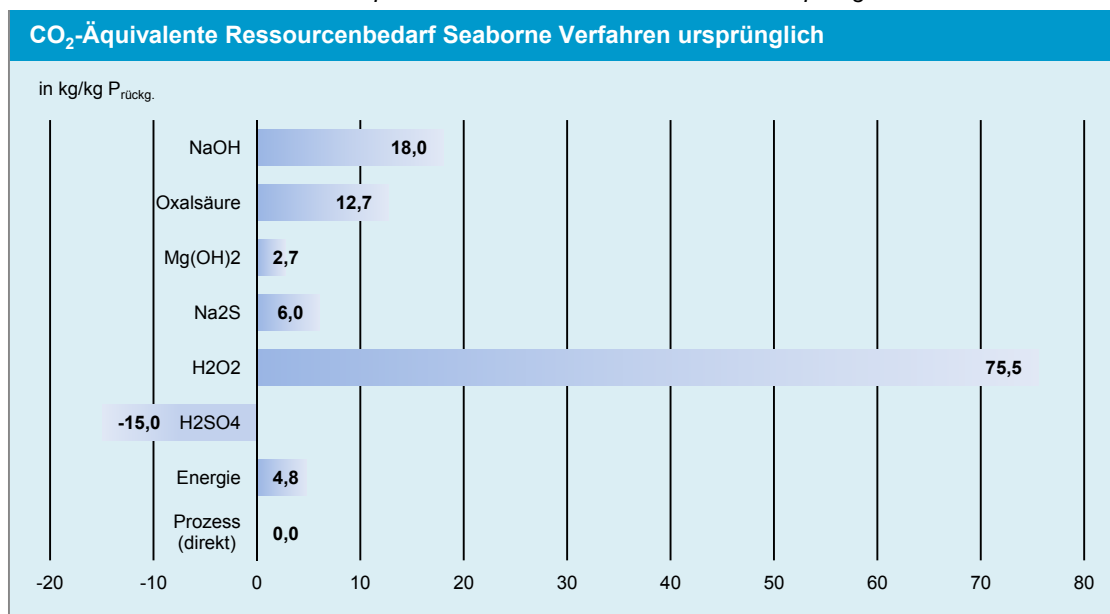
Abbildung 11: Ergebnis Güterflussanalyse Seaborne ursprünglich

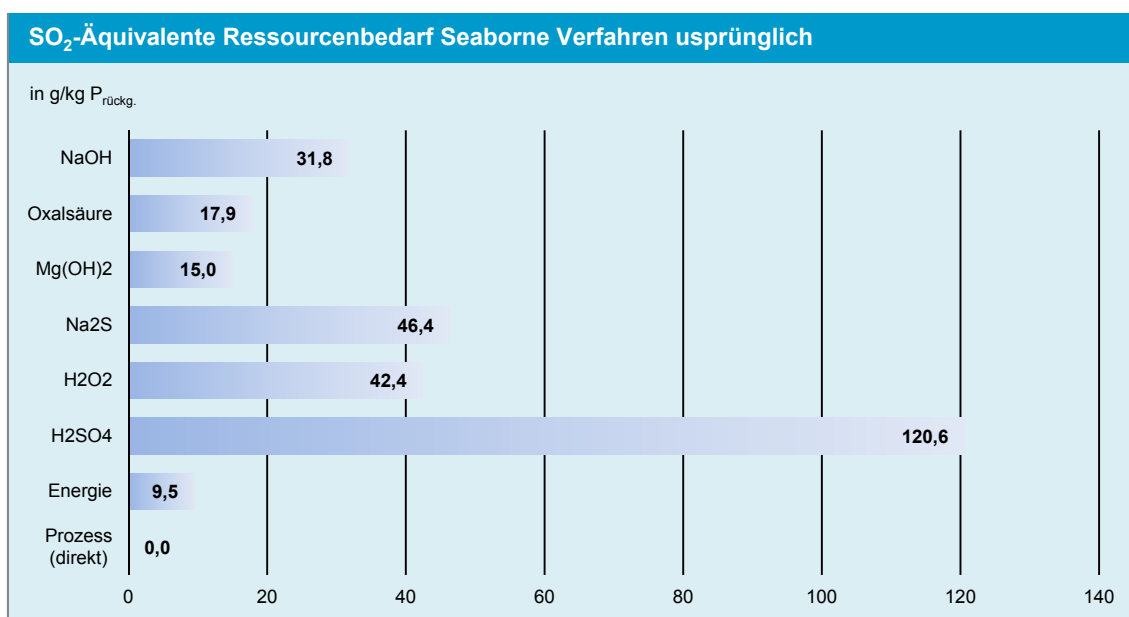
• Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Der jährliche Ausstoß an CO₂- bzw. SO₂-Äquivalenten beträgt 2.115.200 kg bzw. 5.720 kg. Die CO₂-Emissionen der Schwefelsäure (H₂SO₄) gehen als Gutschrift in die Berechnung ein. Dominiert werden die indirekten CO₂- und SO₂-Emissionen aufgrund des Einsatzes von Wasserstoffperoxid (H₂O₂). Der Anteil der Emissionen aus dem elektrischen Energieverbrauch ist im Vergleich zu den Gesamtemissionen äußerst gering. Die Emissionen bezogen auf 1 kg P_{rückg.} sind aus Abbildung 12 zu entnehmen. Aus dem Prozess sind keine direkten gasförmigen Emissionen zu berücksichtigen.

| Gasemissionen | [kg/a] | [kg/EW*a] | [kg/kg P _{rückg.}] |
|------------------------------|-----------|-----------|------------------------------|
| CO ₂ -Äquivalente | 2.115.200 | 21,1 | 104,9 |
| SO ₂ -Äquivalente | 5.720 | 0,06 | 0,28 |

Tabelle 17: Spezifische Gasemissionen Seaborne ursprünglich



Abbildung 12: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente [kg bzw. g/kg P_{rückg.}] Seaborne ursprünglich

- Indirekte Schwermetallemissionen Seaborne ursprünglich**

| Indirekt Emissionen | Atmosphäre [g/a] | Hydrosphäre [mg/a] |
|---------------------|------------------|--------------------|
| As | 10,0 | 0,03 |
| Cd | 4,0 | 0,06 |
| Cr | 11,5 | 0,06 |
| Cu | - | - |
| Hg | - | 0,03 |
| Ni | 23,8 | - |
| Pb | 37,2 | 0,42 |
| Zn | - | - |
| AOX | - | 49,76 |
| PAK | -0,0010 | - |
| PCDD/F | 0,00003 | - |

Tabelle 18: Indirekte SM-Emissionen Seaborne ursprünglich

- Kumulierter Energieaufwand (KEA)**

Für das ursprüngliche Seaborne Verfahren wird ein hoher kumulierter Energieaufwand von 111,8 kWh/EW*a ermittelt. Dies ist auf die ressourcenintensive Prozessführung zurückzuführen.

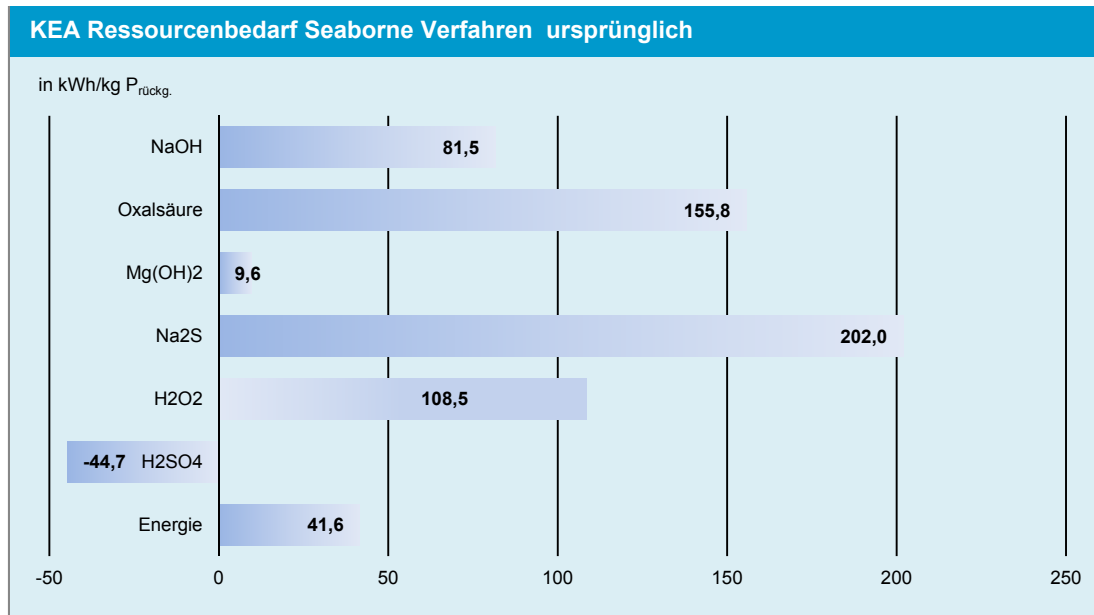


Abbildung 13: KEA Ressourcenbedarf Seaborne Verfahren ursprünglich

| KEA | [kWh] | [kWh/EW*a] | [kWh/kg P _{rückg.}] |
|---------------------|-------------------|--------------|-------------------------------|
| Chemikalien | 10.339.000 | 103,4 | 512,7 |
| Elektrische Energie | 839.000 | 8,4 | 41,6 |
| Gesamt | 11.178.000 | 111,8 | 554,3 |

Tabelle 19: Kumulierter Energieaufwand Seaborne ursprünglich

Abbildung 14 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse jener Parameter die in die ökologische Bewertung des Rückgewinnungsverfahrens einfließen.

Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren

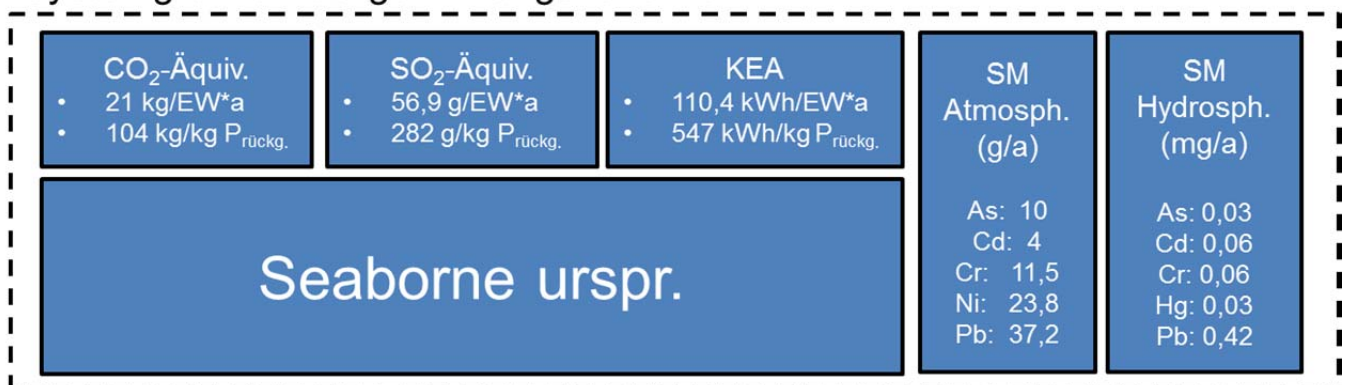


Abbildung 14: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)



2.1.1 Ergebnisse ganzheitliche Bewertung Seaborne ursprünglich

Die Implementierung der Seaborne Anlage kann Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess bzw. die Schlammlinie einer Kläranlagen haben und damit wiederum nachfolgende Prozesse beeinflussen, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

| Faktor | Einfluss auf |
|-----------------------------------|--|
| Verringerte P und N Rückbelastung | Kosten Abwasserreinigung, Schlammanfall, Transport Klärschlamm, |
| Verringerter Schlammanfall (-7%) | Reduktion energieausbeute Verbrennung, Transportkosten, Entsorgungskosten, Ressourcenaufwand Verbrennung |
| Ressourcenaufwand Seaborne | Indirekte Emissionen, Kosten |
| Schwermetallschlamm | Transport, spezielle Reststoffbehandlung, |
| MAP-Produktion | Kosten (Erlöse) |

Tabelle 20: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Seaborne ursprünglich

Berücksichtigung Transport

Infolge der Ansäuerung der Klärschlammes wird ein Teil der ursprünglichen Trockensubstanzfracht (-7 %) aufgelöst bzw. rückgelöst, wodurch die zu transportierende Klärschlammfracht zur Verbrennung reduziert wird. Der anorganische Anteil des Klärschlammes bleibt unverändert, womit der Ascheanfall als konstant angenommen werden kann. Der anfallende Schwermetallschlamm (~660 t/a) muss einer gesonderten Behandlung zugeführt werden, womit ein zusätzlicher Transportaufwand berücksichtigt wird.

| Transportwege | [t/a] | [tkm] | [€/EW*a] |
|--|-------|----------------|-------------|
| Klärschlamm – MonoV | 4.650 | 650.700 | 0,91 |
| MAP - Landwirtschaft | 0 | 0 | 0 |
| SM Schlamm – Immobilisierung | 660 | 65.800 | 0,09 |
| Flug- und Bettasche - Reststoffdeponie | 716 | 71.600 | 0,10 |
| Filterkuchen - Untertagedeponie | 32 | 32.000 | 0,04 |
| Gesamt Transport | | 820.100 | 1,16 |

Tabelle 21: Transportwege Seaborne ursprünglich

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation ist eine deutliche Erhöhung der treibhausrelevanten Emissionen (+476 %), sowie der Gase mit Versauerungspotential (629 %) zu beobachten (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dies ist vor allem auf die indirekten Emissionen des Seaborne Verfahrens zurückzuführen. Für die Behandlung der anfallenden Schwermetallschlämme sind CO₂- und SO₂ Emissionen im ungefähr gleichen Ausmaß wie für die Abwasserreinigung zu erwarten. Grund dafür sind die indirekten Gasemissionen aufgrund des Zementbedarfes. Ähnlich verhält es sich beim kumulierten Energieaufwand.

| CO ₂ -Äquivalente | [kg] | [CO ₂ -Äquiv./EW*a] | [kg CO ₂ -Äquiv./kg P _{rückg.}] |
|------------------------------|-----------|--------------------------------|--|
| Seaborne urspr. | 2.434.000 | 24,3 | 120,7 |
| Referenz | 422.924 | 4,2 | - |
| Δ | +476 % | | |
| SO ₂ -Äquivalente | [kg] | [SO ₂ -Äquiv./EW*a] | [g SO ₂ -Äquiv./kg P _{rückg.}] |
| Seaborne modif. | 5.680 | 0,057 | 0,28 |
| Referenz | 779 | 0,00078 | - |
| Δ | +629 % | | |

Tabelle 22: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente Prozesskette Seaborne ursprünglich

3 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

| KEA | Rohstoffe | Energie | [kWh/EW*a] | [kWh/kg P _{rückg.}] |
|------------|-----------|-----------|------------|-------------------------------|
| Kläranlage | 864.100 | 1.006.000 | 18,7 | |

| | | | | |
|-------------------------|-------------------|---------|---------------|--------------|
| Seaborne | 5.441.900 | 699.100 | 61,4 | |
| SM-Schlammbehandlung | 292.500 | | 14,5 | |
| Monoverbrennung | 135.500 | 880.400 | 10,2 | |
| Deponie | 25.800 | | 0,3 | |
| Transport | 131.000** | | 1,3 | |
| Gesamt | 14.510.000 | | 145,1 | |
| Substitution Strom | -337.400 | | -3,4 | |
| Substitution Wärme | -1.267.600 | | -12,7 | |
| Substitution P+N-Dünger | -155.600 | | -1,6 | |
| Gesamt | 12.753.000 | | 127,53 | 632,4 |
| Referenz | 1.252.688 | | 12,5 | |
| Δ | +918% | | | |

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

Tabelle 23: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette Seaborne ursprünglich

3.1.1 Ergebnis Schwermetallemissionen

Der Anteil der indirekten SM-Emission in die Luft aus dem Ressourcenbedarf für das Seaborne Verfahren an den Gesamtemissionen ist mit < 5 % gering. Allerdings liegt der Anteil der indirekten Emissionen für As deutlich höher, womit der Einfluss auf die Gesamtemissionen in die Atmosphäre deutlich wird. Daraus ergibt sich eine Verringerung im Vergleich zur Referenzsituation von rund 130 %. Zurückzuführen ist dies auf die große As-Gutschrift der Luftemissionen durch die Schwefelsäure. Im Falle der Emissionen in die Gewässer kann keine signifikante Veränderung der SM-Einträge beobachtet werden (Tabelle 49).

| Emissionen Gesamt | Atmosphäre [g/a] | Δ Referenz [%] | Hydrosphäre [kg/a] | Δ Referenz [%] |
|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| As | 13,3 | +176 | 2,10 | -1,2 |
| Cd | 6,5 | +43 | 1,21 | -0,1 |
| Cr | 30,5 | -24,8 | 25,67 | -0,8 |
| Cu | - | - | - | - |
| Hg | - | - | 0,44 | -7,3 |
| Ni | 48,9 | +97,1 | - | - |
| Pb | 132,3 | +14,4 | 25,42 | 1,9 |
| Zn | - | - | - | - |
| AOX | - | - | 338,70 | -0,4 |
| PAK | 155,8 | +1,0 | - | - |
| PCDD/F | 0,000001 | | - | - |

Tabelle 24: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation

3.1.2 Ergebnis Endprodukt

Das Endprodukt setzt sich aus Magnesiumammoniumphosphaten und Magnesiumphosphaten zusammen. Der Phosphorgehalt liegt bei rund 10 %. Die Schwermetallgehalte liegen deutlich unter den Anforderungen der Düngemittelverordnung. Bezogen auf den Hauptnährstoff Phosphor liegen alle Schwermetallkonzentrationen deutlich unter jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP).

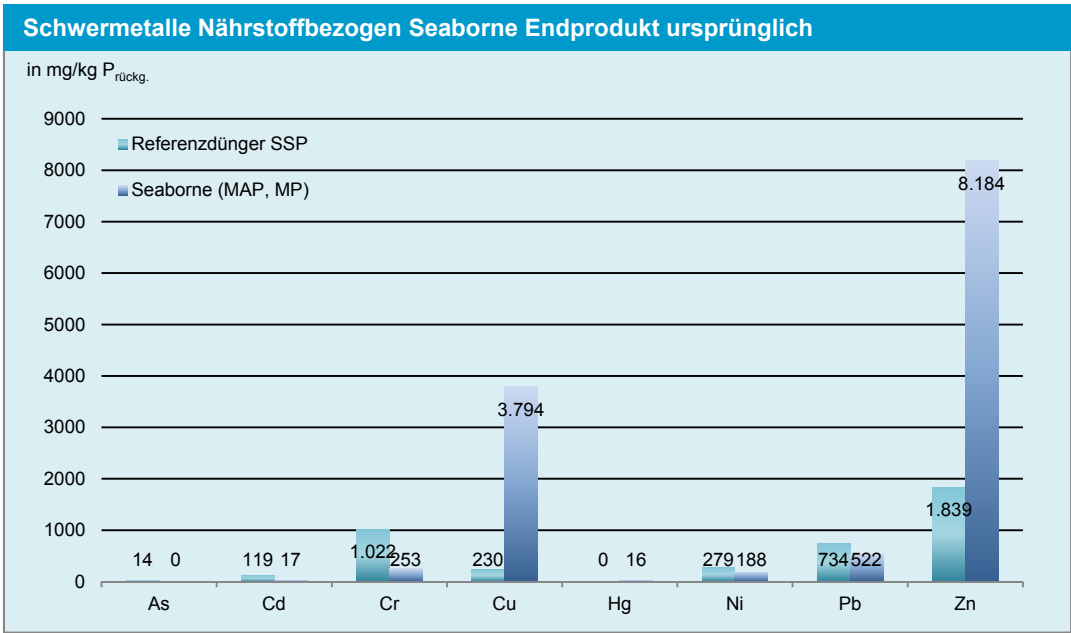


Abbildung 15: Schwermetalle Nährstoffbezogen Seaborne Endprodukt ursprünglich Vergleich SSP

| Bewertung Endprodukt | MAP Seaborne urspr. ® | SSP |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Löslichkeit | Gut | Sehr Gut |
| Düngewirksamkeit | Sehr Gut | Sehr Gut |
| Monetäre Wert [€/t Endprodukt] | 281 | 230 |
| Anorganische Verunreinigungen | | |
| SM:P [mg Cd/kg P] | 17 | 118 |
| Schadeinheit [SE/kg P] | 0,18 | 1,26 |
| Referenzbodenmethode [*] | 1.030 (Zn*) | 1.450 (Cd*) |
| Organische Verunreinigungen | | |
| Keine organische Spurenstoffe | 3 ¹ | 5 |
| Keine hygienischen Bedenken | 5 ¹ | 5 |
| Handhabung | | |
| Einfache Lagerung möglich | 5 | 5 |
| Direkter Einsatz in LW möglich | 3 | 5 |

Tabelle 25: Bewertung Seaborne Endprodukt

Die nährstoffbezogene Darstellung zeigt eine zum SSP-Dünger deutlich verringerte Cd, Cr, Ni und Pb Konzentration. Allerdings sind im Endprodukt sehr hohe Cu:P und Zn:P Verhältnisse nachweisbar. Diese liegen deutlich über jene des SSP-Düngers. Das Cd:P Verhältnis liegt mit 17 mg Cd/kg P deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Die Schadeinheit liegt mit 0,18 deutlich unter jenem eines SSP. In erster Linie aufgrund des hohen Zn Gehaltes im Endprodukt zeigt die Referenzbodenmethode, dass eine 1.030 malige Aufbringung erfolgen kann, bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, könnte das Seaborne Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 3,6 häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe wie AOX (~200 mg/kg TS), B(a)P (0,005 mg/kg TS), NPE (2 mg/kg TS), Phthalate (1 mg/kg TS) und LAS (40 mg/kg TS) können in niedrigen Konzentrationen detektiert werden (Bewertung 0,5). Hygienische Bedenken sind laut Herstellern nicht gegeben (0). Das Endprodukt ist staubig bis kristallin. Eine Zwischenlagerung ist möglich, allerdings muss noch eine Konfektionierung bzw. Pelletierung erfolgen, damit das Produkt direkt mithilfe moderner Ausbringungsgeräte in der Landwirtschaft ausgebracht werden kann.

3.1.3 Ökonomische Bewertung

4 Jahreskosten

Die Investitionskosten für die Umsetzung des ursprünglichen Seaborne Verfahren kann auf Basis einer detaillierten Kostenanalyse für eine Anlage mit 56.000 EW abgeleitet werden (Günther, 2011). Die Kosten des ursprünglichen Seaborne Verfahrens belaufen sich unter Abzug der Anlagenteile für NRS2 (Ammoniakstrippung), Trocknung und Verbrennung auf rund 2.115.000 €. Mittels des Up-Scaling Faktors von 1,25 und Ingenieurleistungen im Ausmaß von 10 % der Anlagentechnik, werden die Investitionskosten im Falle einer Umsetzung auf der Referenzkläranlage auf 2.134.000 € angenommen. Rund 34 % der Investitionskosten entfallen auf die Bautechnik (ND 30 Jahre) und 66 % auf die Maschinentechnik (ND 15 Jahre). Aufgrund des wartungsintensiven Betriebes werden die Wartungskosten mit 5 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand wird mit 2 MA/Jahr angenommen. Der Ressourcenbedarf bezieht sich auf die eingesetzte Reinsubstanz.

| Jahreskosten | Menge (t) | Preis/Einheit | €/a |
|--------------------------------|-----------|---------------|------------------|
| Kapitalkosten | | | 169.100 |
| Wartung + Reparaturen | | | 106.700 |
| H ₂ SO ₄ | 746,0 | 150 €/t | 111.900 |
| H ₂ O ₂ | 171,9 | 680 €/t | |
| NaOH | 786,9 | 330 €/t | 88.200 |
| Na ₂ S | 67,3 | 950 €/t | 70.500 |
| Oxalsäure | 140,0 | 600 €/t | 84.000 |
| Mg(OH) ₂ | 28,3 | 230 €/t | 6.500 |
| FHM; | 6,6 | 2000 €/t | 13.200 |
| Energie | 547.000 | 0,1 €/kWh | 54.700 |
| Personal | 2 | 50.000 €/MA | 100.000 |
| Entsorgung | 660 | 250 €/t | 131.500 |
| Betriebskosten | | | 1.025.700 |
| Gesamt | | | 1.194.800 |

Tabelle 26: Jahreskosten Seaborne ursprünglich (Referenzkläranlage 100.000 EW)

| Einsparungen/Erlöse | Menge (t) | Preis/Einheit | €/a |
|------------------------|-----------|---------------|---------------|
| MAP Erlöse | 215,1 | 281,4 | 60.500 |
| P-Reduktion | 1,87 | 3,45 | 6.500 |
| N-Reduktion | 5,73 | 0,75 | 4.300 |
| Konditionierungsmittel | | | - |
| Schlammreduktion | 98,2 | 290 | 28.500 |
| Gesamt | | | 99.800 |

Tabelle 27: Einsparungen und Erlöse Seaborne ursprünglich (Referenzkläranlage 100.000 EW)

| Spezifische Kosten | € |
|--------------------------------|------|
| €/kg P _{rückgewonnen} | 52,9 |
| €/EW*a | 10,7 |
| €/E*a | 21,4 |

Tabelle 28: Spezifische Kosten Seaborne ursprünglich (100.000 EW)

Die Berechnungen zeigen, sehr hohe Kosten für das Seaborne Verfahren unter den gegebenen Voraussetzungen (Referenzkläranlage 100.000 EW). Besonders hoch fallen die produktspezifischen Kosten aus. Dies ist zum einen auf den hohen Chemikalienaufwand aber vor allem auf die in Relation zum möglichen P-Potential im Klärschlamm gering ausfallende P-Rückgewinnung von rund 20.150 kg (~35% Rückgewinnungsquote). Aber auch bei einer unwahrscheinlichen Verdoppelung der Rückgewinnungsquote muss mit produktspezifischen Kosten von > 25 €/kg P_{rückg.} gerechnet werden. Im Fall einer Implementierung des Verfahrens auf Kläranlage mit höherer Belastung können die Kosten nicht signifikant gedrückt werden.

Grund dafür ist der direkt proportional steigende Bedarf an Säuren, Base und Fällmittel sowie die mit den Investitionskosten steigenden Wartungskosten. Für Kosten die sich nicht direkt proportional zur Kläranlagengröße verhalten werden folgen Annahmen (Up-scaling Faktoren) getroffen.

| | 100.000 EW | 200.000 EW | 500.000 EW | 1.000.000 EW |
|--------------------|------------|------------|------------|--------------|
| Investitionskosten | 1 | 1,25 | 2 | 4 |
| Energie | 1 | 1,25 | 1,5 | 2 |
| Personal | 1 | 1 | 2 | 3 |

Tabelle 29: Kostenanpassung als Faktor zur Kläranlagengröße

5 Kostenaufgliederung

Anhand der Kostenaufteilung wird die ressourcenintensive Betriebsweise der Seaborne Technologie deutlich (Abbildung 16). Der Anteil der Betriebskosten an den Jahreskosten beträgt rund 86 %, wobei rund 62 % der Betriebskosten auf den Chemikalienbedarf entfallen.

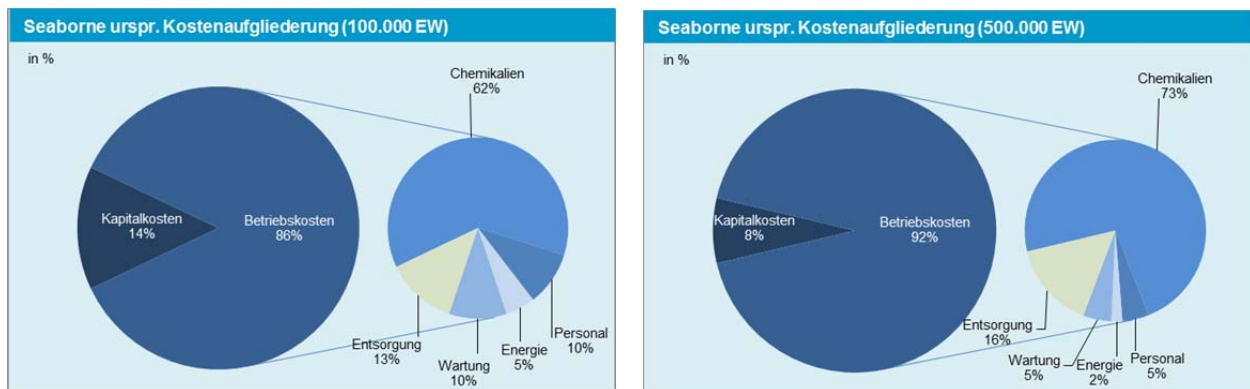


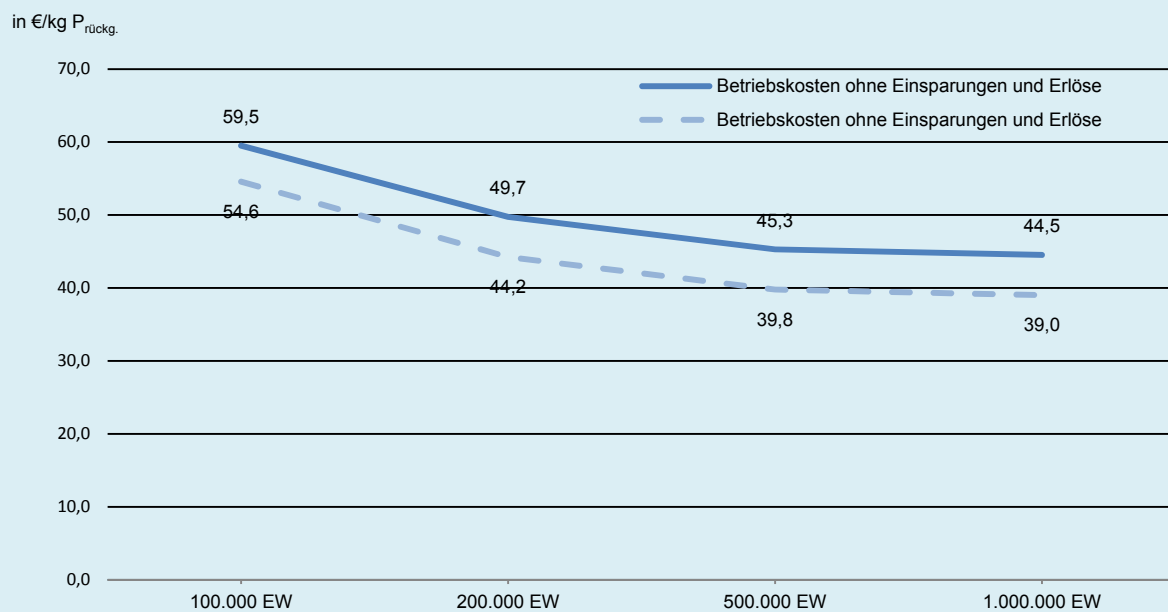
Abbildung 16: Kostenaufgliederung Seaborne ursprünglich. 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)

6 Variantenrechnung

Im Falle einer Umsetzung des Verfahrens auf größeren Kläranlagen ist aufgrund des gleichbleibenden Chemikalienaufwandes, aber proportional abnehmender Investitions-, Energie- und Personalkosten mit einem relativen Anstieg des Anteils der Betriebskosten zu rechnen. Für eine Umsetzung auf einer 500.000 EW Anlage, liegt der Anteil der Betriebskosten bei rund 92%. Abbildung 18 zeigt zusammenfassend die Entwicklung der Kosten, abhängig von der Kläranlagengröße. Mit zunehmender Kläranlagengröße steigen der Anteil der Kosten für Chemikalien und die Kosten für die Entsorgung der Abfallstoffe (SM-Schlamm) in Relation zu den Gesamtkosten.

Möglichkeiten für einen kostengünstigeren Betrieb sind durch Veränderung der Betriebsparameter vor allem im Prozess der Rücklösung gegeben. Explizit betrifft dies ein pH von 3 statt 2, da in diesem Bereich der Säurebedarf überproportional steigt. Am Beispiel des modifizierten Seaborne Verfahrens (Esemen, 2012) werden die Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Für das ursprüngliche Verfahren sind die Einnahmen bzw. Einsparungen zu gering um die Jahreskosten abzüglich der Kapitalkosten decken zu können. Deshalb ist keine Amortisation der Anlagenteile zu erwarten.

Produktspezifische Kosten Seaborne ursprünglich



Einwohnerspezifische Kosten Seaborne ursprünglich

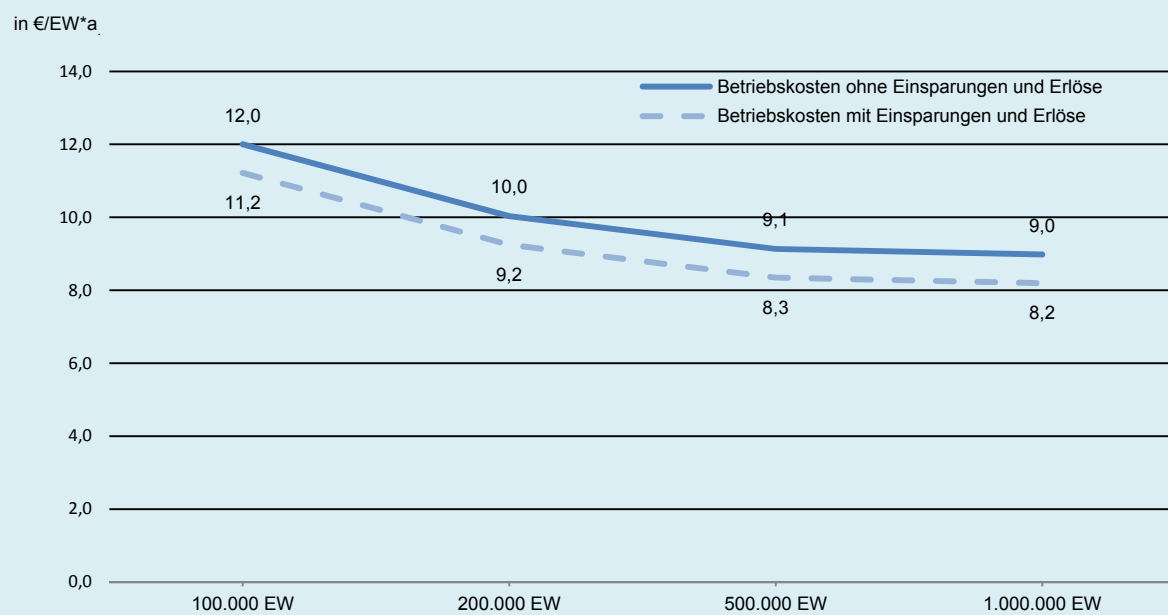


Abbildung 17: Produkt- und Einwohnerspezifische Kosten Seaborne ursprünglich; Variation Anlagengröße

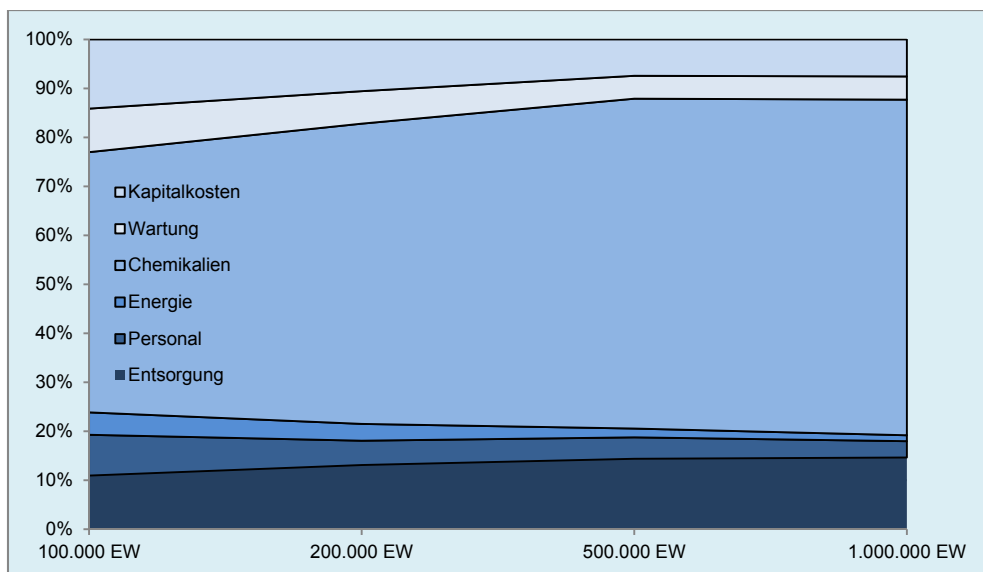


Abbildung 18: Entwicklung der anteiligen Kosten in Abhängigkeit der Kläranlagengröße

| Jahreskosten | 100.000 EW | | 500.000 EW | |
|---|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| | €/EW*a | €/kgP _{rück.} | €/EW*a | €/kgP _{rück.} |
| Kläranlage | 6,0 | | | |
| (Mit-)Verbrennung (exkl. Ascheentsorgung) | 4,6 | | | |
| Rückgewinnung | 10,68 | | | |
| Entsorgung Abfallstoffe (z.B. SM-Schlamm) | 1,7 | | | |
| Transporte | 1,1 | | | |
| Gesamt | 23,3 | 114,4 | 21,4 | 169,5 |
| Einsparungen/Erlöse | 1,0 | | 0,8 | |
| Gesamt neu | 22,3 | 109,4 | 20,6 | 163,2 |

Tabelle 30: Jahreskosten gesamte Prozesskette Seaborne ursprünglich

In den Kosten zur Entsorgung der Abfallstoffe sind enthalten die Behandlungs- bzw. Ablagerungskosten für Flugasche, Filterkuchen und SM-Schlamm. Verglichen mit den Referenzkosten von 11,1 €/EW*a steigen die Kosten auf 22,1 bzw. 20,6 €/EW*a. Im Vergleich zur Referenzsituation ist mit einer Verdoppelung der Kosten bzw. mit einem Anstieg von 87 % im Falle einer Umsetzung auf einer größeren Anlage über die gesamte Prozesskette zu rechnen.

7 Sensitivitätsanalyse

Die Preissteigerung der Chemikalien spiegelt sich in einem 13 %igen Anstieg der Kosten wieder (Abbildung 19). Durch Preissteigerungen von Säuren, im Falle des ursprünglichen Seaborne Verfahren Schwefel- und Oxalsäure, steigen in Szenario 2 die Jahreskosten um rund 9 %. Variable Investitionskosten haben indes den geringsten Einfluss auf die Kosten (7 %).

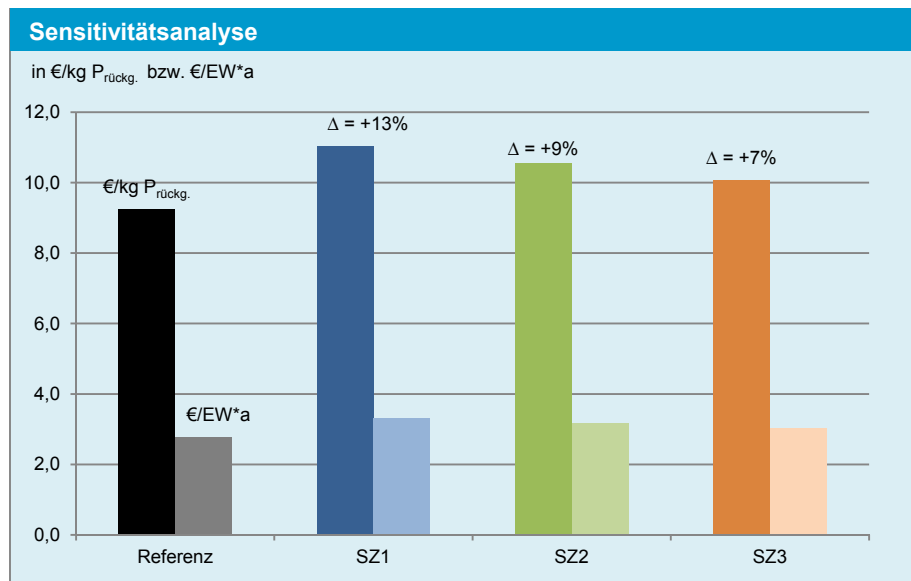
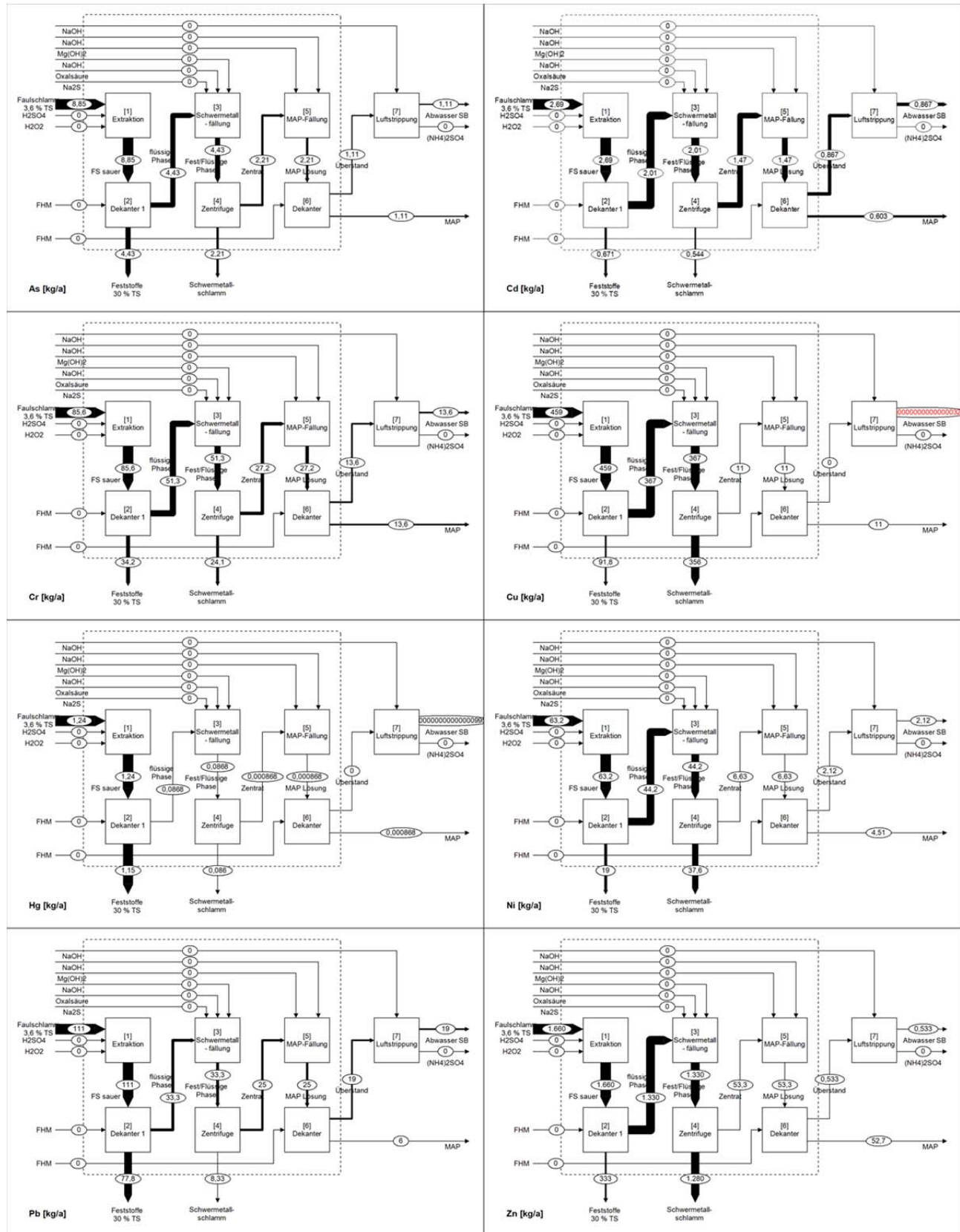


Abbildung 19: Sensitivitätsanalyse Seaborne ursprünglich

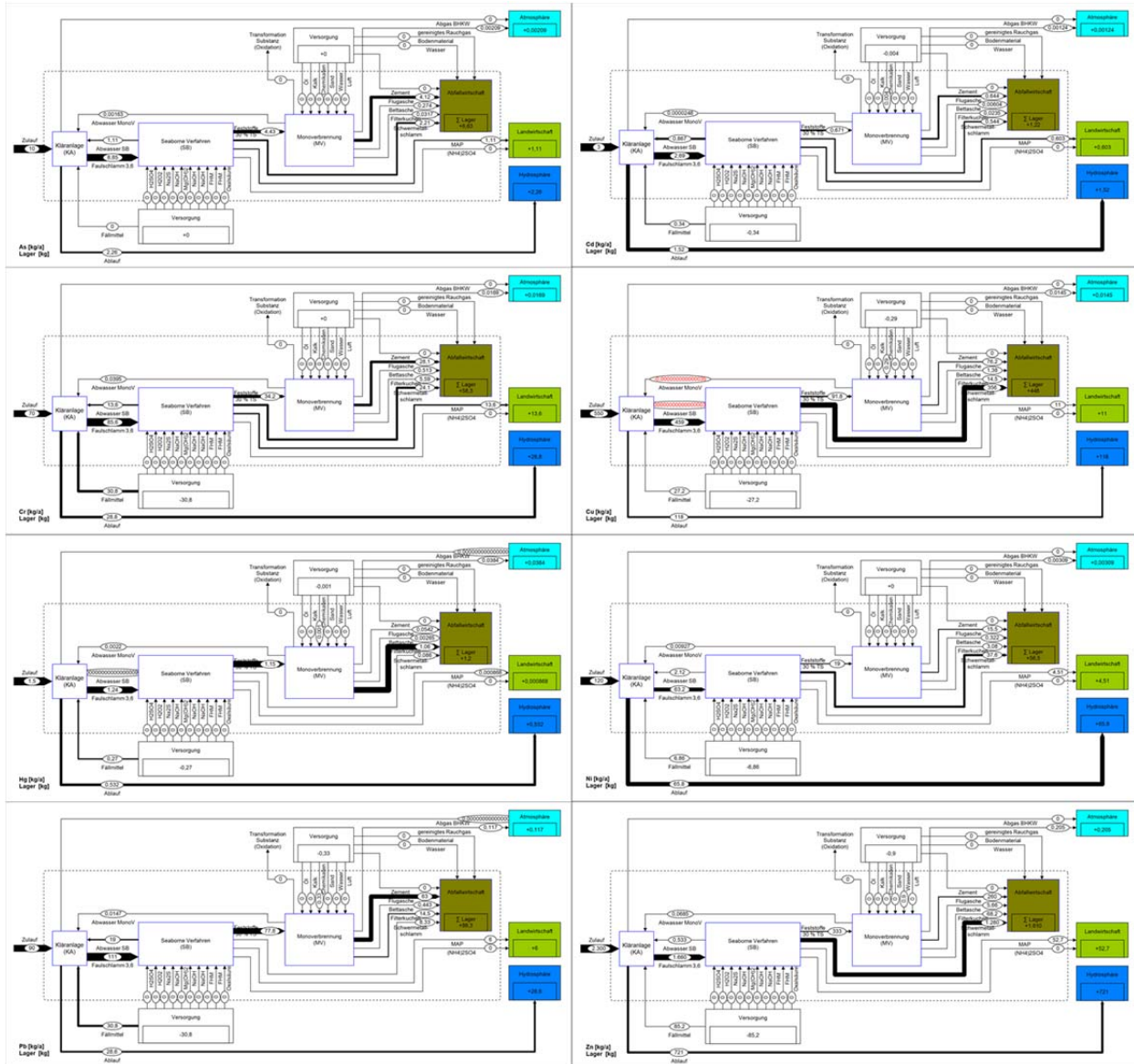


7.1 Anhang

7.1.1 Ergebnisse Stoffflussanalyse Seaborne ursprünglich



7.1.2 Ergebnisse Stoffflussanalyse Seaborne ursprünglich gesamte Prozesskette





7.2 Ergebnis SEABORNE modifiziert

Im Vergleich zum ursprünglichen Seaborne Verfahren wurden die Prozessführung und der Bedarf an Chemikalien deutlich reduziert. Wesentlicher Unterschied ist der geringere pH-Wert bei der Rücklösung und damit weitreichende Folgen für die anschließende Prozessführung. Da kaum Schwermetalle rückgelöst werden, entfällt eine gesonderte SM-Entfrachtung. Zudem kann der Basenbedarf deutlich reduziert werden. Trotzdem sind häufige Beprobungen über zahlreiche Parameter der einzelnen Stoffströme und komplexe Messvorrichtungen notwendig. Die modifizierte Variante wurde großtechnisch bereits umgesetzt (Esemen, 2012). Aufgrund der Modifikationen kann das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Faulschlamm auf rund 55 % erhöht werden.

| Anlagenteile | |
|---------------------------------|-----------------|
| Komplexität Technologie | 3 |
| Implementierung | 1 |
| P-Elimination | Bio-P, Simultan |
| Schlammbehandlung | Faulung |
| Entwicklungsstand | Großtechnisch |
| P-Rückgewinnung Verfahren | 55 % |
| P-Rückgewinnung bez. auf Zulauf | 50 % |

Tabelle 31: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential Seaborne ursprünglich

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

7.2.1 Stoffflussanalyse P

Der Anteil des gelösten Phosphors liegt bei pH 3 im Bereich von 65 ± 10 %. Bei der Fest/Flüssigtrennung verbleibt ein Teil des gelösten Phosphors in den Feststoffen, wodurch der Transfer geringer als der tatsächlich rückgelöste Anteil im Faulschlamm ausfällt. Bei der Fällung wird der überwiegende Anteil des gelösten Phosphors ausgefällt. Allerdings kann nicht 100 % des gefällten Endproduktes abgetrennt werden, wodurch ein Transfer von 95 % angenommen wird. Durch Optimierung der Prozesse kann somit trotz der reduzierten P-Rücklösung bei pH 3, die Rückgewinnungsquote bezogen auf die P-Fracht im Faulschlamm auf 55 % gesteigert. Ungeachtet dessen, wird die Hälfte der P-Fracht aus dem Prozess ausgeschleust und steht einer Rückgewinnung nicht mehr zur Verfügung. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf liegt die Rückgewinnungsquote bei ~45 %.

| TK | Zentrat SB3 | Feststoff SB2 | UL | MAP SB5 | Überstand SB6 | UL |
|----|----------------|------------------|-----|------------|------------------|-----|
| P | 55 | 45 | 0,5 | 95 | 5 | 0,5 |

Tabelle 32: Transferkoeffizienten Phosphor

Der Reaktorablauf mit einer P-Fracht 1.580 kg P gelang zurück in den Kläranlagenzulauf. Der N-Gehalt im Endprodukt beträgt 5 % und entspricht einer jährlichen Fracht von 5.180 kg N die aus dem Schlammwasser entfernt werden.

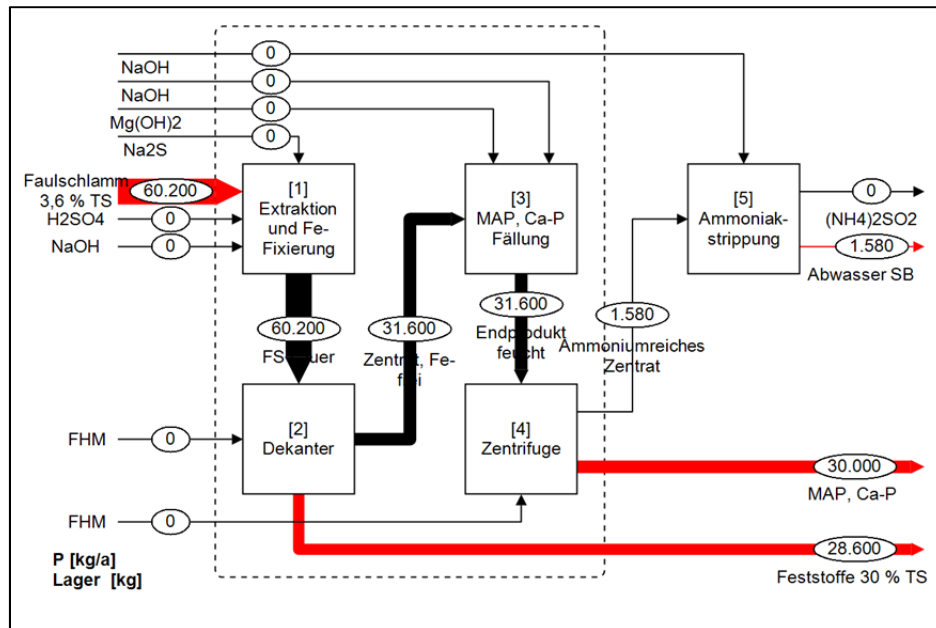


Abbildung 20: Stoffflussanalyse Phosphor

| Seaborne modif. | | | |
|-----------------|-------|------|--------------|
| Phosphor (P) | 1.570 | 3,75 | 5.411 |
| Stickstoff (N) | 5.731 | 0,75 | 4.298 |
| Gesamt | | | 6.932 |

Tabelle 33: Einsparungen Abwasserreinigung

8 Reduktion Schlammmanfall

Infolge der Extraktion des Faulschlammes wird der Feststoffanteil um bis zu 7 % reduziert. Diese Reduktion wird für beide Verfahren berücksichtigt. Der reduzierte Schlammmanfall wirkt sich auf die Entsorgungskosten sowie die Transportkosten aus.

| | Reduktion [t/a] | [€/t TS] | Einsparung [€/a] |
|----------------|-----------------|----------|------------------|
| Schlammmanfall | ~ 98 | 290 | 28.500 |

Tabelle 34: Reduktion Schlammmanfall

9 Reduktion Konditionierungsmittel

Auf pH 3 angesäuerter Schlamm lässt sich bei deutlich reduziertem Flockungsmittelbedarf besser entwässern. Das Einsparungspotential im Vergleich zur Referenzkläranlage liegt bei 30 %. Bei einer Ansäuerung auf pH 2 wird diese Einsparung nicht berücksichtigt.

| | Reduktion | Einsparung [€/a] |
|------------------------|-----------|------------------|
| Konditionierungsmittel | -30% | 19.500 |

Tabelle 35: Reduktion Konditionierungsmittel

10 Reduktion P-Emissionen Gewässer und P-Fracht im Klärschlamm

Infolge der reduzierten P-Rückbelastung im Schlammwasser kann eine geringe Reduktion der P-Ablaufkraft von 7.200 auf 7.050 kg bilanziert werden.

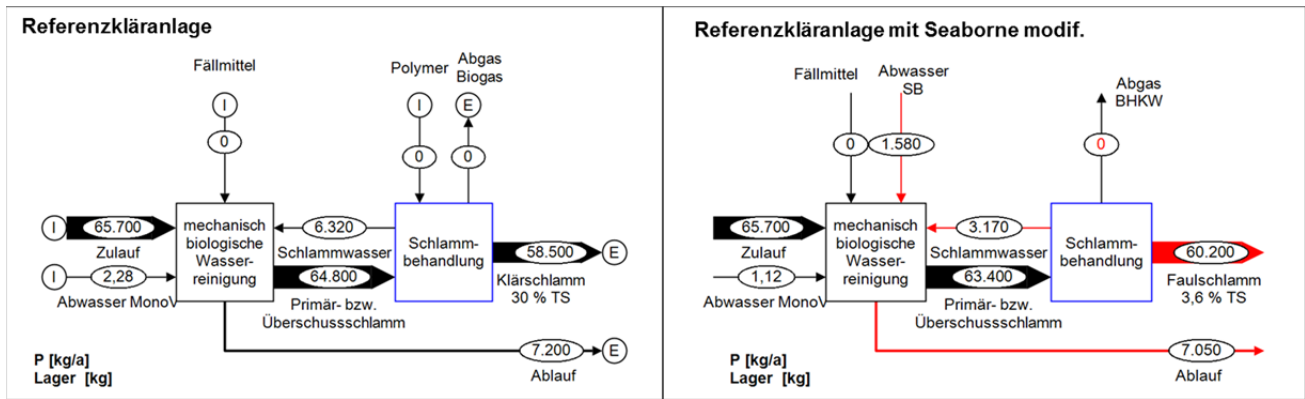


Abbildung 21: Einfluss Seaborne auf P-Emission Gewässer und P-Fracht Klärschlamm

10.1.1 Stoffflussanalyse SM modifiziertes Verfahren

1. Transfer Schwermetalle und org. Spurenstoffe Seaborne modifiziert

Infolge des geringeren pH-Wertes von 3 werden Schwermetalle kaum rückgelöst (siehe Kapitel Rücklösung), womit eine sehr gute Entfrachtungsleistung möglich ist. Lediglich Nickel gelangt trotz simultaner Fe-Fixierung in das Zentrat zur Nährstofffällung. Das anfallende Endprodukt weist daher sehr geringe Schwermetallgehalte auf. Dementsprechend liegt die Entfrachtungsleistung für alle Schwermetalle durchwegs über 99 %. Für Arsen liegen keine Daten vor, womit der Transferkoeffizient in Anlehnung an die restlichen Schwermetalle angenommen wird. Liegen Daten zu organischen Substanzen vor, kann auf Basis der jährlichen Fracht im Referenzklärschlamm und der errechneten Fracht im Endprodukt die Entfrachtungsleistung berechnet werden. Für LAS und B(a)P liegt diese bei > 99 %. Für AOX liegen keine Daten vor.

| TK | Zentrat SB3 | Feststoff SB2 | UL | MAP SB5 | Überstand SB6 | UL |
|--------|----------------|------------------|-----|------------|------------------|-----|
| P | 55 | 45 | 0,5 | 95 | 5 | 0,5 |
| As | - (5) | - (95) | 3 | - (50) | - (50) | 3 |
| Cd | 0,01 | 99,9 | 1 | 0,01 | 99,9 | 1 |
| Cr | 2 | 98 | 1 | 30 | 70 | 2 |
| Cu | 0,5 | 99,5 | 1,5 | 8 | 92 | 1 |
| Hg | 0,01 | 99,9 | 1 | 1 | 99 | 1 |
| Ni | 15 | 85 | 2 | 4 | 96 | 2 |
| Pb | 3,3 | 96,7 | 1,5 | 5 | 95 | 1,5 |
| Zn | 0,3 | 99,7 | 1 | 1 | 99 | 1 |
| AOX | - | - | 1 | - | - | 1 |
| PAK | - | - | 1 | - | - | 1 |
| PCDD/F | - | - | 1 | - | - | 1 |

Tabelle 36: Tabelle 37: Transferkoeffizienten Rücklösung und MAP-Fällung Seaborne Verfahren modifiziert

| TK | Faulschlamm [kg/a] | Endprodukt [kg/a] | Rückgewinnung bzw. Entfrachtung [%] | Tatsächliche Entfrachtung [% rel. zu P] |
|-----|-----------------------|----------------------|--|--|
| P | 60.237 | 30.034 | 49 | |
| As | 8,1 | 0,20 | 97,5 | 95 |
| Cd | 2,1 | 0,00 | 99,9 | 99,9 |
| Cr | 76,2 | 0,46 | 99,5 | 99 |
| Cu | 459,1 | 2,11 | 99,9 | 99 |
| Hg | 1,2 | 0,00 | 99,9 | 99,9 |
| Ni | 66,9 | 0,40 | 99,4 | 99 |
| Pb | 98,6 | 0,17 | 99,8 | 99,9 |
| Zn | 1.664,8 | 4,10 | 99,8 | 99,9 |
| AOX | - | - | - | - |

| | | | | |
|--------|--------|-------|-------|-------|
| PAK | - | - | - | - |
| PCDD/F | - | - | - | - |
| NPE* | 65,7 | 2,0 | 97 | 94 |
| LAS* | 10.950 | 75 | 99 | 99 |
| B(a)P* | 2,19 | 0,002 | 99,99 | 99,99 |

*Ermittlung der Entfrachtungsleistung auf Basis des Gehaltes im Referenzklärschlamm und Endprodukt des Seaborne Verfahrens

Abbildung 22: Entfrachtungsleistung (Seaborne modifiziert)

Im Vergleich zum ursprünglichen Seaborne Verfahren sind keine signifikanten Veränderungen der direkten Emissionen mehr festzustellen. Grund dafür ist die fehlender Rücklösung der Schwermetalle, wodurch die Abweichungen im Vergleich zur Referenzsituation durchwegs <10 % liegen (Tabelle 38).

| Ablauf [kg/a] | Referenz | Seaborne modif. | Δ absolut | Δ % | Rauchgas [kg/a] | Referenz | Seaborne modif. | Δ absolut | Δ % |
|---------------|----------|-----------------|-----------|-------|-----------------|----------|-----------------|-----------|-------|
| As | 2,10 | 2,07 | -0,02 | -1,2% | As | 0,004 | 0,004 | -0,0001 | -9,4% |
| Cd | 1,21 | 1,21 | -0,001 | -0,1% | Cd | 0,004 | 0,003 | -0,0006 | -4,6% |
| Cr | 25,87 | 25,67 | -0,21 | -0,8% | Cr | 0,040 | 0,029 | -0,0104 | -6,4% |
| Cu | 124,26 | 118,32 | -5,94 | -4,8% | Cu | 0,071 | 0,068 | -0,0033 | -0,2% |
| Hg | 0,48 | 0,44 | -0,035 | -7,3% | Hg | 0,045 | 0,038 | -0,0077 | -8,6% |
| Ni | 66,75 | 69,65 | 2,90 | 4,3% | Ni | 0,010 | 0,009 | -0,0008 | -7,1% |
| Pb | 24,96 | 25,42 | 0,48 | 1,9% | Pb | 0,112 | 0,085 | -0,0264 | -6,9% |
| Zn | 730,96 | 720,71 | -10,25 | -1,4% | Zn | 1,022 | 0,977 | -0,0456 | -0,9% |

Tabelle 38: Direkte Emissionen Seaborne modifiziert Prozesskette, Vergleich Referenz

10.1.2 Güterflussanalyse modifiziertes Seaborne Verfahren

Auf Grundlage des Säurebedarfs von 0,35 kg H₂SO₄/kg TS und dem Referenzklärschlammfall von 1.492 t TS/a wird ein Säurebedarf von 522,2 t/a ermittelt. Der Na₂S und NaOH-Bedarf wird auf Basis der Daten von Esemén (2012) für eine 56.000 EW Anlage mit einem Faulschlammfall von rund 560 t TS/a. berechnet. Schwierig ist damit das direkte Umlegen des Chemikalienaufwandes auf die Referenzkläranlage mit einer um den Faktor 2 erhöhten Belastung, jedoch einer um den Faktor 3 höheren TS-Fracht im Faulschlamm. Der Natronlaugenbedarf steht in direkter Relation zum Wasservolumen und wird damit um den Faktor 2 erhöht angenommen. Eine eindeutige Zuordnung des Basenbedarfes zu den einzelnen Prozessstufen (Fe-Fixierung oder Fällung) ist jedoch nicht möglich. Aufgrund der um den Faktor 3 erhöhten Trockensubstanzfracht und damit einer um den Faktor 3 erhöhten Eisenfracht wird der Na₂S-Bedarf für die Referenzanlage mit dem Faktor 3 multipliziert. In diesem Fall muss eine etwas höhere Unsicherheit berücksichtigt werden.

| Chemikalienbedarf | [t/a] | Reinsubstanz [t/a] | Referenzanlage [t/a] | Referenzanlage Reinsubstanz [t/a] |
|----------------------------|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|
| NaOH (40 %ig) | 334 | 133,6 | 668,0 | 260 ± 30 |
| Na ₂ S (15 %ig) | 133 | 20 | 494,8 | 60 ± 20 |

Tabelle 39: Chemikalienbedarf Seaborne modifiziert

Der Fällmittelbedarf wird auf Basis der P-Inputfracht von 31.600 kg/a in den Fällungsreaktor berechnet. Ideale Betriebsparameter für die Fällreaktion sind ein pH 8,5 - 9 und ein stochiometrisches Verhältnis von Mg:P 1,5:1. Im Falle des Seaborne Verfahren liegen Fällionen wie Mg und Ca aufgrund der vorangegangenen Rücklösung bereits in großem Umfang gelöst im Zentrat vor. Eine quantitative Erhebung ist jedoch kaum möglich. Esemén (2012) errechnet, dass aufgrund der bereits vorliegenden Fällionen zusätzliche Fällmitteln nur im Verhältnis Mg:P von ~0,75:1 zu dosiert werden müssen. Im Falle der Referenzanlage wird das notwendige Verhältnis Mg:P mit 1:1 festgelegt. Jährlich fallen rund 249.800 kg des Endproduktes an.

| Fällmittelbedarf [kg/a] | Mg:P 1:1 | Mg:P 1,5:1 |
|-----------------------------------|----------------|---------------|
| Mg-Input | 24.800 | 37.220 |
| Mg(OH)₂ [100 %] | 59.500 | 89.319 |
| Mg(OH)₂ [53 %] | 112.300 | |

| Molare Masse [u] | |
|------------------|-------|
| P | 30,97 |
| Mg | 24,30 |
| H | 1,01 |
| O | 15,99 |

Magnesiumhydroxid:
 Mg(OH)_2
Wasseranteil: 0 %
Molare Masse: 58,3
 $\text{Mg:Mg(OH)}_2 = 1:2,4$

Tabelle 40: Fällmittelbedarf Seaborne modifiziert

Der Bedarf an elektrischer Energie wird im Vergleich zu den von Esemén (2012) ermittelten Daten um den Faktor 1,5 erhöht. Der Energiebedarf wird mit rund 212.900 kWh/a angenommen.

| Ressourcen | kg/kg TS | [kg/kg P _{rückg.}] | kg/[EW*a] |
|--------------------------------|----------|------------------------------|-----------|
| H ₂ SO ₄ | 0,35 | 17,4 | 5,2 |
| NaOH | 0,18 | 8,9 | 2,7 |
| Na ₂ S | 0,05 | 2,5 | 0,74 |
| Mg(OH) ₂ | 0,04 | 2,0 | 0,6 |
| FHM | 0,0003 | 0,005 | 0,008 |
| kWh | 0,14 | 7,1 | 2,13 |

Tabelle 41: Ressourcenbedarf Seaborne modifiziert

Infolge der teilweisen Rücklösung der Feststoffe durch das Ansäuern des Schlammes, wird die Trockensubstanzfracht um 7 % reduziert. Bei gleichbleibender Entwässerung auf 30 % TS wird die thermisch zu behandelnde Schlammfracht auf 4.650 t/a verringert.

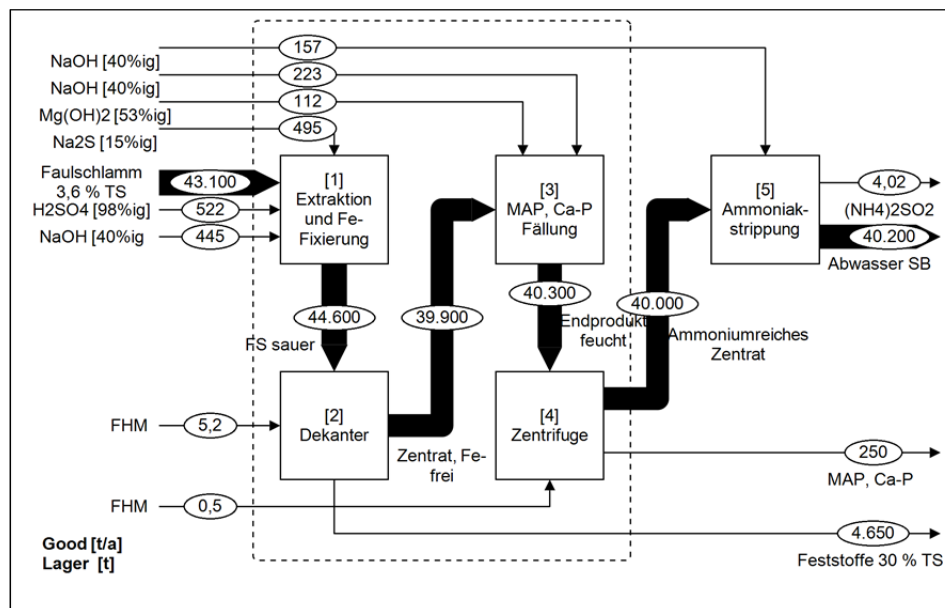


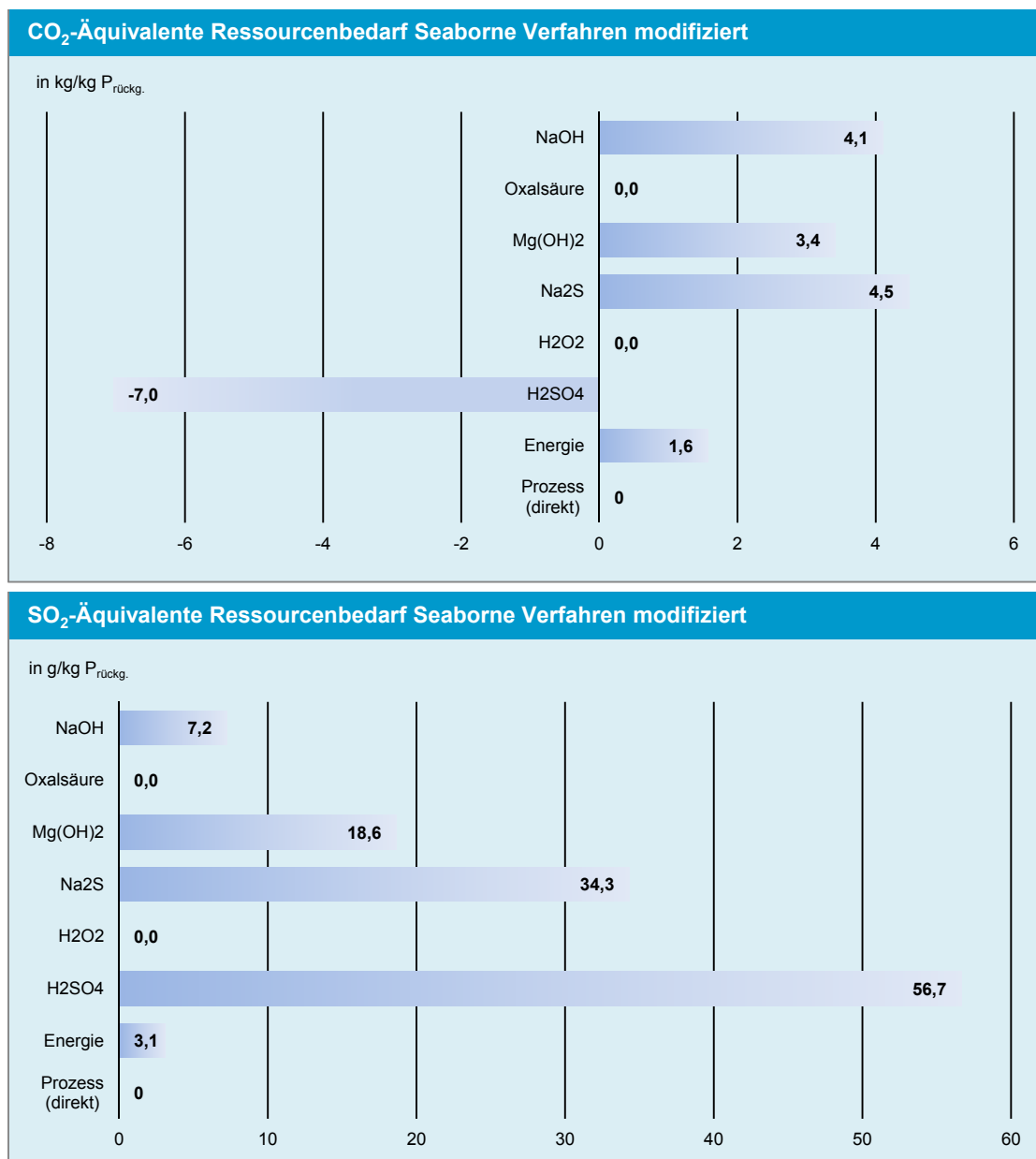
Abbildung 23: Ergebnis Güterflussanalyse Seaborne modifiziert

11 Ergebnis gasförmige Emissionen

Der jährliche Ausstoß an CO₂- bzw. SO₂-Äquivalenten beträgt 196.300 kg bzw. 3.600 kg. Die CO₂-Emissionen der Schwefelsäure (H₂SO₄) gehen als Gutschrift in die Berechnung ein. Die einzelnen Chemikalien tragen in etwa im gleichen Ausmaß zu den Gesamtemissionen bei. Der Anteil der Emissionen aus dem elektrischen Energieverbrauch ist im Vergleich dazu gering. Die Emissionen bezogen auf 1 kg P_{rückg.} sind aus Abbildung 24 zu entnehmen. Aus dem Prozess sind keine direkten gasförmigen Emissionen zu berücksichtigen.

| Gasemissionen | [kg/a] | [kg/EW*a] | [kg/kg P _{rückg.}] |
|------------------------------|---------|-----------|------------------------------|
| CO ₂ -Äquivalente | 196.300 | 1,96 | 6,5 |
| SO ₂ -Äquivalente | 3.600 | 0,036 | 0,12 |

Tabelle 42: Spezifische Gasemissionen Seaborne modifiziert

Abbildung 24: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente [kg bzw. g/kg P_{rückg.}] Seaborne modifiziert

12 Indirekte Schwermetallemissionen Seaborne modifiziert

| Indirekt Emissionen | Atmosphäre [g/a] | Hydrosphäre [mg/a] |
|---------------------|---------------------|-----------------------|
| As | -1,92 | 0,02 |
| Cd | -0,9 | 0,05 |
| Cr | 1,2 | 0,05 |
| Cu | - | - |
| Hg | - | 0,02 |
| Ni | 1,16 | - |
| Pb | -4,76 | 0,3 |
| Zn | - | - |
| AOX | - | - |

| | | |
|--------|----------|---|
| PAK | -0,0007 | - |
| PCDD/F | 0,000001 | - |

Tabelle 43: Indirekte SM-Emissionen Seaborne modifiziert

13 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der kumulierte Energieaufwand wird trotz dem im Verhältnis zu anderen Ressourcen geringen Bedarf an Natriumsulfid (Na_2S) von diesem dominiert. Grund ist der energieintensive Herstellungsprozess des Natriumsulfides auf Basis folgender Reaktionsgleichungen. Herstellung Natriumsulfat: $2\text{NaOH} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$. Das Natriumsulfat wird anschließend durch Glühen von Kohle auf Natriumsulfid reduziert. $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{C} \rightarrow \text{Na}_2\text{S} + 4\text{CO}$

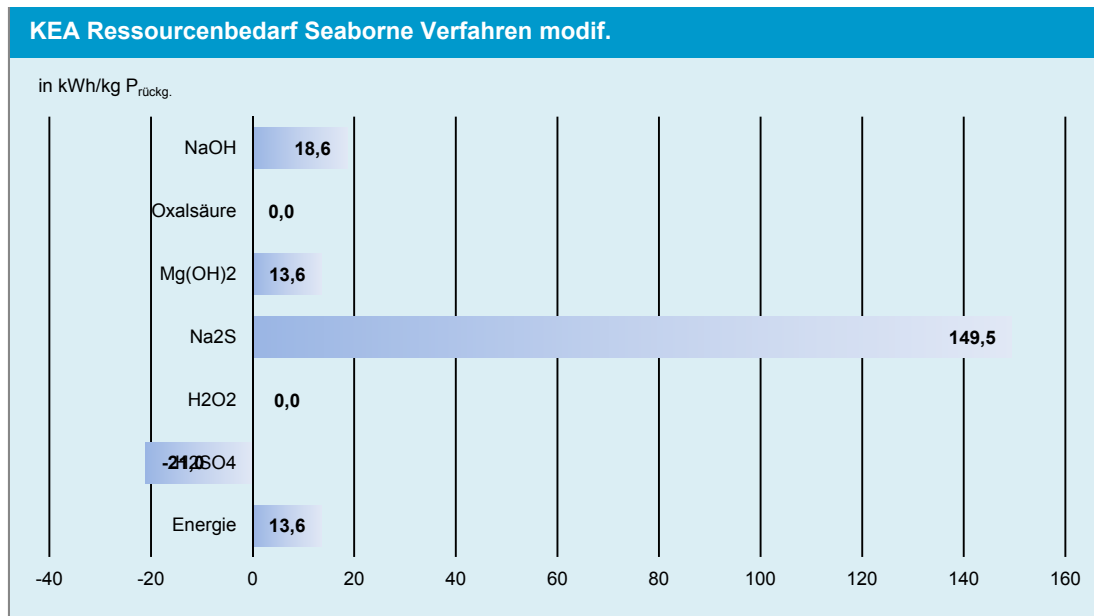


Abbildung 25: KEA Ressourcenbedarf Seaborne Verfahren modifiziert

| KEA | [kWh] | [kWh/EW*a] | [kWh/kg $\text{P}_{\text{rückg.}}$] |
|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------------|
| Chemikalien | 4.777.400 | 47,8 | 159 |
| Elektrische Energie | 407.600 | 4,1 | 13,6 |
| Gesamt | 5.185.000 | 51,9 | 172,6 |

Tabelle 44: Kumulierter Energieaufwand Seaborne modifiziert

13.1 Ergebnisse ganzheitliche Bewertung Seaborne modifiziert

Die Implementierung der Seaborne Anlage kann Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess bzw. die Schlammlinie einer Kläranlage haben und damit wiederum nachfolgende Prozesse beeinflussen, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

| Faktor | Einfluss auf |
|-----------------------------------|---|
| Verringerte P und N Rückbelastung | Kosten Abwasserreinigung, Schlammanfall, Transport Klärschlamm, |
| Verringerter Schlammanfall (-7%) | Energieausbeute Verbrennung, Ascheanfall, Transportkosten, Entsorgungskosten, Ressourcenaufwand Verbrennung |
| Ressourcenaufwand Seaborne | Indirekte Emissionen, Kosten |
| MAP-Produktion | Kosten (Erlöse) |

Tabelle 45: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung Seaborne modifiziert

Berücksichtigung Transport

Infolge des verringerten Trockensubstanzfracht (-7 %) verringert sich Klärschlammfracht zur Verbrennung.

| Transportwege | [t/a] | [tkm] | [€/EW*a] |
|--|-------|----------------|-------------|
| Klärschlamm – MonoV | 4.648 | 650.671 | 0,91 |
| MAP - Landwirtschaft | 104 | 0 | 0 |
| Flug- und Bettasche - Reststoffdeponie | 716 | 71.639 | 0,10 |
| Filterkuchen - Untertagedeponie | 32 | 32.049 | 0,04 |
| Gesamt Transport | | 754.360 | 1,06 |

Tabelle 46: Transportwege Seaborne modifiziert

13.1.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation ist eine deutliche Erhöhung der treibhausrelevante Gase (+46 %) zu beobachten. Deutlich höher fällt der Anstieg bei den Gasen mit Versauerungspotential aus (+473 %). Zurückzuführen ist dieser deutliche Anstieg vor allem auf die eingesetzte Schwefelsäure und Natriumsulfid zur Fe-Fixierung (Tabelle 47). Ähnlich ist beim kumulierten Energieaufwand zu beobachten. Die Zunahme beträgt +408 % in Relation zur Referenzsituation (Tabelle 48).

| CO ₂ -Äquivalente | [kg] | [CO ₂ -Äquiv./EW*a] | [kg CO ₂ -Äquiv./kg P _{rückg.}] |
|------------------------------|---------|--------------------------------|--|
| Seaborne modif. | 615.500 | 6,15 | 20,5 |
| Referenz | 422.924 | 4,2 | - |
| Δ | +46 % | | |
| SO ₂ -Äquivalente | [kg] | [SO ₂ -Äquiv./EW*a] | [g SO ₂ -Äquiv./kg P _{rückg.}] |
| Seaborne modif. | 4.400 | 0,0044 | 147,3 |
| Referenz | 779 | 0,00078 | - |
| Δ | +468 % | | |

Tabelle 47: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente Prozesskette Seaborne modifiziert

13.1.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

| KEA | Rohstoffe | Energie | [kWh/EW*a] | [kWh/kg P _{rückg.}] |
|-------------------------|------------------|-----------|-------------|-------------------------------|
| Kläranlage | 864.100 | 1.006.000 | 18,7 | |
| Seaborne | 4.777.400 | 407.600 | 51,9 | |
| Monoverbrennung | 135.500 | 880.400 | 10,2 | |
| Deponie | 12.000* | | 0,1 | |
| Transport | 121.000** | | 1,2 | |
| Gesamt | 8.200.000 | | 82,0 | |
| Substitution Strom | -337.400 | | -3,4 | |
| Substitution Wärme | -1.267.600 | | -12,7 | |
| Substitution P+N-Dünger | -238.300 | | -2,4 | |
| Gesamt | 6.360.000 | | 63,6 | 64,6 |

| | | |
|----------|-----------|------|
| Referenz | 1.252.688 | 12,5 |
| Δ | +408% | |

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

Tabelle 48: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette Seaborne modifiziert

13.1.3 Ergebnis Schwermetallemissionen

| Emissionen Gesamt | Atmosphäre [g/a] | Δ Referenz [%] | Hydrosphäre [kg/a] | Δ Referenz [%] |
|-------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| As | 2,2 | -53,8 | 2,10 | -1,2 |
| Cd | 4,9 | 9,0 | 1,21 | -0,1 |
| Cr | 38,9 | -4,0 | 25,67 | -0,8 |
| Cu | - | - | - | - |
| Hg | - | - | 0,44 | -7,3 |
| Ni | 18,9 | -23,8 | - | - |
| Pb | 102,0 | -11,8 | 25,42 | 1,9 |
| Zn | - | - | - | - |
| AOX | - | - | 338,70 | -0,4 |
| PAK | 0,15 | 0,7 | - | - |
| PCDD/F | 0,000001 | | - | - |

Tabelle 49: Gesamtemission SM direkte und indirekte Emissionen, Relation zur Referenzsituation

13.1.4 Ergebnis Endprodukt

Das Endprodukt weist im Vergleich zu einem reinen MAP hohe Calcium- und Eisengehalte auf. Zurückzuführen ist dies auf die Anwesenheit von weiteren Fällionen wie Ca und auch Eisen infolge der vorangegangenen Rücklösung und im Falle von Eisen eine unzureichende Fixierung. Das bedeutet, dass neben MAP weitere phosphorhaltige Verbindungen wie Calciumphosphate und Eisenphosphate gebildet werden. Allerdings liegt der Phosphorgehalt im Bereich eines reinen MAP. Dies ist auf den im Vergleich zum MAP höheren P-Gehalt in Calciumphosphaten zurückzuführen. Die Schwermetallgehalte liegen deutlich unter den Anforderungen der Düngemittelverordnung und noch einmal deutlich unter dem Endprodukt des ursprünglichen Seaborne Verfahren.. Bezogen auf den Hauptnährstoff Phosphor liegen alle Schwermetallkonzentrationen deutlich unter jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP).

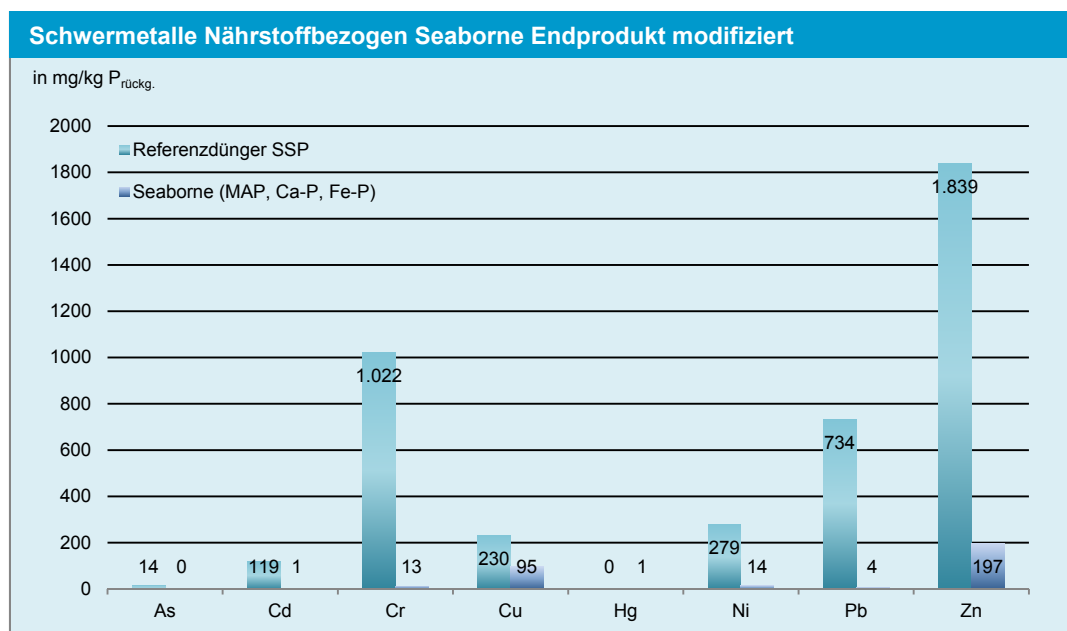


Abbildung 26: Nährstoffbezogener Schwermetallgehalt Endprodukt vergleich Handelsdünger (SSP)

| Bewertung Endprodukt | MAP Seaborne modif. ® | SSP |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Löslichkeit | Gut | Sehr Gut |
| Düngewirksamkeit | Sehr Gut | Sehr Gut |
| Monetäre Wert [€/t Endprodukt] | 334 | 230 |
| Anorganische Verunreinigungen | | |
| SM:P [mg Cd/kg P] | <1 | 118 |
| Schadeinheit [SE/kg P] | 0,003 | 1,26 |
| Referenzbodenmethode [*] | 40.923 (Ni*) | 1.450 (Cd*) |
| Organische Verunreinigungen | | |
| Keine organische Spurenstoffe | 3 ¹ | 5 |
| Keine hygienischen Bedenken | 5 ¹ | 5 |
| Handhabung | | |
| Einfache Lagerung möglich | 5 | 5 |
| Direkter Einsatz in LW möglich | 3 | 5 |

Tabelle 50: Bewertung Seaborne Endprodukt

Das Cd:P Verhältnis ist mit <1 mg Cd/kg P sehr gering und liegt deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Das Schadeinheitenmodell und die Referenzbodenmethode verdeutlichen die geringen Gehalte an Schwermetallen. Theoretisch kann das Seaborne Endprodukt rund 41.000 mal aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. In diesem Fall ist Nickel das limitierende Element. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, könnte das Seaborne Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 57 häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe wie B(a)P (0,01mg/kg TS), NPE (8 mg/kg TS) und LAS (300 mg/kg TS) können in niedrigen Konzentrationen detektiert werden (Bewertung 0,5). Hygienische Bedenken sind nach Angaben des Herstellers nicht gegeben (0). Das Endprodukt ist staubig bis kristallin. Eine Zwischenlagerung ist möglich, allerdings muss noch eine Konfektionierung bzw. Pelletierung erfolgen, damit das Produkt direkt mithilfe moderner Ausbringungsgeräte in der Landwirtschaft ausgebracht werden kann

13.1.5 Ökonomische Bewertung

14 Jahreskosten

Die Investitionskosten für das modifizierte Seaborne Verfahren liegen aufgrund der reduzierten Anzahl und günstigerer Reaktionsreaktoren deutlich unter den Kosten des ursprünglichen Seaborne Verfahren. Für die Referenzanlage liegen diese im Bereich von 540.000 €. Ermittelt wurden diese Investitionskosten auf Basis der von Esem (2012) ermittelten Investitionskosten von rund 430.000 € für eine 50.000 EW Anlage. Der Faktor des Up-Scaling liegt damit bei 1,25. Rund 25 % der Investitionskosten entfallen auf die Bautechnik (ND 30 Jahre) und 75 % auf die Maschinenteknik (ND 15 Jahre). Aufgrund des wartungsintensiven Betriebes werden die Wartungskosten mit 5 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand wird mit 1,5 MA/Jahr angenommen.

| Jahreskosten | Menge (kg) | Preis/Einheit | €/a |
|--------------------------------|------------|---------------|----------------|
| Kapitalkosten | | | 43.600 |
| Wartung + Reparaturen | | | 26.800 |
| H ₂ SO ₄ | 522,2 | 150 €/t | 78.300 |
| NaOH | 267,2 | 330 €/t | 88.200 |
| Na ₂ S | 74,2 | 950 €/t | 70.500 |
| Mg(OH) ₂ | 59,5 | 230 €/t | 12.000 |
| Energie | 213.000 | 0,1 €/kWh | 21.300 |
| Personal | 1,5 | 50.000 €/MA | 75.000 |
| Entsorgung | - | - | - |
| Betriebskosten | | | 372.100 |

| Gesamt | | | 415.700 |
|---|------------|---------------|---------|
| Tabelle 51: Jahreskosten Seaborne modifiziert (Referenzkläranlage 100.000 EW) | | | |
| Einsparungen/Erlöse | Menge (kg) | Preis/Einheit | €/a |
| MAP Erlöse | 249.840 | 334 | 83.500 |
| P-Reduktion | 1.600 | 3,45 | 5.400 |
| N-Reduktion | 5.730 | 0,75 | 4.300 |
| Konditionierungsmittel | | | 1.100 |
| Schlammreduktion | 98.200 | 290 | 28.500 |
| Gesamt | | | 122.800 |

Tabelle 52: Einsparungen und Erlöse Seaborne modifiziert (Referenzkläranlage 100.000 EW)

| Spezifische Kosten | € |
|--------------------------------|-------|
| €/kg P _{rückgewonnen} | 11,55 |
| €/EW*a | 3,5 |
| €/E*a | 7,0 |

Tabelle 53: Spezifische Kosten Seaborne modifiziert (100.000 EW)

Die Berechnungen zeigen, dass das Seaborne Verfahren unter den gegebenen Voraussetzungen (Referenzkläranlage 100.000 EW) nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Auch im Fall einer Implementierung des Verfahrens auf Kläranlage mit höherer Belastung können die Kosten nicht signifikant gedrückt werden. Grund dafür ist der direkt proportional steigende Bedarf an Säuren, Base und Fällmittel sowie die mit den Investitionskosten steigenden Wartungskosten. Für Kosten die sich nicht direkt proportional zur Kläranlagengröße verhalten werden folgen Annahmen (Up-scaling Faktoren) getroffen.

| | 100.000 EW | 200.000 EW | 500.000 EW | 1.000.000 EW |
|--------------------|------------|------------|------------|--------------|
| Investitionskosten | 1 | 1,25 | 2 | 4 |
| Energie | 1 | 1,25 | 1,5 | 2 |
| Personal | 1 | 1 | 2 | 3 |

Tabelle 54: Kostenanpassung als Faktor zur Kläranlagengröße

15 Kostenaufgliederung

Anhand der Kostenaufteilung wird die ressourcenintensive Betriebsweise der Seaborne Technologie verdeutlicht. Rund 90 % der Jahreskosten entfallen im Falle einer Umsetzung auf der Referenzkläranlagen auf die Betriebskosten, wobei 67 % der Betriebskosten auf den Chemikalienbedarf zurückzuführen sind.

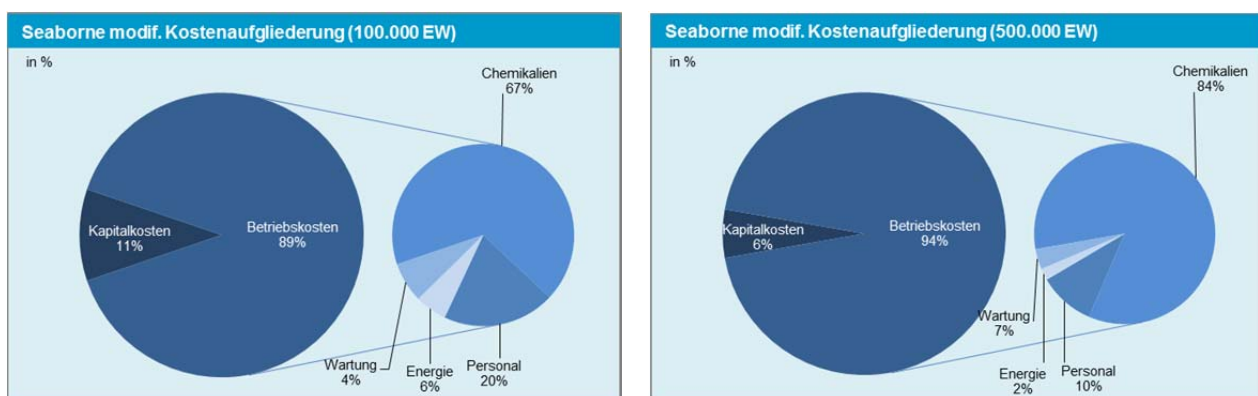


Abbildung 27: Kostenaufgliederung Seaborne modif. 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)

Aufgrund des gleichbleibenden Chemikalienaufwandes, aber proportional abnehmender Investitions-, Energie- und Personalkosten steigt der Anteil der Betriebskosten im Falle einer 500.000 EW Anlage auf rund 95%, sowie auch der Anteil des Chemikalienbedarfs an den Betriebskosten (84 %). Um einen kostengünstigeren Betrieb zu ermöglichen müssten, daher Einsparungen bei der Betriebsweise und damit dem Chemikalienaufwand angestrebt werden. Allerdings offenbart das modifizierte Seaborne Verfahren keine praktischen Einsparungsmöglichkeiten, da bereits z.B. durch einen geringeren pH-Wert bei der Rücklösung, Einsparungen beim Säure- und in weiterer Folge beim Basenbedarf verwirklicht wurden. Die

Kapitalwertberechnung zeigt, dass aufgrund der im Vergleich zu den Erlösen deutlich höheren Betriebskosten keine Amortisation der Anlagenteile stattfindet.



Abbildung 28: Produkt- und Einwohnerspezifische Kosten Seaborne modifiziert; Variation Anlagengröße

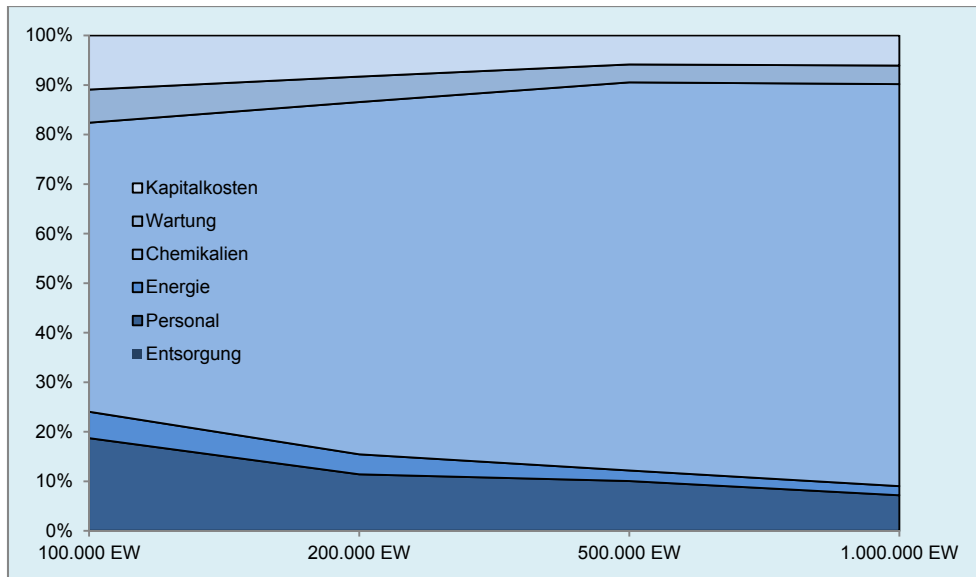


Abbildung 29: Entwicklung der anteiligen Kosten in Abhängigkeit der Kläranlagengröße

16 Kosten gesamte Prozesskette

| Jahreskosten | 100.000 EW | | 500.000 EW | |
|---|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| | €/EW*a] | €/kgP _{rück.}] | €/EW*a] | €/kgP _{rück.}] |
| Kläranlage | 6,0 | | | |
| (Mit-)Verbrennung (exkl. Ascheentsorgung) | 4,6 | | | |
| Rückgewinnung | 4,0 | | | |
| Entsorgung Abfallstoffe (z.B. SM-Schlamm) | 0,4 | | | |
| Transporte | 1,06 | | | |
| Gesamt | 15,1 | 50,1 | 14,0 | 46,7 |
| Einsparungen/Erlöse | 1,2 | | 1,3 | |
| Gesamt neu | 13,8 | 46,1 | 12,8 | 42,5 |

Tabelle 55: Jahreskosten gesamte Prozesskette Seaborne modifiziert

Verglichen mit den Referenzkosten von 12,6 €/EW*a steigen die Kosten auf 13,8 bzw. 12,9 €/EW*a. Das entspricht einem Anstieg von 24 bzw. 15 %.

17 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 30 verdeutlicht, dass die Preisänderung für Rohstoffe (+13 %) bzw. ein Anstieg der Säurepreise (10 %) den größten Einfluss auf die Gesamtkosten dieses ressourcenintensiven Verfahrens haben. Wenig überraschend haben die höheren Investitionskosten (+20 %) keinen großen Einfluss auf die Gesamtkosten (+6%).

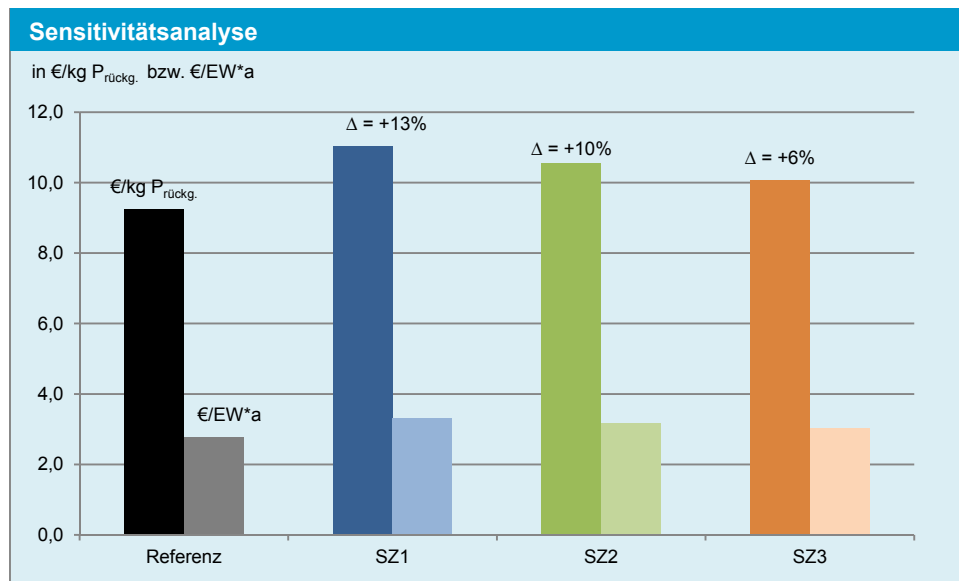


Abbildung 30: Sensitivitätsanalyse Seaborne modifiziert

17.1.2 Stoffflussanalyse gesamte Prozesskette Seaborne modifiziert

