

BUND Naturschutz in Bayern e.V.

**Untersuchung der Klimawirkung unterschiedlicher
Klärschlammbehandlungsverfahren mit dem Ziel eines
Phosphorrecyclings aus kommunalem Klärschlamm**



BjörnSEN Beratende Ingenieure GmbH
Niederlassung Leonberg
Distelfeldstraße 15, 71229 -Leonberg
Telefon +49 7152 331109-0, bce-leonberg@bjoernsen.de
Dezember 2022, IW, KFr, SaS, tks2230575

Inhaltsverzeichnis

Erläuterungsbericht

1	Einführung und Hintergrund	1
2	P-Rückgewinnungsverfahren	1
2.1.1	Grundsätzliches zu Verfahren zur P-Rückgewinnung	1
2.1.2	Betrachtung von Verfahren zur integrierten P-Rückgewinnung auf der Kläranlage	3
2.1.3	Nachgeschaltete Rückgewinnung	5
2.1.4	Hydrothermale Karbonisierung	7
3	Auswertung auf Basis von in SAmPSONS enthaltenen Steckbriefen zu unterschiedlichen Klärschlammverwertungsverfahren	10
3.1	Aufbau der Simulation in SAmPSONS	11
3.1.1	Szenario 1: Monoverbrennung und nachgeschaltetes P-Recyclingverfahren	11
3.1.2	Szenario 2: Klärschlammkarbonisierung bzw. -pyrolyse	12
3.1.3	Szenario 3: Hydrothermale Karbonisierung (HTC)	13
3.2	Ergebnisse	13
3.2.1	Szenario 1: Monoverbrennung und nachgeschaltetes P-Recyclingverfahren	15
3.2.2	Szenario 2: Klärschlammkarbonisierung bzw. -pyrolyse	17
3.2.3	Szenario 3: Hydrothermale Karbonisierung (HTC)	18
3.2.4	Vergleich der Szenarien	18
4	Literaturrecherche zur Validierung der Daten, Vergleich mit den Ergebnissen in SAmPSONS	20
4.1	Vergleich mit Literatur zum Vergleich der Treibhausgasemissionen der betrachteten Szenarien	20
4.2	Zusammenfassung und P-Düngewirksamkeit	22
5	Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS)	24
5.1	Ressourcenorientierte Sanitärsysteme und P-Recycling	25
5.2	Aufbau des ROSS in SAmPSONS	26
5.3	Ergebnisse des Vergleichs	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gesamtübersicht der P-Recyclingverfahren im Bereich kommunaler Kläranlagen (Bertau, et al., 2017)	3
Abbildung 2:	Übersicht über integrierte Verfahren auf der Kläranlage (Kraus, et al., 2019)	4
Abbildung 3:	Technischer Ansatz der integrierten Klärschlammkarbonisierung auf der Kläranlage Linz-Unkel (Appell, 2022)	6
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der Integration des HTC-Verfahrens auf der Kläranlage (Quelle: Terra Nova)	7
Abbildung 5:	Aufbau des AshDec-Szenarios in SAmPSONS (siehe auch Anlage 2a)	11
Abbildung 6:	Aufbau des TetraPhos-Szenarios in SAmPSONS (siehe auch Anlage 2b)	12
Abbildung 7:	Aufbau des Szenarios 2 Klärschlammpyrolyse in SAmPSONS (siehe auch Anlage 2c)	12
Abbildung 8:	Aufbau des Szenarios 3 HTC in SAmPSONS (siehe auch Anlage 2d)	13
Abbildung 9:	Ergebnisse in SAmPSONS, kg CO _{2-eq} /kg P.	14
Abbildung 10:	Ergebnisse in SAmPSONS, Phosphor-Rückgewinnung.	15
Abbildung 11:	Treibhausgas-Bilanz für Szenario 1a: Monoverbrennung mit AshDec-Verfahren, in kg CO ₂ -Equivalenten pro Einwohner und Jahr.	15
Abbildung 12:	Treibhausgas-Bilanz für Szenario 1b: Monoverbrennung mit TetraPhos-Verfahren, in kg CO ₂ -Equivalenten pro Einwohner und Jahr.	16
Abbildung 13:	Treibhausgas-Bilanz für Szenario 2: trockene Pyrolyse im PYREG-Verfahren, in kg CO ₂ -Equivalenten pro Einwohner und Jahr.	17
Abbildung 14:	Treibhausgas-Bilanz für Szenario 3: hydrothermale Karbonisierung (HTC) von TerraNova, in kg CO ₂ -Equivalenten pro Einwohner und Jahr	18
Abbildung 15:	Betrachtung der Treibhausgasbilanz des gesamten Abwasserreinigungsprozesses, in kg CO ₂ -Equivalenten pro Einwohner und Jahr. Darstellung der Szenarien von oben (1 a) nach unten (3).	19
Abbildung 16:	Nutzungseffizienz (PNE) und relative P-Düngeeffizienz (RPD) der P-Rezyklate (Jacobi, Löber, Koch, & Schumann, 2022)	23
Abbildung 17:	Aufbau der ROSS-Simulation in SAmPSONS.	26
Abbildung 18:	Aufbau der KARS-Simulation in SAmPSONS.	27
Abbildung 19:	Vergleich der THG-Emissionen der betrachteten Szenarien erweitert um das Szenario ROSS und das konventionelle System (KARS).	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eckdaten des HTC-Prozesses nach Herstellerangaben bzw. Literatur	9
Tabelle 2:	Ergebnisse des Vergleichs des ROSS mit dem konventionellen System	27
Tabelle 3:	Ergebnisse der Simulation mit SAmpSONS, Szenario 1 - 3.	30
Tabelle 4:	Ergebnisse der Simulation mit SAmpSONS, KARS und ROSS-Szenario	30

Anlagen

- Anlage 1: Zusammenfassung der im Bericht verwendeten Phosphor-Recycling Verfahren
- Anlage 2: Datensteckbriefe der in SAmpSONS verwendeten Technologien
- Anlage 3: Simulationsdateien der untersuchten Szenarien

1 Einführung und Hintergrund

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Klimawirkung unterschiedlicher Klärschlammverwertungsverfahren zu untersuchen. Dafür erfolgt zunächst eine Auswertung von vier unterschiedlichen Klärschlammverwertungsverfahren mit Berücksichtigung einer P-Rückgewinnung mit Hilfe der Simulationssoftware „SampSONS“¹.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber werden hierfür die folgenden Szenarien betrachtet:

- Szenario 1 a: Monoverbrennung und nachgeschaltetes P-Recyclingverfahren - AshDec
- Szenario 1 b: Monoverbrennung und nachgeschaltetes P-Recyclingverfahren – TetraPhos
- Szenario 2: Karbonisierung/Pyrolyse
- Szenario 3: Hydrothermale Karbonisierung

Ziel dieser Studie ist dabei die Ausweisung der Treibhausgaswirkungen (THG in CO₂-eq) der untersuchten Szenarien (1 bis 3). Zudem wird der zur Verfügung stehende theoretische Anteil des Phosphors aus dem Klärschlamm ausgewiesen. Darüber hinaus erfolgt die Betrachtung von Rückgewinnungsverfahren auf der Kläranlage. Die Vor- und Nachteile dieser Verfahren in Bezug auf die Treibhausgaswirkungen werden in Kapitel 2.1.2 erläutert.

Darüber hinaus findet in Kapitel 4.1 ein Abgleich der Ergebnisse der Treibhausgaswirkungen der betrachteten Szenarien mit Literaturergebnissen statt. Zusätzlich wird Bezug genommen auf den aktuellen Stand der Technik sowie Besonderheiten und Herausforderungen in Verbindung mit den jeweiligen Verfahren. Eine Betrachtung der Pflanzenwirksamkeit der unterschiedlich gewonnenen P-Rezyklate erfolgt ebenfalls in Kapitel 4 in der vorliegenden Studie.

Abschließend erfolgt in Kapitel 5 die Simulation und Bewertung eines ressourcenorientierten Sanitärsystems (ROSS) als Alternative zur konventionellen Klärschlammbehandlung.

2 P-Rückgewinnungsverfahren

2.1.1 Grundsätzliches zu Verfahren zur P-Rückgewinnung

Derzeit existiert eine Vielzahl möglicher P-Rückgewinnungsverfahren. Bereits 2017 gab es etwa 70 unterschiedliche Verfahren, die alle einen unterschiedlichen Entwicklungsstand haben. Einige der Entwicklungen wurden in der Zwischenzeit bereits wieder eingestellt bzw. erreichten nie die Skalierung in einen Demonstrations- oder Pilotmaßstab. Eine Übersicht der Verfahren ist in Abbildung 1 dargestellt.

¹ SampSONS ist eine Software zur Visualisierung von Stoffströmen in ressourcenorientierten Sanitärsystemen (ROSS) und zu ihrer Bewertung gemäß verschiedener Nachhaltigkeitskriterien, frei verfügbar unter <https://www.ifak.eu/de/produkte/simba/sampsons>

P-Recyclingverfahren lassen sich zunächst nach den Ansatzpunkten unterscheiden, an denen der Phosphor aus dem Abwasserstrom / Klärschlamm zurückgewonnen wird. Dies ist einerseits die integrierte Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage aus dem Faulschlamm bzw. dem Entwässerungszentrat (Fällungsprodukte wie z.B. Struvit). Im Gegensatz dazu erfolgt die Rückgewinnung des Phosphats aus der Festphase nachgeschaltet, d.h. nach der Klärschlammwässerung und i. d. R. Monoverbrennung von Klärschlamm. Für die Rückgewinnung aus Klärschlammaschen der Monoverbrennung gibt es nasschemische (z.B. TetraPhos) und thermische Ansätze (z.B. AshDec). Darüber hinaus gibt es einige Verfahren, die eine Alternative zur Mit- oder Monoverbrennung darstellen und in einem thermischen Behandlungsschritt ein Produkt herstellen (z.B. Pyrolyse oder mittels eines thermo-chemischen Verfahrens (z. B.: HTC) (Bertau, et al., 2017), (Kraus, et al., 2019).

Flüssige Phase	Klär-/Faulschlamm		Klärschlammmasche	
	Nasschemisch	Nasschemisch	Thermochemisch	Nasschemisch
Kristallisation	Hydrothermisch	EUPHORE	BioCon	AshDec
ANPHOS	Aqua-Reci	LysoPhos	Eberhard-Verfahren	CleanMAP
Crytalactor	AVA-CO ₂	Mephrec	Ecophos	Kubotu
CSIR	CAMBI	KREPRO	EDASK	ReAlPhos
Ebara	Phoxnan	Pyreg	INOCRE P-bac (<i>Bioleaching</i>)	Recophos AT
Ecobalans	(Loprox)		LeachPhos	Thermphos
Heatphos	TerraNova Ultra		Pasch	
Kurita			RecoPhos D	
Naskeo	Säureaufschluss		ReNiPhos	Andere
Nishihara	ExtraPhos		Sephos	EPHOS (<i>Elektrokinese</i>)
NuReSys	KEMICOND		Sesal-Phos	sePura (<i>unbehandelt</i>)
Nutritec	Seaborne		TetraPhos	
Ostara PEARL	Stuttgarter Verfahren		PARFORCE	
Ionentausch	Kristallisation			
PHOSIEDI	AirPex			
REM NUT	FIX Phos			
PHORWater	LysoPhos			
Phosnix	PECO			
PHOSPHAQ				
PhosphoGreen				
PhoStrip				
PRISA				
P-RoC				
REPHOS				
Struvia				
Sydney				
Treviso				
Kombinations/ Sonderverfahren				
ePhos				
SuPaPhos				
RecyPhos				

Abbildung 1: Gesamtübersicht der P-Recyclingverfahren im Bereich kommunaler Kläranlagen (Bertau, et al., 2017)

2.1.2 Betrachtung von Verfahren zur integrierten P-Rückgewinnung auf der Kläranlage

Das im Abwasser enthaltene Phosphat wird in der Kläranlage zu über 90 % in die Festphase überführt. Dies geschieht entweder im Rahmen einer chemischen (Chem-P) oder einer biologischen (Bio-P) P-Elimination. Bei der chemischen P-Elimination kommen Fällmittel wie Fe- oder Al-Salze zum

Einsatz. Bei der biologischen Phosphorelimination (Bio-P) werden phosphatakkumulierende Mikroorganismen durch eine gezielte Prozessführung angereichert, die das Phosphat in ihren Zellen einlagern. Das Phosphat ist somit entweder chemisch als Fe-/Al-Salz (Chem-P) oder eingelagert als Polyphosphat in Zellen (Bio-P) in der Festphase eingebunden. Durch den anaeroben Abbau der organischen Substanz des Klärschlammes im Faulturn und die dabei herrschenden Milieubedingungen kommt es in der Schlammbehandlung zu einer Phosphatrücklösung in die Wasserphase des Klärschlammes. Die Höhe der rückgelösten Phosphatfracht hängt dabei einerseits von der Art der Phosphatelimination (Chem-P oder Bio-P) und andererseits von der Schlammbehandlung selbst ab (Kraus, et al., 2019).

Die integrierte Rückgewinnung von Phosphor auf der Kläranlage findet entweder direkt in der Wasserphase (des Faulschlammes) oder im anfallenden Zentrat nach der Klärschlammmentwässerung statt. In einem ersten Prozessschritt erfolgt die Rücklösung des in der Schlammmatrix festgelegten Phosphors in die wässrige Phase, z.B. durch thermische Hydrolyse (z.B. LysoTherm-Verfahren) oder durch chemische Auflösung (z.B. Stuttgarter Verfahren) mittels anorganischer Säuren. In einem weiteren Prozessschritt wird der rückgelöste Phosphor gefällt. Dies kann entweder innerhalb der ausgefaulten Schlammmatrix vor der Entwässerung erfolgen (z.B. AirPrex-Verfahren), was mit einer Erhöhung der Entwässerbarkeit einhergeht, oder nach der Entwässerung (z.B. Pearl-Verfahren) (Kassel Wasser, TransMIT, 2021).

Abbildung 2 gibt einen Überblick über ausgewählte Verfahren zur P-Rückgewinnung auf der Kläranlage. Deutlich wird hier einerseits der bereits fortgeschrittene Entwicklungsstand dieser Verfahren. Ein Grund hierfür ist, dass die gezielte Rücklösung von Struvit zu operativen Vorteilen innerhalb der Kläranlage führt (z.B. Verbesserung des Entwässerungsergebnisses, Verringerung der Rückbelastung, die Einsparung von Polymeren zur Entwässerung, erhöhter Gasertrag bei der Kombination von Verfahren zur P-Rückgewinnung mit zusätzlichen vorgeschalteten Hydrolysen). Diese operativen Vorteile sind in der Regel auch der Grund für eine Integration der Verfahren auf der Kläranlage.

Ansatzpunkt	Bezeichnung/ Verfahren	Produkt	Entwicklungsstand	Voraussetzung	Rückgewinnungsrate
1. a) Fällung im Faulschlamm	ohne Rücklösung, z. B. AirPrex	Struvit	Großtechnik	BIO-P	5-15 %
	Lysogest	Struvit	Großtechnik	BIO-P	5-15 %
	mit Pondus-Hydrolyse im ÜS	Struvit	Großtechnik	BIO-P	5-15 %
1. b) Fällung im Zentrat	ohne Rücklösung, z. B. Pearl, NuReSys, Phospaq	Struvit	Großtechnik	BIO-P	5-25 %
	mit Vorbehandlung des ÜS durch Wasstrip	Struvit	Großtechnik	BIO-P	10-40 %
	mit Haarslev-Hydrolyse und DLD-Konzept	Struvit	Pilot, Großtechnik im Bau	BIO-P	15-35 %
	mit Vorbehandlung des MS durch Wasstrip und FS-Hydrolyse durch Lysotherm	Struvit	Großtechnik	BIO-P	15-40 %
	Stuttgarter Verfahren	Struvit	Pilot	keine	bis zu 50 %

Abbildung 2: Übersicht über integrierte Verfahren auf der Kläranlage (Kraus, et al., 2019)

Die operativen Vorteile führen dazu, dass die Verfahren i.d.R. im Vergleich zu einer konventionellen P-Düngemittelproduktion ein Umweltentlastungspotenzial aufweisen. In Hinsicht auf das P-Recycling weisen sie jedoch eine Reihe von Nachteilen auf, dazu gehören die Beschränkung auf Bio-P und die geringen Rückgewinnungsquoten von 5 – 40%, die Vorgaben der Klärschlammverordnung werden somit i.d.R. nicht eingehalten (Reduzierung des Phosphorgehalts um mindestens 50 Prozent oder auf weniger als 20 g P / kg Trockenmasse gemäß §3a Abs. 1 AbfKlärV). Die Rückgewinnung von Phosphor aus Kläranlagen mit Chem-P-Fällung erfolgt durch die Zugabe von starken Säuren, wie z.B. beim Stuttgarter Verfahren. Dadurch lassen sich deutlich höhere Rückgewinnungsraten erreichen. Allerdings hat die Zugabe starker Säuren wiederum negative Auswirkungen auf die Ökobilanz. Das führt dazu, dass sich im Vergleich zur konventionellen P-Düngemittelproduktion kein Umweltentlastungspotenzial, sondern deutlich höhere Aufwendungen ergeben (Kraus, et al., 2019).

2.1.3 Nachgeschaltete Rückgewinnung

Die nachgeschaltete Rückgewinnung erfolgt aus der Festphase des Klärschlammes, entweder aus der Klärschlamm-Asche (Monoverbrennung mit nachgeschaltetem P-Rückgewinnungsverfahren) oder direkt aus entwässertem Klärschlamm (z.B. Pyrolyse) oder dem ausgefaulten Schlamm (z.B. HTC).

2.1.3.1 Monoverbrennung mit nachgeschaltetem P-Recycling

Bei der Verbrennung des entwässerten Klärschlammes verbleibt das Phosphat in der Asche. Der Phosphatgehalt in der Monoverbrennungsasche beträgt rund 20 Mas.-% P_2O_5 . Nachgeschaltete Rückgewinnungsverfahren wie AshDec oder TetraPhos erreichen i.d.R. Rückgewinnungsraten >80% und halten somit die Vorgaben der Klärschlammverordnung ein.

Beim TetraPhos-Verfahren² wird die Klärschlamm-Asche nach der Monoverbrennung in technischer Phosphorsäure aufgelöst, die sich mit dem in der Asche enthaltenen Phosphat anreichert. Die Schwermetalle werden durch die Zugabe von einem sulfidischen Additiv in der Aschematrix gehalten und anschließend abfiltriert. Dabei entstehen Rückstände, die in etwa der eingesetzten Aschemenge entsprechen. Als Nebenprodukte entstehen Gips sowie eine konzentrierte Fe-/Al-Lösung, die als Fällmittel auf der Kläranlage wiederverwendet werden kann (Kraus, et al., 2019).

Neben dieser Rücklösung aus der Asche kann auch die Asche selbst soweit aufbereitet werden, dass sie anschließend als P-Düngemittel fungiert, wie im AshDec-Verfahren. Dabei wird die Klärschlamm-Asche erwärmt und mit Alkaliadditiven sowie einem Reduktionsmittel versetzt und anschließend in einen Drehrohrofen gegeben. Die Phosphatphasen in der Asche werden dabei in eine pflanzenverfügbare Form überführt und flüchtige Schwermetalle (insb. As, Cd, Hg, Pb) durch die reduzierende Atmosphäre aus der Asche teilweise entfernt und über das Abgas abgeschieden. Neben dem AshDec-Produkt (pflanzenverfügbare und schwermetallärmere Klärschlamm-Asche) entsteht im Rahmen der Abgasreinigung eine Flugasche, die anschließend entsorgt werden muss. Dieser zu entsorgende Anteil

² <https://www.remondis-nachhaltigkeit.de/handeln/phosphorrueckgewinnung/#:~:text=Mit%20dem%20TetraPhos%C2%AE%2DVerfahren,Phosphor%20erstmal%20insgesamt%20und%20nachhaltig.>

entspricht jedoch nur etwa 3 % des Ausgangsmaterials. Der Schwermetallgehalt im Produkt hängt dabei stark vom Ausgangsmaterial ab (Kraus, et al., 2019).

2.1.3.2 Pyrolyse/Pyreg

Beim Pyreg³-Verfahren wird getrockneter Klärschlamm (TS-Behalt 80%) in einem gestuften Pyrolyseverfahren thermisch behandelt. Voraussetzung ist neben dem TS-Gehalt ein Heizwert von mindestens 10 MJ/kg FM. In der PYREG-Anlage wird der getrocknete Klärschlamm durch 500 – 700°C heiße PYREG-Reaktoren geführt. Dort wird er nicht verbrannt, sondern erst entgast und anschließend durch gezielte Luftzugabe karbonisiert. Die thermische Behandlung im PYREG-Verfahren erfolgt bei deutlich geringeren Temperaturen im Gegensatz zur Monoverbrennung von Klärschlamm. Damit bleibt der im Klärschlamm vorhandene Phosphor pflanzenverfügbar und es ist keine nachträgliche Behandlung notwendig. Die in den Reaktoren entstehenden brennbaren Gase werden in einer nachgeschalteten Brennkammer in einer flammenlosen Oxidation energetisch verwertet und die so gewonnene Energie in den Pyrolyse-Prozess zurückgeführt. In einer nachgeschalteten Abgasreinigungsstufe werden die sauren Schadgase in einem alkalischen Rauchgaswäscher aus dem Abgas entfernt und flüchtige Klärschlammbestandteile wie Quecksilber an einen Aktivkohlefilter adsorbiert⁴. Der feste Rückstand (Klärschlammkarbonisat) zeichnet sich durch einen hohen Anteil an pflanzenverfügbarem Phosphor aus, der potenziell in der Düngemittelproduktion eingesetzt werden kann (Bertau, et al., 2017).

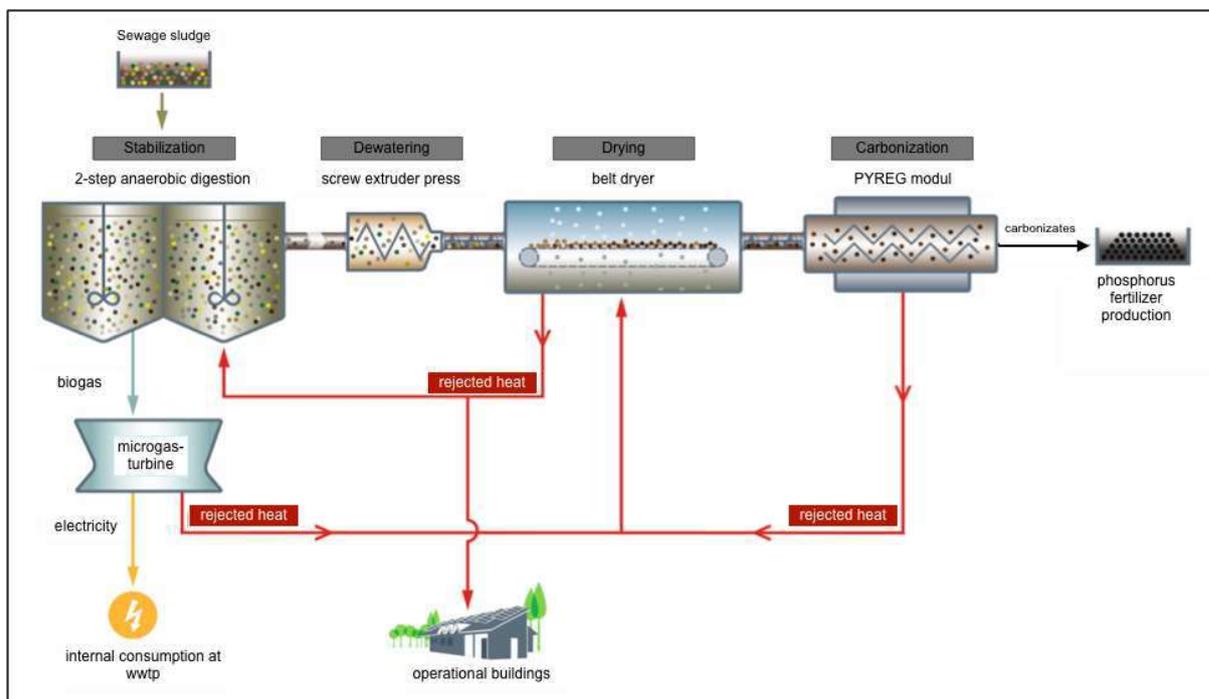


Abbildung 3: Technischer Ansatz der integrierten Klärschlammkarbonisierung auf der Kläranlage Linz-Unkel (Appell, 2022)

³ <https://pyreg.com/de/>

⁴ https://www.pyreg.de/wp-content/uploads/2019_PYREG_brochure_sludge_DE_e_version.pdf

Im Rahmen eines Wärmenutzungskonzeptes kann der Wärmebedarf für die Trocknung des Klärschlammes durch die Überschusswärme der Pyrolyseanlage zu einem großen Teil selbst gedeckt werden. Weitere Energie zur Vortrocknung wird über die Abwärme einer Faulgasturbine oder eines - BHKWs benötigt. Die Abluft des Trockners kann wiederum zur Heizung der Faulung und des Betriebsgebäudes genutzt werden (Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel).

2.1.4 Hydrothermale Karbonisierung

Das TerraNova®ultra Verfahren für entwässerten Klärschlamm wird direkt auf der Kläranlage integriert. In einem Druckreaktor werden der ausgefautle und entwässerte Klärschlamm (ca. 20 – 30 Mas.-% TS) bei Temperaturen von ca. 180 °C unter ca. 25 bar Druck in einem Rührreaktor unter Zugabe von Katalysatoren (z.B. H₂SO₄) behandelt. Der Rührreaktor wird über einen Thermoölkreislauf beheizt. Der dabei entstehende Slurry (Suspension von feinen Kohlepartikeln) wird über einen Ausstragswärmetauscher abgekühlt und die dabei entzogene Wärmeenergie dem Eintragswärmetauscher über einen separaten Thermoölkreislauf wieder zugeführt. Die Phosphorrückgewinnung im HTC-Verfahren erfolgt herkömmlicherweise durch die Zugabe von Säuren zu dem Slurry, um den Phosphor in die flüssige Phase zu überführen. Anschließend erfolgt eine Entwässerung auf bis zu 70 Mas.-% Trockensubstanz in einer Kammerfilterpresse. Dabei entsteht ein Feststoff (HTC-Kohle bzw. Hydrochar), der als Brennstoff eingesetzt werden kann, ggf. in Verbindung mit einem weiteren Trocknungsschritt. Darüber hinaus entsteht ein P-haltiges Filtrat. Diesem wird in einem nächsten Schritt Calciumsilikat-hydrat (CSH) zugegeben, an den sich der Phosphor bindet und anschließend das Düngeprodukt darstellt. Nach der Rücklösung wird das Filtrat zurück in die Faulung auf der Kläranlage geführt, wo es gemeinsam mit dem Klärschlamm einer anaeroben Behandlung unterzogen wird. Schematisch ist die Integration des HTC-Verfahrens in Abbildung 4 dargestellt.

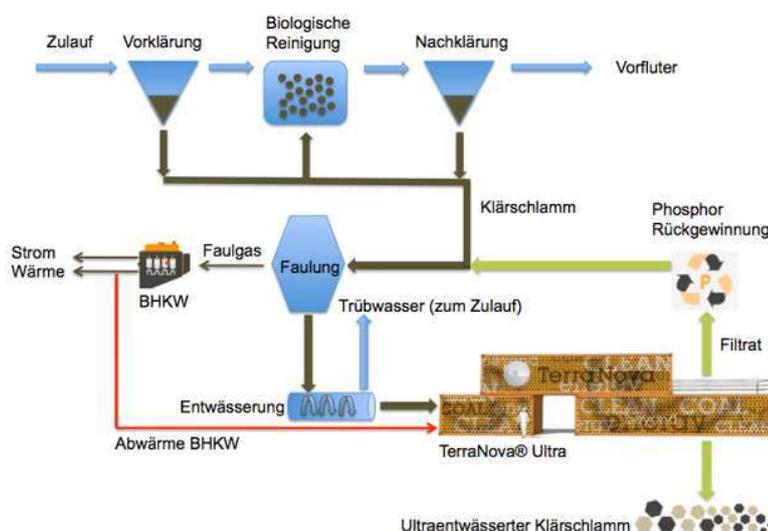


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Integration des HTC-Verfahrens auf der Kläranlage (Quelle: Terra Nova)

Die Vorteile des Verfahrens liegen einerseits in der Mengenreduktion und dem verringerten Energiebedarf, der bei anderen Verfahren für die Trocknung eingesetzt werden muss (laut Herstellerangaben

etwa 80 % verringerter Energiebedarf). Hinzu kommt die zusätzliche Produktion von Faulgas in der Größenordnung von etwa 15 %. Die P-Rückgewinnungsraten des Verfahrens liegen laut Herstellerangaben bei 60 – 80 % und erfüllen somit die Vorgaben der AbfKlärV. Eine anschließende Mitverbrennung der HTC-Kohle ist möglich.

Beim HTC-Verfahren fällt auf, dass die Technologie bereits seit längerer Zeit als Demonstrationsanlage und in verschiedenen Studien untersucht wurde, dennoch bis heute lediglich eine großtechnische Anlage in China in Betrieb ist. Ein in der Literatur häufig in Zusammenhang mit den Herausforderungen der praktischen Umsetzung genannter Punkt ist, dass es sich bei dem HTC-Filtrat um einen schwer zu handhabenden Rückstand handelt. Dieser zeichnet sich insbesondere durch eine hohe organische Belastung (CSB-Gehalte bis zu 90 g / L) aus. Hinzu kommen eine Reihe weitere Inhaltsstoffe, wie löslicher organischer Verbindungen (z.B. Zucker, Furfural, flüchtige Fettsäuren), schwer abbaubare Verbindungen und Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff.

Tabelle 1 führt die Eckdaten des HTC-Verfahrens auf. Darüber hinaus ist vermerkt, welche Werte jeweils in der Literatur angegeben sind. Der refraktäre (nicht abbaubarer) Anteil des CSB liegt bei etwa 7 % des Anfangs-CSB im HTC-Filtrat. Theilen et al. (2021) untersuchten die Mitbehandlung des Abwassers aus der HTC von kommunalem Klärschlamm in zwei baugleichen Laborkläranlagen, wobei in einer der Anlagen HTC-Prozesswasser zudosiert wurde. Dabei erhöhten sich die CSB-Ablaufwerte um ca. 7 mg / L, eine Reserve in dieser Höhe müsste im Fall einer Implementierung auf der Kläranlage vorhanden sein. In der erwähnten Untersuchung konnten dennoch die Ablaufwerte gemäß den Anforderungen für kommunale Kläranlagen eingehalten werden. Insgesamt kamen die Autoren in der Studie zu dem Schluss, dass die Zudosierung des HTC-Prozesswassers zu einem Mehraufwand bezüglich Strombedarf für die Belüftung (CSB-Elimination, Nitrifikation), ggf. einer erhöhten Dosierung externer Kohlenstoffquellen (für Denitrifikation), einem erhöhten Fällmittelbedarf (P-Elimination) führen kann, um die Ablaufwerte wie bei Anlagen ohne Mitbehandlung zu erreichen. Allerdings müssen diese Punkte jeweils im Einzelfall überprüft werden (Theilen, Eichenauer, Schwenk, & Luthardt-Behle, 2021).

BUND Naturschutz in Bayern e.V.

Analyse von Klimawirkungen unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren

Tabelle 1: Eckdaten des HTC-Prozesses nach Herstellerangaben bzw. Literatur

	Wert	Quelle
Erhöhung des Faulgasertrags	15 % (16 - 19%)	Herstellerangaben, Literatur ⁵ (Potenzial oder Laborversuche)
Abbau CSB in der anaeroben Behandlung	60 - 80 %	Literatur ^{6,7}
Refraktärer Anteil CSB – erhöht den CSB im Ablauf der Kläranlage	7 %	Herstellerangabe
	1 - 14 %	Literatur ⁸
Verbesserte Entwässerbarkeit, TR im Klärschlamm	> 65%	Herstellerangaben
	< 50%	Studie mit Pilotversuchen ⁹
P-Rückgewinnungsrate	60 - 80%	Herstellerangaben
CSB-Elimination in der Anaerobvergärung	60 - 80%	Literatur ¹⁰

Ein weiterer Faktor, der in diesem Zusammenhang relevant ist, ist die grundsätzliche Frage, ob die beschriebene Rückführung des Filtrats in die Faulung auf der Kläranlage gemeinsam mit dem Klärschlamm wie beschrieben überhaupt möglich ist. Derzeit gibt es keine solche Umsetzung in der Praxis. Grundsätzlich ist das Potenzial für eine anaerobe Behandlung des Filtrats hoch. Einerseits wegen des vielversprechenden Energieertrags und andererseits, um den hohen CSB-Gehalt zu reduzieren. Dies wurde in verschiedenen Studien und Laborversuchen untersucht und nachgewiesen. Gleichzeitig werden in der Literatur aber auch eine Reihe von Komponenten im HTC-Filtrat beschrieben, die entweder eine hemmende oder sogar toxische Wirkung auf den Vergärungsprozess haben können. Auch Tahir Khan et al. (2021) und Tahir Khan et al. (2022) beschreiben in ihren Studien bezogen auf die anaerobe Vergärung hemmende Wirkungen auf den Methanertrag. Betrachtet wurde hier jedoch nicht HTC-Filtrat, sondern eine ähnliche Substanz (5-hydroxymethylfurfural) sowie einzelne Bestandteile, die sich ebenfalls im HTC-Filtrat wiederfinden, wie beispielsweise Furane (Tahir Khan et al. 2022) (Tahir Khan, Krümpel, Wüst, & Lemmer, 2021). Auch Blöhse (2017) kommt in seiner Untersuchung zur anaeroben Behandlung des HTC-Filtrats zu dem Schluss, dass eine anaerobe Vergärung zwar grundsätzlich möglich ist, aber weitere Untersuchungen notwendig sind eine klare Aussage über die Leistungsgrenzen verschiedener anaerober Systeme, potenzielle Hemmwirkungen und hinsichtlich zusätzlicher Nährstoffanforderung (Blöhse, 2017), (Ipiates, de la Rubia, Diaz, Mohedano, & Rodriguez, 2021) geben zu können. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der aktuelle Stand der Wissenschaft zu keiner eindeutigen Empfehlung der Technologie kommt.

Eine Studie von Remy & Stüber (2015) untersuchte das Potenzial für die Einführung eines HTC-Verfahrens für die Klärschlammbehandlung auf Berliner Klärwerken. Auf Basis von Herstellerangaben

⁵ (Ipiates, de la Rubia, Diaz, Mohedano, & Rodriguez, 2021)

⁶ (Ipiates, de la Rubia, Diaz, Mohedano, & Rodriguez, 2021)

⁷ (Blöhse, 2017)

⁸ (Remy & Stüber, 2015)

⁹ (Remy & Stüber, 2015)

¹⁰ (Ipiates, de la Rubia, Diaz, Mohedano, & Rodriguez, 2021)

und Laboranalysen ergab sich zunächst ein Vorteil der HTC auf die Klimabilanz durch den zusätzlichen Faulgasertrag, einer verbesserten Gutschrift für die Verbrennung (verbesserter Heizwert) und reduzierter N₂O-Emissionen bei der Monoverbrennung im Vergleich zu einem System ohne HTC. Der Energiebedarf für den HTC-Prozess und die erhöhten Aufwendungen zur Behandlung der Rückbelastung sollte jedoch durch die Gutschriften vollständig ausgeglichen werden. Allerdings ergaben die ebenfalls durchgeführten Pilotversuche deutlich geringere Vorteile für den HTC-Prozess hinsichtlich Energie- und Klimabilanz als durch die Laborversuche prognostiziert, teilweise sogar eine Verschlechterung, resultierend durch einen geringeren Faulgasertrag, ein schlechteres Entwässerungsergebnis und einen höheren Energieverbrauch. Hinzu kommt, dass die P-Rücklösung durch eine Ansäuerung erfolgt (substantielle Rücklösung des Phosphors in Filtrat bei pH<3), was einerseits zu einer höheren Auswaschung von Schwermetallen in das Filtrat und insgesamt zu einer Verschlechterung der Klimabilanz führt. Insgesamt kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die Studie zwar das prinzipielle Potential eines HTC-Verfahrens für die Klärschlammbehandlung aufzeigen konnte, aber auch die möglichen Probleme, die mit einer Einführung einhergehen können. Ausgehend von den Erkenntnissen aus der Studie konnten die Autoren daraufhin keine Empfehlung für eine weitere Erprobung oder Implementierung des HTC-Verfahrens auf Berliner Klärwerken geben (Remy & Stüber, 2015)

3 Auswertung auf Basis von in SAmPSONS enthaltenen Steckbriefen zu unterschiedlichen Klärschlammverwertungsverfahren

Bei SAmPSONS handelt es sich um eine statische Simulationssoftware für Abwasserinfrastrukturen, die Auskunft über eine große Anzahl von Faktoren geben kann, welche bei der Planung zu berücksichtigen sind. Die Entwicklung erfolgte im Rahmen des gleichnamigen, durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten, Projektes¹¹. Mit Hilfe von SAmPSONS lassen sich sowohl Ressourcenorientierte Sanitärsystemen (ROSS) als auch konventionelle Abwassersysteme hinsichtlich ihrer Stoff- und Ressourcenströme simulieren und auf Basis einer Vielzahl von Nachhaltigkeitskriterien bewerten und vergleichen¹.

In SAmPSONS liegen für alle implementierten Technologien Daten vor, die in sogenannten Daten-Steckbriefen erfasst sind. Diese Daten-Steckbriefe bilden die Grundlage für die Verfahrensblöcke der einzelnen Technologien und gehen als Standard-Werte („Default“-Werte) in die Berechnungen ein. Anhand unterschiedlicher Fallbeispiele wurden diese Werte im Rahmen des DBU-Projektes validiert (nähere Informationen dazu im Abschlussbericht „SAmPSONS“). Die Validierung zeigte insgesamt eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen detaillierter Einzelfallstudien. SAmPSONS bewegt sich im Bereich der Grobplanung, die einzelnen Ergebnisse hängen stark von den getroffenen Annahmen ab und ersetzen keine detaillierte Planung. Dennoch lassen sich Rückschlüsse auf Tendenzen treffen, insbesondere was den Vergleich von Alternativen untereinander betrifft.

¹¹ „SAmPSONS – Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in neuartigen Sanitärsystemen – Unterstützung der Analyse ihrer Funktion, Kosten und Ressourcenhaushalts“ (AZ 32768/01) sowie „Verifikation eines Planungswerkzeuges zur Simulation und Visualisierung von Stoffströmen in neuartigen Abwassersanitärsystemen“ (AZ 35081/01), gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Alle Default-Werte in SAMPSONS können innerhalb der Verfahrensblöcke angepasst werden, sodass bei Vorliegen spezifischer, fallbezogener Werte diese eingesetzt werden können, um die Genauigkeit der Aussagen zu erhöhen. Die im Rahmen der vorliegenden Studie aufgebauten Szenarien werden dem Auftraggeber gemeinsam mit dem Bericht zur Verfügung gestellt. Die Simulationssoftware SAMPSONS kann über folgenden Link bezogen werden: <https://www.ifak.eu/de/produkte/simba/sampsons>.

3.1 Aufbau der Simulation in SAMPSONS

Für alle betrachteten Verfahren wurde ein einheitliches Grundszenario mit identischen Nebenparametern gewählt um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Dieses besteht aus einer Siedlung mit 50.000 Einwohnern (EW) und einer Mischkanalisation, wobei Fremd und Regenwasser im betrachteten Szenario vernachlässigt werden. Die Mischkanalisation ist an eine Kläranlage der Größenklasse 4 mit 50.000 EW angeschlossen, eine Klärschlammfaulung wird nachgeschaltet. Das bei der Vergärung gewonnene Faulgas wird in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zu thermischer und elektrischer Energie umgewandelt, welche als Gutschriften in der Treibhausgas (THG)-Bilanz berücksichtigt werden. Ebenfalls geht der Anteil an rückgewonnenen Nährstoffen als Düngemittelgutschrift in die THG-Bilanz ein.

Die betrachteten Szenarien mit den verschiedenen Klärschlammrückgewinnungsverfahren unterscheiden sich ab der Behandlung des ausgefaulten Klärschlammes. Eine Beschreibung der betrachteten P-Recyclingtechnologien (AshDec, TetraPhos, Pyrolyse und HTC) findet sich in Kapitel 2.

3.1.1 Szenario 1: Monoverbrennung und nachgeschaltetes P-Recyclingverfahren

In diesem Szenario wird eine Monoverbrennung des anfallenden, kommunalen Klärschlammes mit zwei verschiedenen nachgeschalteten P-Recyclingverfahren simuliert. Der ausgefaulte Klärschlamm wird auf der Kläranlage entwässert und getrocknet und anschließend mit LKWs zu einer zentralen Monoverbrennungsanlage transportiert. Für diese Strecke wird ein mittlerer Transportweg von 100 km angenommen. In der Monoverbrennungsanlage wird der Klärschlamm als alleiniger Einsatzstoff im Wirbelschichtverfahren bei ca. 900°C verfeuert. Anschließend wird aus der Rauchgasasche mit den folgenden Verfahren Phosphor zurückgewonnen.

a) P-Recyclingverfahren: AshDec

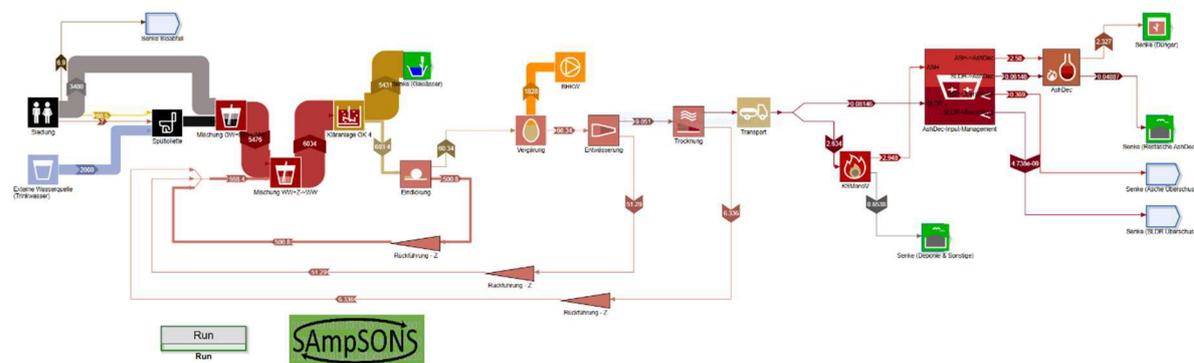


Abbildung 5: Aufbau des AshDec-Szenarios in SAMPSONS (siehe auch Anlage 2a)

b) P-Recyclingverfahren: TetraPhos (Aufbau des Szenarios siehe Anlage 2b)

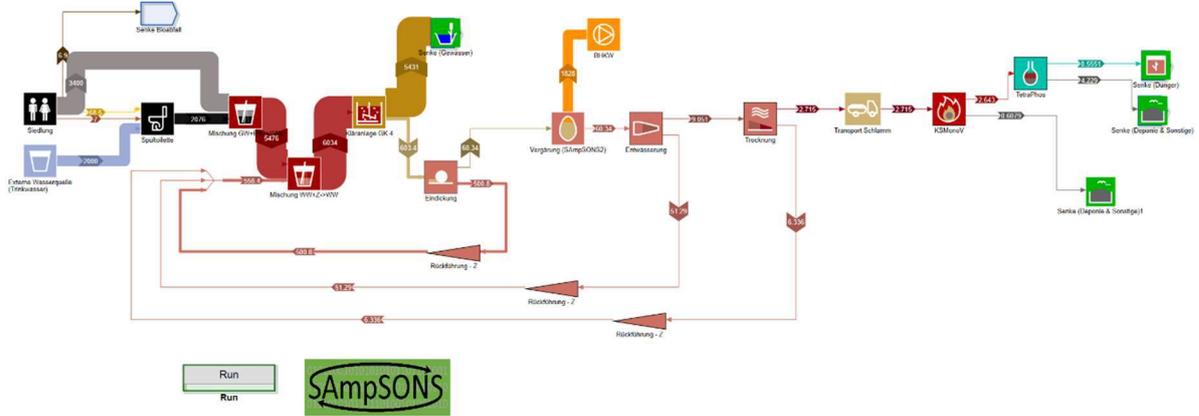


Abbildung 6: Aufbau des TetraPhos-Szenarios in SAmPSONS (siehe auch Anlage 2b)

3.1.2 Szenario 2: Klärschlammkarbonisierung bzw. -pyrolyse

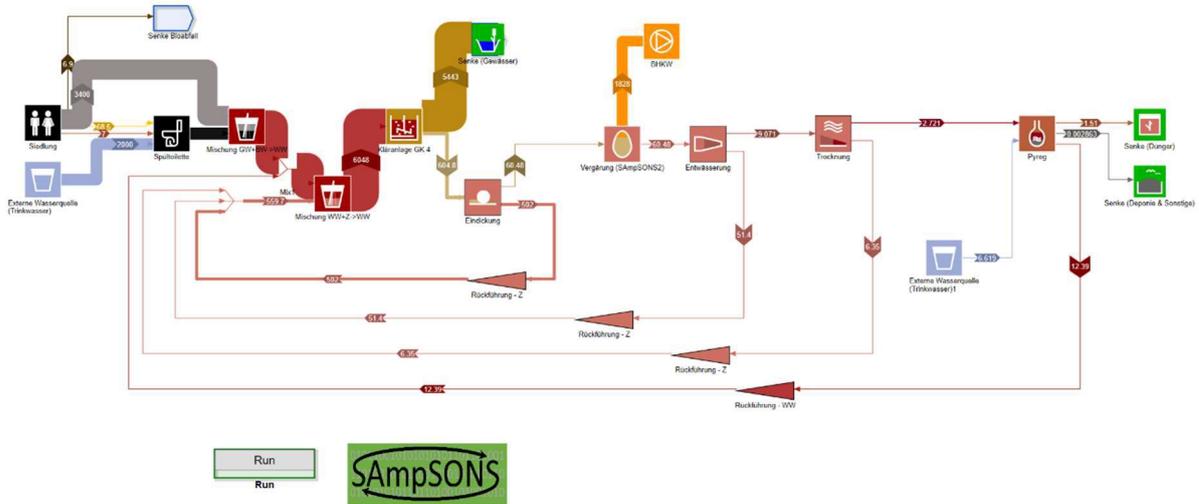


Abbildung 7: Aufbau des Szenarios 2 Klärschlammkarbonisierung bzw. -pyrolyse in SAmPSONS (siehe auch Anlage 2c)

3.1.3 Szenario 3: Hydrothermale Karbonisierung (HTC)

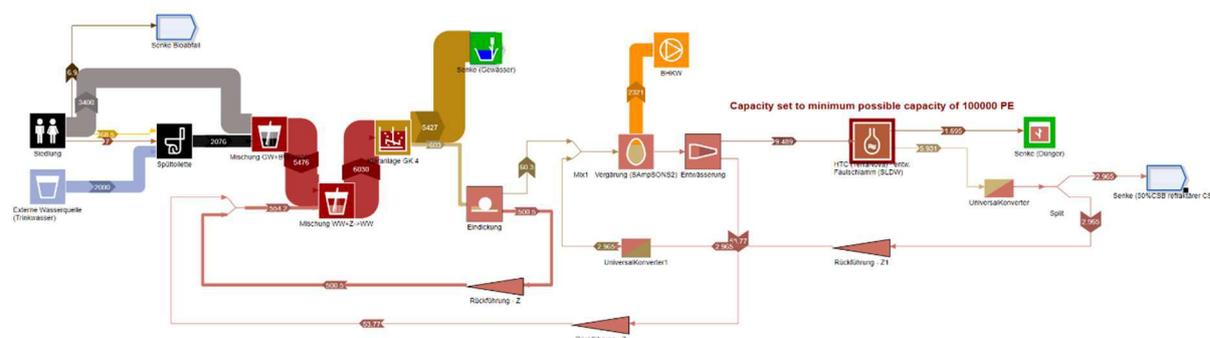


Abbildung 8: Aufbau des Szenarios 3 HTC in SAMPSONS (siehe auch Anlage 2d)

Der Anteil an refraktärem (nicht biologisch abbaubaren) CSB (ca. 50 %) wird in der Simulation durch ein Aufteilen des zurückgeführten Filtrats abgebildet. Der Prozess der Phosphor-Rückgewinnung (Zugabe von Säure, Bindung mittels Calciumsilikathydrat) ist in SAMPSONS nicht integriert, weshalb der Phosphor hauptsächlich in der HTC-Kohle verbleibt. Auf die Berechnung des zurückgewonnenen Phosphors hat dies aber keine Auswirkungen, da der Anteil des zurückgewonnenen Phosphors im Düng-Block berücksichtigt wird. Weitere Daten, die die P-Rückgewinnung im Rahmen des HTC-Prozesses berücksichtigen, wurden nach Rücksprache mit TerraNova entsprechend in SAMPSONS angepasst. Der in Kapitel 2.1.4 beschriebene Mehraufwand innerhalb der Kläranlage (Strombedarf für die Belüftung (CSB-Elimination, Nitrifikation), ggf. erhöhte Dosierung externer Kohlenstoffquellen für Denitrifikation und erhöhter Fällmittelbedarf) wurde in der Simulation mit SAMPSONS nicht berücksichtigt, da nach aktuellem Kenntnisstand keine Daten dazu vorliegen.

3.2 Ergebnisse

Die Betrachtung der Ergebnisse erfolgt hinsichtlich der THG-Bilanzierung in kg CO₂-Equivalenten sowie der absoluten Menge an zurückgewonnenem Phosphor. Zwar stehen in dieser Studie die Klärschlammverwertung und die dazugehörigen P-Recyclingverfahren im Vordergrund, dennoch wurde die gesamte Prozesskette des Abwassers betrachtet, d.h. Abwassertransport und -reinigung wurden ebenfalls bilanziert, unterscheiden sich in den Szenarien aber kaum. In den Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.3 werden die Verfahren allerdings nur ab der Behandlung des ausgefaulten Klärschlammes beschrieben und verglichen, da die vorgelagerten bei allen Verfahren gleich sind. Eine Einordnung des gesamten Prozesses findet in Kapitel 3.2.4 statt.

Große Auswirkungen bei der THG-Bilanzierung in SAMPSONS haben Gutschriften und Senken. Bei einer Gutschrift wird zurückgewonnene Energie oder Rohstoffe mit den CO₂-Equivalenten belegt, die eine herkömmliche Herstellung benötigen würde. Diese Menge geht dann negativ (negatives Vorzeichen) in die Treibhausgasbilanz ein. Zu Gutschriften gehören Strom- und Wärmeproduktion, sowie die Nährstoffrückgewinnung aus den P-Recycling-Verfahren.

Des Weiteren werden die THG-Bilanzen in Errichtung (CAP) und Betrieb (OP) unterteilt. Die bei der Errichtung entstehenden Emissionen werden auf die Lebenszeit der Gebäude- oder Maschinenteile

abgeschrieben und beziehen sich somit auf ein Jahr (Einheit pro Jahr). Diese Betrachtung stellt in SAmPSONS eine Besonderheit im Vergleich zu anderen Bilanzierungen dar, da die Errichtung dort in der Regel nicht betrachtet und als vernachlässigbar angesehen wird. Auch im vorliegenden Vergleich machen diese in Relation zu den Emissionen aus dem Betrieb nur einen kleinen Teil aus.

Ein wichtiger Vergleich zwischen den Szenarien ist die absolute Menge an zurückgewonnenem Phosphor bzw. potenziell für die Rückgewinnung zu Verfügung stehendem Phosphor. Diese besitzt eine gewisse Relevanz für die Entscheidung ob ein P-Recycling Verfahren eingesetzt werden kann oder nicht. Die Pflanzenverfügbarkeit der einzelnen Endprodukte wird bei den Ergebnissen der Simulation nicht berücksichtigt, da hier nach aktuellem Kenntnisstand keine allgemeingültigen Werte vorliegen. Eine Einschätzung zur Düngewirkung der P-Rezyklate findet in Kapitel 4.2 näher statt.

Wie in Abbildung 10 zu sehen, ist bei den Szenarien 2 und 3 die Menge an Phosphor wesentlich höher als bei den Szenarien mit Monoverbrennung. Dieser Unterschied wird auch deutlich, wenn die THG-Bilanz pro Mengeneinheit recycelten Phosphors bezogen wird (Abbildung 9).

Hier wird auch der geringe Anteil der THG-Emissionen sichtbar, der sich aus der Errichtung der Anlagen ergibt. Dabei ist zu beachten, dass die Anlagen mit einer 100 %igen Auslastung dimensioniert wurden und nur der Anteil der im Szenario benötigten Anlagenkapazität in der Bilanzierung berücksichtigt wurde. Das bedeutet, dass die Emissionen für den Bau einer Anlage deutlich höher ausfallen können, wenn die installierte Kapazität nicht ausgelastet wird.

Dem gegenüber ist eindeutig zu erkennen, dass die Emissionen aus dem Betrieb die Treiber der THG-Bilanzierung sind. Es wird deutlich, dass bei den Szenarien 2 und 3 – Pyrolyse und HTC-Verfahren – die Emissionen um ein Vielfaches geringer sind als bei den Szenarien mit Monoverbrennung. Die genauen Unterschiede werden in den kommenden Abschnitten erläutert, wobei sich diese nur auf die Klärschlammbehandlung beziehen. Emissionen aus Abwassertransport, Kläranlage sowie Vergärung finden zunächst keine Betrachtung, da sich diese bei den Szenarien kaum unterscheiden.

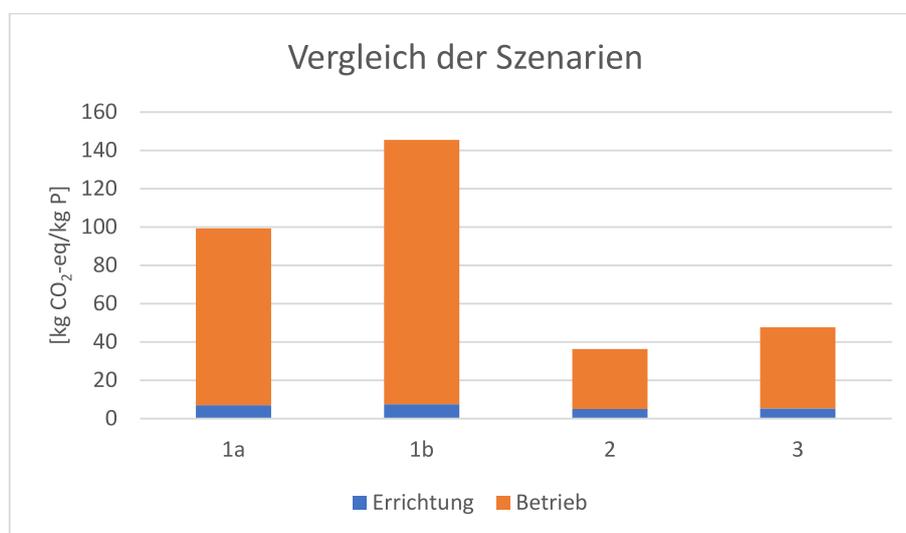


Abbildung 9: Ergebnisse in SAmPSONS, kg CO₂-eq/kg P.

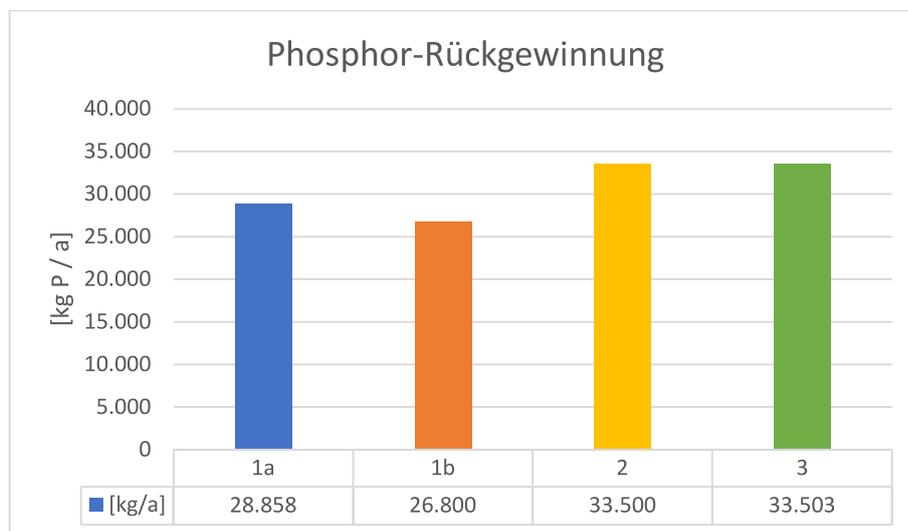


Abbildung 10: Ergebnisse in SAmpSONS, Phosphor-Rückgewinnung.

3.2.1 Szenario 1: Monoverbrennung und nachgeschaltetes P-Recyclingverfahren

a) Monoverbrennung mit AshDec

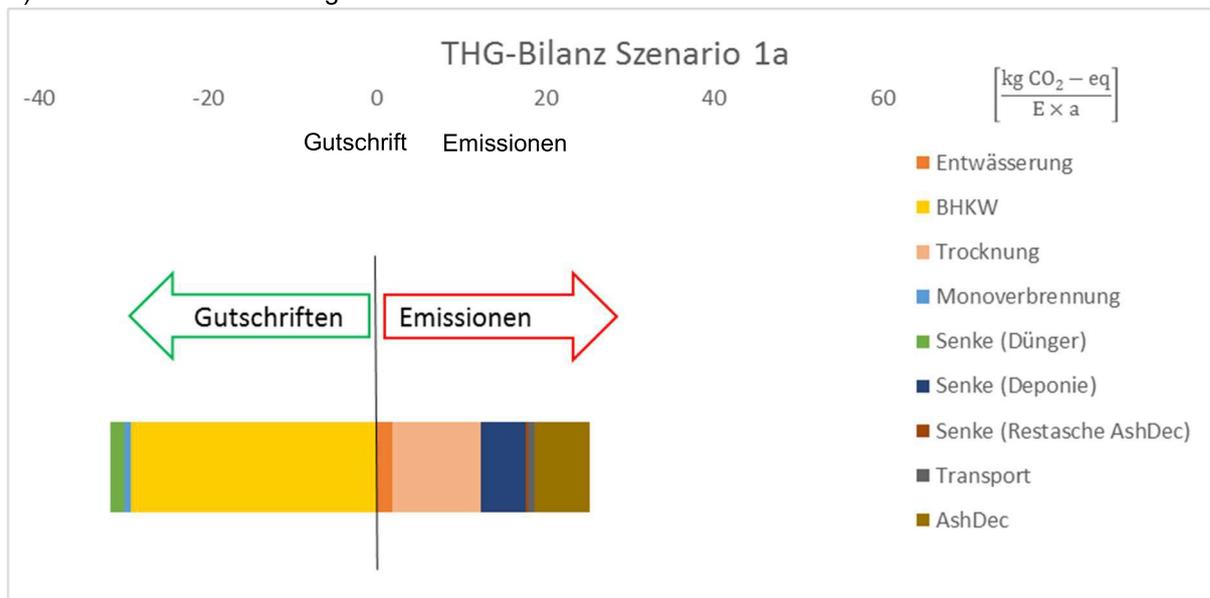


Abbildung 11: Treibhausgas-Bilanz für Szenario 1a: Monoverbrennung mit AshDec-Verfahren, in kg CO₂-Equivalenten pro Einwohner und Jahr.

Bei der Betrachtung der THG-Bilanzen für die Monoverbrennung und Phosphor Rückgewinnung mittels AshDec-Verfahren fällt die Dominanz der Gutschrift der Wärmeenergie des BHKWs auf, die allerdings bei allen betrachteten Szenarien mit Ausnahme des HTC-Szenarios gleich hoch ist. Diese Gutschrift beruht auf der elektrischen und thermischen Energiegewinnung aus dem Faulgas. Dabei ist zu beachten, dass von einem idealen Abnehmerszenario ausgegangen, d.h. die Abwärme aus dem

BHKW wird vollständig genutzt wird. Daneben gibt es eine geringe Gutschrift für die zurückgewonnenen Nährstoffe. Dabei wird bei den betrachteten Szenarien von einer vollen Verfügbarkeit der Nährstoffe in den Senken ausgegangen. Es wird deutlich, dass selbst diese relativ hoch angesetzte Annahme im Vergleich zur gesamten THG-Bilanz nur eine relativ kleine Wirkung hat. Darüber hinaus gibt es eine Gutschrift aus der Klärschlamm-Monoverbrennung (KSMonoV), die sich durch die entstehende Wärmeenergie ergibt. Auf der Seite der Emissionen fällt vor allem die Trocknung ins Gewicht, gefolgt vom AshDec Verfahren selbst sowie dem resultierenden, zu entsorgenden Abfallprodukt. Im Vergleich zum TetraPhos fallen die Emissionen für die Entsorgung (Deponierung, Senke (Restasche AshDec)) deutlich geringer aus, da die aufbereitete Asche selbst das Produkt ist und somit nur ein geringer Anteil an zu entsorgendem Reststoff übrigbleibt.

b) Monoverbrennung mit TetraPhos

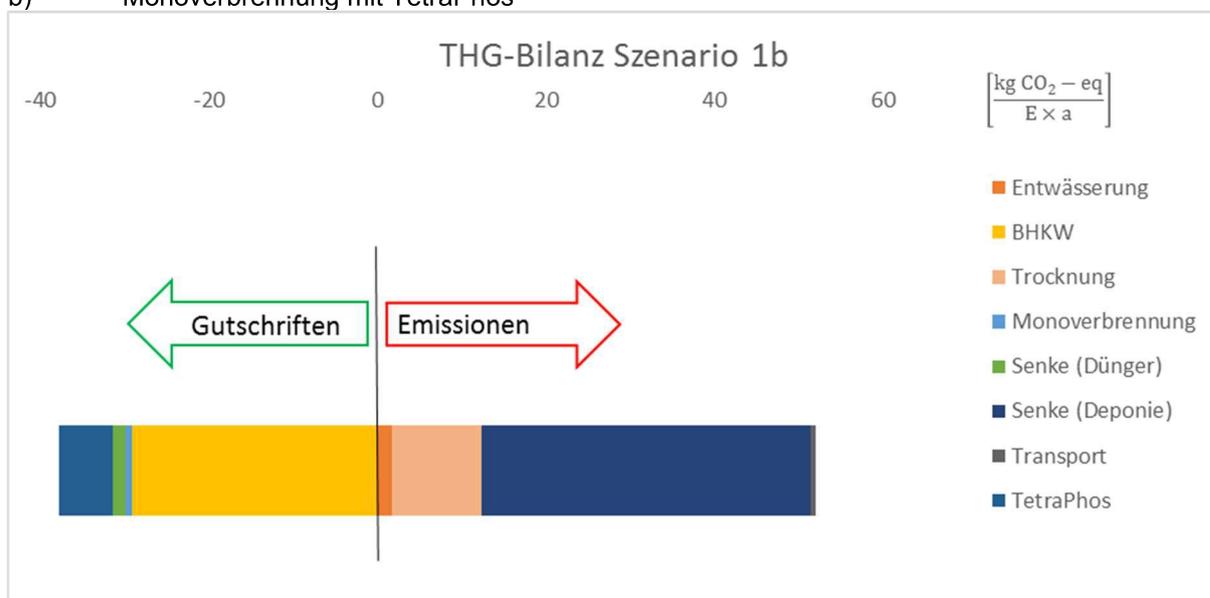


Abbildung 12: Treibhausgas-Bilanz für Szenario 1b: Monoverbrennung mit TetraPhos-Verfahren, in kg CO2-Equivalenten pro Einwohner und Jahr.

Das TetraPhos-Verfahren unterscheidet sich vom AshDec-Verfahren bei unserer Betrachtung nur im Verfahrensverlauf nach der Monoverbrennung. Auffällig sind die weitaus größeren Emissionen durch die Entsorgung der Abfallprodukte (Annahme Deponierung). Dies ergibt sich daraus, dass ein Großteil der im TetraPhos-Verfahren eingesetzten Asche anschließend als Reststoff übrigbleibt. Das Verfahren selbst ist in der Gesamtheit als Gutschrift bilanziert, da Nebenprodukte entstehen, die als Fällungsmittel eingesetzt werden können.

3.2.2 Szenario 2: Klärschlammkarbonisierung bzw. -pyrolyse

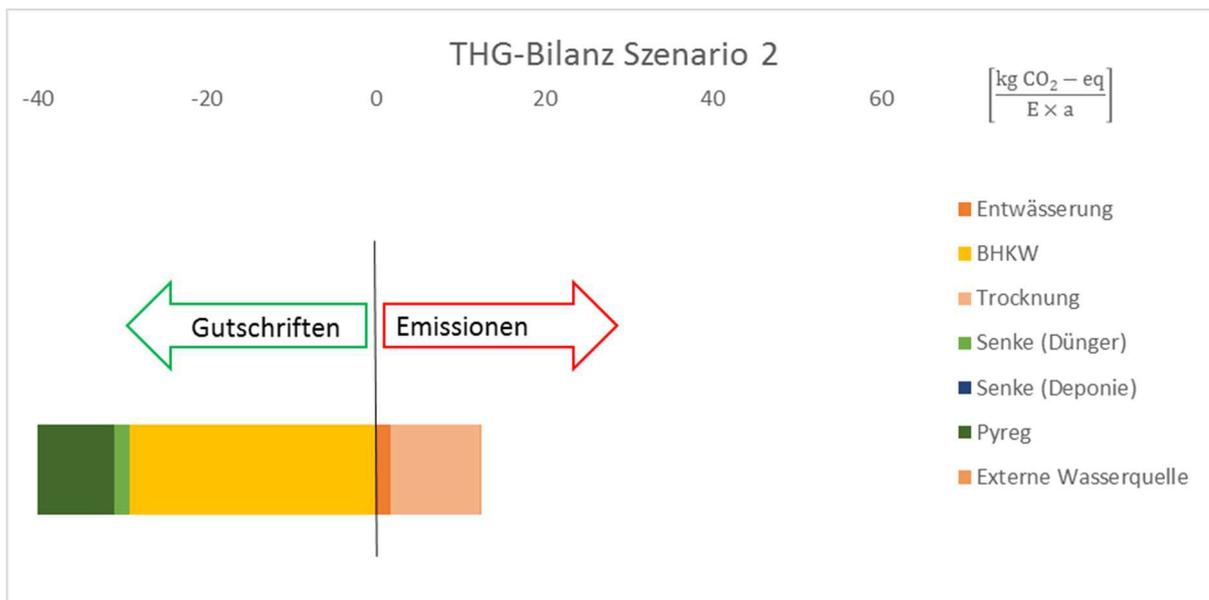


Abbildung 13: Treibhausgas-Bilanz für Szenario 2: trockene Pyrolyse im PYREG-Verfahren, in kg CO₂-Equivalenten pro Einwohner und Jahr.

Für die Bilanz der trockenen Pyrolyse im PYREG-Verfahren ist ein deutlicher größerer Anteil an Gutschriften im Vergleich zu den Emissionen zu erkennen. Auf der Seite der Emissionen befindet sich lediglich die Trocknung, Vergärung und Entwässerung, sowie ein vernachlässigbar kleiner Anteil an zu deponierender Restasche. Bei den Gutschriften ist neben der Wärmeenergie aus dem BHKW das PYREG-Verfahren selbst ausschlaggebend. Hier wird neben thermischer Energie zudem die Funktion des Klärschlammpyrolysats als CO₂-Senke genutzt und bilanziert. Das Szenario insgesamt besitzt somit sogar eine negative THG-Bilanz.

3.2.3 Szenario 3: Hydrothermale Karbonisierung (HTC)

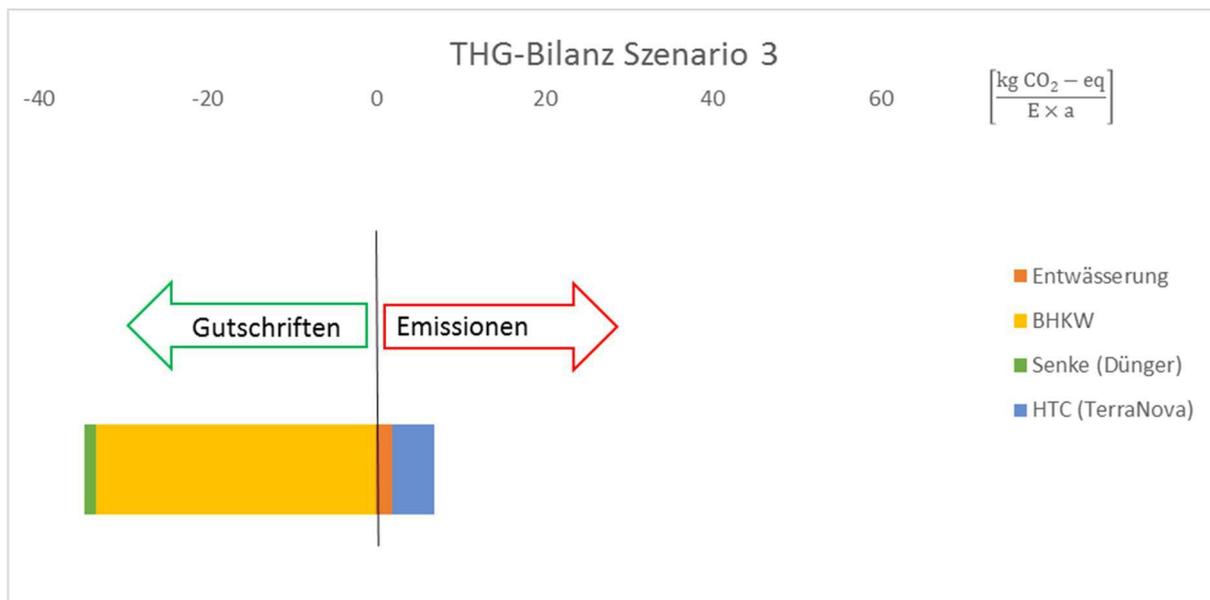


Abbildung 14: Treibhausgas-Bilanz für Szenario 3: hydrothermale Karbonisierung (HTC) von TerraNova, in kg CO₂-Equivalenten pro Einwohner und Jahr

Beim HTC-Verfahren entsteht neben der entwässerten Biokohle auch ein Prozesswasser, welches in die Vergärung zurückgeführt wird. Durch den hohen CSB-Gehalt kommt es dabei zu einer vermehrten Faulgas-Produktion und demnach mehr Gutschriften aus dem BHKW-Block, welche die Emissionen aus dem Verfahren selbst kompensieren. Wie gut das zurückgeführte Prozesswasser in der Faulung zu Biogas umgewandelt werden kann, ist demnach der entscheidende Faktor bei der THG-Bilanzierung in diesem Verfahren. Auch hier weist das betrachtete Szenario eine negative THG-Bilanz auf.

3.2.4 Vergleich der Szenarien

Vergleicht man die Ergebnisse der einzelnen Szenarien wird deutlich, welchen Einfluss die einzelnen Komponenten der Klärschlammbehandlung auf die gesamte Bilanz eines Szenarios haben.

In den Szenarien 1 a, 1 b und 2 ist die Trocknung eine der größten Emissionsquellen, welche in Szenario 3 aufgrund des HTC-Verfahrens wegfällt. Bei den Szenarien mit Monoverbrennung fällt zudem noch die Deponierung der Restasche ins Gewicht, wobei dieser Anteil beim TetraPhos-Verfahren deutlich höher liegt.

Bei den Gutschriften ist deutlich die Relevanz der Einsparung durch Nutzung der Wärme sowie elektrischer Energie aus dem BHKW sichtbar. Das Szenario 3 unterscheidet sich als einziges von den anderen Szenarien, da hier das Prozesswasser in die Faulungsanlage zurückgeführt wird und die Gasproduktion erhöht. Ob und wie das praktisch möglich ist, wird in Kapitel 2.1.4 näher erläutert.

BUND Naturschutz in Bayern e.V.

Analyse von Klimawirkungen unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren

Da demnach das BHKW einer der größten Treiber in der Bilanz darstellt, ist wie zuvor erwähnt die Nutzung Strom und Wärme essentiell. Findet sich dafür kein Abnehmer, können diese Gutschriften auch nicht angerechnet werden.

Ein besonderes Merkmal beim Pyreg-Verfahren in Szenario 2 ist die Nutzung des Karbonisats als CO₂-Senke, aus welcher ein Großteil der bilanzierten Gutschriften resultieren - ein Merkmal, das dieses Verfahren stark von den anderen dargestellten Szenarien unterscheidet.

Bei der Betrachtung des gesamten Szenarios inklusive Abwassertransport, Kläranlage und Vergärung werden die Dimensionen der Bilanzen aus der Klärschlammbehandlung deutlich. Diese sind großteils für die Emissionen in allen Szenarien verantwortlich. Die Gutschriften im Klärschlammbehandlungsprozess haben damit großes Potential die Gesamtbilanz in der Abwasserreinigungskette deutlich zu verringern und dabei wichtiger Phosphor aus der Prozesskette zurückzugewinnen.

Eine Alternative zu der konventionellen Abwasserreinigungskette kann auch ein ressourcenorientiertes Abwasserreinigungssystem (ROSS) sein, welches in Kapitel 5 beschrieben wird.

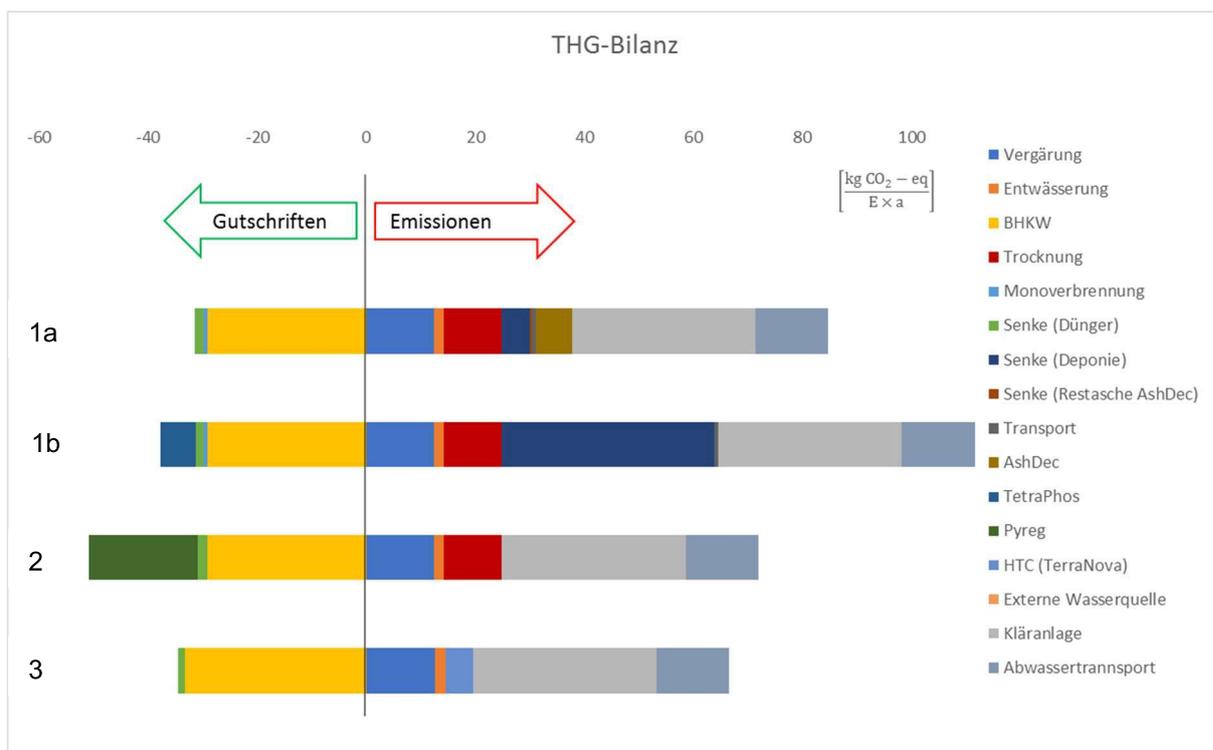


Abbildung 15: Betrachtung der Treibhausgasbilanz des gesamten Abwasserreinigungsprozesses, in kg CO₂-Equivalenten pro Einwohner und Jahr. Darstellung der Szenarien von oben (1 a) nach unten (3).

Deutlich wird aus den Ergebnissen der Simulation auch, dass der Transport im Vergleich zu den gesamten THG-Emissionen zu vernachlässigen ist. Dies deckt sich auch mit anderen Untersuchungen zu THG-Bilanz unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren, die selbst bei deutlich höheren Annahmen in Bezug auf die Transportstrecke zu demselben Ergebnis kommen (vgl. Kapitel 4.1)

4 Literaturrecherche zur Validierung der Daten, Vergleich mit den Ergebnissen in SAMPSONS

4.1 Vergleich mit Literatur zum Vergleich der Treibhausgasemissionen der betrachteten Szenarien

Generell gibt es wenig Literatur zum Vergleich der in der vorliegenden Studie betrachteten Szenarien in Hinsicht auf die Treibhausgasbilanz. Dies bestätigte sich sowohl in der Literaturrecherche als auch durch gezielte Befragung verschiedener ExpertInnen. Allerdings gibt es verschiedene Studien, die zumindest Teilaspekte der hier betrachteten Szenarien hinsichtlich der Treibhausgasbilanz betrachten. Medina-Martos et al. (2020) verglichen einen integrierten Ansatz der Klärschlammverwertung mittels HTC (HTC + anaerobe Vergärung) mit einem Vergleichsszenario, das lediglich die Vergärung beinhaltet. Für den integrierten Ansatz ergab sich eine Erhöhung des Energieertrages um etwa 15 % und somit geringere Umweltwirkungen als für die Vergärung alleine (Medina-Martos, et al., 2020). Gestützt wird dies durch eine weitere Studie für Berliner Klärschlämme, auf die bereits in Kapitel 2.1.4 eingegangen wurde. Hier wurden Energie- und Klimabilanzen zunächst auf Basis von Herstellerangaben und Laborversuchen erstellt und anschließend anhand von Daten aus Pilotversuchen überprüft. Auf Basis der Herstellerangaben und Laborergebnisse ergab sich für die Einführung eines HTC-Verfahrens auf der Kläranlage mit anschließender Faulung im Vergleich zu einem Referenzszenario ohne HTC-Verfahren Vorteile hinsichtlich der Energie- und Klimabilanz. Dabei spielten vor allem das zusätzlich erzeugte Faulgas und der verbesserte Heizwert eine Rolle. Der Energiebedarf für den HTC-Prozess und die erhöhten Aufwendungen zur Behandlung der Rückbelastung wurden durch die Gutschriften vollständig ausgeglichen. Die Pilotversuche lieferten allerdings schlechtere Ergebnisse hinsichtlich Entwässerungsergebnis sowie Energieverbrauch, so dass sich die prognostizierte Energie- und Klimabilanz nach unten korrigiert wurde (Remy & Stüber, 2015).

Heinrich et al. (2020) veröffentlichten einen Artikel über den ökologischen Fußabdruck von Klärschlammmasche im Vergleich zu Klärschlammkarbonisat in der Korrespondenz Abwasser (KA). Dabei wurden einerseits die CO₂-Äquivalente pro Tonne Klärschlamm und andererseits die Auswirkungen der Verfahren auf den Straßenverkehr quantifiziert. Daraus ergaben sich spezifische Emissionen von – 45 kg CO₂-eq / t kommunalem Klärschlamm bei der Pyrolyse im Vergleich zu 243 kg CO₂-eq / t kommunalem Klärschlamm bei der Monoverbrennung. Allerdings ist einschränkend zu sagen, dass diese Berechnung auf verschiedenen Grundannahmen beruht, beispielsweise wurden weder der Aufwand für die Trocknung des Klärschlammes noch die Nutzung von Überschusswärme bei der Monoverbrennung berücksichtigt. Auch die Annahmen zum Transport bei der Monoverbrennung sind mit 1.280 km hoch angesetzt (Dichtl, et al., 2020). Ohne hier näher auf die darauf aufbauende Diskussion einzugehen lassen sich dennoch folgende Punkte festhalten:

- Die CO₂-Emissionen für den Transport bei der Monoverbrennung sind trotz der eher hoch gegriffenen Annahmen im Vergleich zu den gesamten CO₂-Emissionen durch die Verbrennung sehr gering (etwa 2 %) und in der Gesamtbetrachtung von nachgelagerter Bedeutung. Unberücksichtigt bleibt dabei jedoch das zusätzliche Transportaufkommen und die damit steigende Belastung durch Verkehr, die faktisch durchaus Auswirkungen

haben, insbesondere für die Bevölkerung in der näheren Umgebung einer zentralen Monoverbrennungsanlage und sofern der Transport mittels LKW erfolgt.

- Berücksichtigt man rein die Kohlenstoffbilanz der Monoverbrennung im Vergleich zur Pyrolyse ergeben sich durch die vollständige Oxidation bei der Verbrennung deutlich höhere CO₂-Emissionen, da der im Klärschlamm enthaltene Kohlenstoff bei der Pyrolyse sequestriert werden kann (Heinrich, Lorenz, Hagemann, Kick, & Heinrich, 2020).

Appell (2022) kam zu dem Schluss, dass die Pyrolyse von Klärschlamm Vorteile gegenüber der Wirbelschichtverbrennung hinsichtlich der THG-Emissionen aufweist und als CO₂-negativ (carbon capture and storage) angesehen werden kann. Dies gilt selbst dann, wenn zum Trocknen des Klärschlammes externe Wärme notwendig ist (Appell, 2022). Auch im Rahmen der European Biochar Certification (EBC) werden Klärschlämme als möglicher Eingangsstoff für die Pyrolyse im Rahmen der „EBC-Richtlinien zur C-Senken Zertifizierung Version 2.1“ vom 25. Januar 2021 bereits erwähnt. Die Zertifizierung von C-Senken garantiert „die jederzeit überprüfbare Lagerung von Kohlenstoff im terrestrischen System.“ Solche zertifizierten C-Senken sind das Resultat des aktiven Entzugs von CO₂ aus der Atmosphäre. Dafür wird der gesamte Prozess betrachtet bis hin zur langfristigen Speicherung des Kohlenstoffs. Das C-Senken Potential ergibt sich demnach aus dem Kohlenstoffgehalt der Pyrolyseprodukte abzüglich aller mit der Herstellung und Verwertung verursachten Emissionen. Ausgehend vom C-Senken-Potenzial des EBC-Zertifikates können sogenannte C-Senken Zertifikate erzeugt werden, die anschließend über Handelsplattformen, wie sie die Firmen CarbonFuture oder Puro betreiben, gehandelt werden können¹². Auf Seite 16 der genannten Richtlinie wird angeführt, dass Klärschlamm als Biomasseeinsatzstoff für die Pyrolyse auf Grund der zunehmenden Bedeutung im Rahmen der EBC-Zertifizierung in Vorbereitung ist. Weiter heißt es, dass C-Senken Potenziale auf Basis von Pyrolyseprodukten aus Wirtschaftsdüngern und Klärschlämmen bereits berechnet und zertifiziert werden können¹³. Allerdings bleibt hierbei anzumerken, dass die C-Senken-Zertifizierung nur in Verbindung mit einer nachgewiesenen Senke möglich ist. Im Fall der Klärschlammpyrolysate käme hier potenziell der Einsatz als Düngemittel in Betracht, allerdings setzt dieser eine Zulassung als Düngemittel voraus, die es derzeit in Deutschland weder nach DüMV noch nach der EU-Düngemittelverordnung gibt. Einschränkend ist auch hier zu sagen, dass die Vorteilhaftigkeit des Pyrolyseverfahrens neben der Möglichkeit zu CO₂-Sequestrierung wesentlich von der Gesamtenergiebilanz und der Betriebsstabilität des Verfahrens abhängt.

Die Auswirkungen des P-Recyclings im Vergleich zur konventionellen P-Düngemittelproduktion wurden in einer Studie von Kraus et al (2019) untersucht. Daraus ergaben sich für die integrative Rückgewinnung auf der Kläranlage im Vergleich zur konventionellen P-Düngemittelproduktion ein Umweltentlastungspotenzial, insbesondere auf Grund der operativen Vorteile (Vergleich Kapitel 2.1.2). Allerdings sind diese Verfahren auf Kläranlagen mit biologischer Phosphorfällung beschränkt und weisen in der Regel geringe Rückgewinnungsraten bis max. 40 % auf und halten somit die Vorgaben der Klärschlammverordnung nicht ein. Im Allgemeinen führt die Rückgewinnung von Phosphor aus Kläranlagen mit chemischer P-Fällung zu höheren Rückgewinnungsraten. Diese werden durch die Zugabe von

¹² <https://www.ithaka-journal.net/kohlenstoff-senken-furs-klima>

¹³ https://www.european-biochar.org/media/doc/139/c-de_senken-potential_2-1.pdf

starken Säuren erreicht, mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Ökobilanz. Das führt dazu, dass sich im Vergleich zur konventionellen P-Düngemittelproduktion kein Umweltentlastungspotential, sondern deutlich höhere Aufwendungen ergeben. Für die Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche ergeben sich in der Studie etwa neutrale Umweltwirkungen im Vergleich zur konventionellen P-Düngemittelproduktion (Kraus, et al., 2019). Dies unterscheidet sich von den Ergebnissen der vorliegenden Studie. Grund ist der Umfang der berücksichtigten Emissionen. Es wurden lediglich die Emissionen aus den P-Rückgewinnungstechnologien selbst berücksichtigt, nicht jedoch aus den restlichen Schritten der Klärschlammbehandlung sowie der Deponierung der Abfallströme.

4.2 Zusammenfassung und P-Düngewirksamkeit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle betrachteten Verfahren noch einen TRL (Technology Readiness Level) < 7 aufweisen. Entweder, weil sie im Gesamtkonzept noch nicht großtechnisch umgesetzt sind (AshDec, TetraPhos, HTC) oder weil es rechtliche Einschränkungen gibt (keine Düngemittelzulassung in Deutschland für die Klärschlammpyrolysate). Eine Übersicht über die Verfahren und deren aktuellen technischen Stand findet sich im Anhang. Dabei wird deutlich, dass die Klärschlammpyrolyse (PYREG GmbH und Biomacon GmbH) als einziges Verfahren bereits technisch mehrfach umgesetzt ist. In einigen anderen EU-Mitgliedsländern ist auch der Einsatz der Klärschlammpyrolysate als Düngemittel möglich, z.B. in Schweden, Dänemark und Tschechien. Eine hohe Betriebsstabilität der Klärschlammkarbonisierungsanlagen in der Praxis zeigte sich insbesondere in Verbindung mit einer vorherigen Pelletierung des Klärschlammes, wie z.B. bei der Anlage im Klärwerk Niederfrohna (Zweckverband Frohnbach). Allerdings ist dies wiederum mit einer erhöhten Komplexität und einem höheren Energieaufwand verbunden.

Ein weiterer wesentlicher Faktor in Bezug auf die P-Recyclingtechnologien ist die Einsatzmöglichkeit der Produkte, da die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm in der Regel auf die Gewinnung eines Düngemittelproduktes abzielt. Dabei spielt sowohl die Pflanzenverfügbarkeit als auch die Belastung des Produktes (Schwermetalle, organische Schadstoffe und Keime sowie weitere Spurenelemente wie Al, Fe, Cu oder Zn) eine Rolle (Bertau, et al., 2017). Das Inverkehrbringen von Düngemitteln in Deutschland ist sowohl nach nationalen Recht (Düngegesetz, Düngemittelverordnung – DüMV) als auch nach der EU-Düngemittelproduktverordnung (Verordnung (EU) 2019/1009) möglich. In beiden Fällen gibt es Möglichkeiten, die Zulassung von noch nicht zugelassenen Düngemitteln zu beantragen.

Eine aktuelle Studie aus Hessen untersuchte die P-Düngewirksamkeit von Klärschlammkarbonisaten (Jacobi, Löber, Koch, & Schumann, 2022). Die Ergebnisse zeigen für das Ca-Phosphat als P-Rezyklat aus einem HTC-Prozess (TerraNova-Prozess GmbH) die beste P-Düngewirksamkeit, die sogar über der von Triplesuperphosphat (TSP) liegt. Auch die Struvite weisen eine höhere P-Düngewirksamkeit als TSP auf. Die Karbonisate (PYREG GmbH) und Aschen schneiden in der Untersuchung schlechter als TSP ab (Abbildung 16).

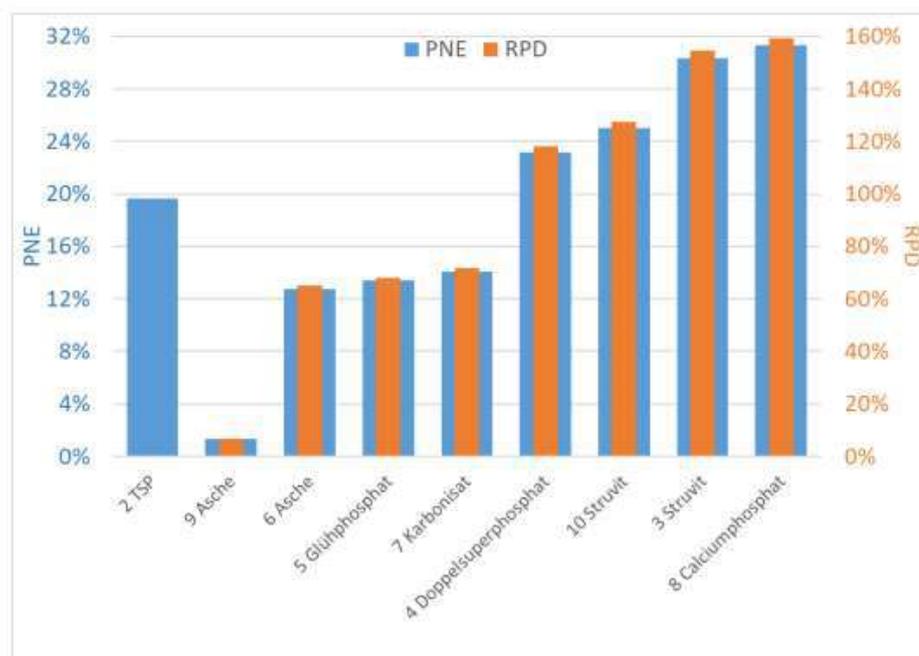


Abbildung 16: Nutzwirkungsgrad (PNE) und relative P-Düngerwirkungsgrad (RPD) der P-Rezyklate (Jacobi, Löber, Koch, & Schumann, 2022)

Deutlich wird in der Studie auch, dass die Wasserlöslichkeit des Phosphates gemäß der Vorgabe der DüMV für die Löslichkeit im Rezyklat keine Prognose über die Düngewirksamkeit zulässt. Der neutral-ammoniumcitratlösliche P-Anteil erlaubte eine gewisse Abschätzung der P-Düngewirksamkeit, allerdings mit einer deutlichen Streuung. Die Bewertung der Düngewirksamkeit von P-Rezyklaten aus Klärschlamm über die Nachweismethode der citratlöslichen Phosphorfraktionen zeigt ebenfalls nur eine eingeschränkte Korrelation. Der Nachweis der tatsächlichen pflanzenverfügbaren P-Fraktion über citratlöslichen Phosphor ist in der DüMV nicht berücksichtigt. Die Verfasser der Studie kommen zu dem Schluss, dass die beiden letzteren Methoden eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Rezyklate mittels der gleichen Extraktionsmethode zur Erfassung einer Tendenz ermöglichen, aber nicht für eine präzise Bewertung / Düngung ausreichen. Je nach Ansatzpunkt der Messung der Pflanzenverfügbarkeit der Rezyklate kommen unterschiedliche Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen. Das erklärt auch die teilweise stark auseinandergehenden Ergebnisse. Insgesamt lässt sich aus den aktuellen Untersuchungen jedoch festhalten, dass sowohl das Rezyklat aus dem HTC-Verfahren als auch Struvite in den meisten Untersuchungen eine gute Pflanzenverfügbarkeit aufweisen, auch wenn andere Studien zu dem Schluss kommen, dass diese leicht schlechter als TSP abschneiden.

Insgesamt lässt sich also festhalten, dass Fällungsprodukte aus Faulschlamm oder Zentrat (Struvit und andere Salze) eine gute Düngewirkung versprechen und sowohl Schwermetalle als auch organische Schadstoffe i.d.R. vernachlässigbar sind. Zwischenprodukte aus der Klärschlamm-Asche wie Phosphorsäure (H_3PO_4) sind vielseitig einsetzbar und weisen grundsätzlich ein hohes Marktpotenzial auf. Schwermetalle sind ebenfalls vernachlässigbar und organische Schadstoffe werden durch die Verbrennung vernichtet. Bei der Rückgewinnung aus Klärschlamm-Asche, bei der das anschließende Produkt die aufbereitete P-haltige Klärschlamm-Asche ist, wie dem AshDec-Verfahren, ist das Marktpotenzial unklar. Hinzu kommt eine vergleichsweise geringe P-Konzentration im Produkt. Schwermetalle

sind hier nicht vernachlässigbar und müssen berücksichtigt werden (Schwermetallgehalte im Klärschlamm). Organische Schadstoffe werden dagegen in der Verbrennung vernichtet (Kraus, et al., 2019).

Auch bei dem Klärschlammpyrolysat ist das Marktpotenzial unklar, insbesondere wegen der fehlenden Zulassung als Düngemittel. Darüber hinaus hängt die P-Düngewirkung stark von der Art und Weise der P-Fällung, den in der Pyrolyse herrschenden Temperaturen sowie der Verweilzeit innerhalb der pyrolytischen Behandlung ab. Allerdings werden in Zusammenhang mit Klärschlammpyrolysaten weitere Faktoren angeführt, wie (langfristige) Bodenverbesserung (Erhöhung der Wasserhaltekapazität, Bodenlockerung, Verringerung von Erosionsanfälligkeit und Nährstoffauswaschung, Verbesserung der Aktivität von Mikroorganismen im Boden). Auch die CO₂-Sequestrierung, die bisher kaum in der Diskussion um das P-Recycling von Klärschlamm betrachtet wird, ist hier ein relevanter Faktor. Schwermetalle sind bei Klärschlammpyrolysaten genauso wie beim AshDec-Verfahren grundsätzlich nicht vernachlässigbar und müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Organische Schadstoffe werden dagegen in der Verkohlung vernichtet (Kraus, et al., 2019). Sowohl beim AshDec-Verfahren als auch bei der Pyrolyse müssen bereits die Eingangsstoffe (Klärschlamm) die Vorgaben der Düngemittelverordnung erfüllen.

5 Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS)

Kommunales Abwasser setzt sich im übergeordneten Sinne aus dem gebrauchten Wasser aus Haushalten und Gewerbe (Schmutzwasser) und dem Niederschlagswasser (Regenwasser und Schmelzwasser) zusammen. Im konventionellen Abwassersystem wird dieses kommunale Abwasser in einem zentralen Entwässerungssystem abgeleitet und gemeinsam einer zentralen Behandlung in einer Kläranlage zugeführt. Dabei werden Schmutz- und Regenwasser entweder vermischt in einem Kanal (Mischsystem) oder in getrennten Kanälen (Trennsystem) abgeleitet. 97,12 % aller Haushalte in Deutschland sind flächendeckend an das öffentliche Kanalnetz angeschlossen¹⁴. Die Ableitung im Kanal folgt dabei größtenteils dem Prinzip einer Schwerkraftentwässerung im Rahmen einer Schwemmkanalisation (Londong, 2008), (UBA, 2019).

Dieses Prinzip der Siedlungsentwässerung erfüllt im Wesentlichen die Anforderung an Hygiene, Wasserabfluss und Reinigung vor der Einleitung in die Gewässer. Allerdings bringt der Ansatz einer zentralen Behandlung des häuslichen Schmutzwassers gemeinsam mit gewerblich-industriellen Abwasser und Niederschlagswasser auch verschiedene Probleme mit sich, die gerade in den letzten Jahren immer deutlicher werden. Zunächst handelt es sich um ein wenig flexibles System mit hoher Kapitalbindung. Gerade in Regionen mit sinkender Bevölkerungszahl kann die zentrale Wasserversorgung und Abwasserentsorgung zu großen Betriebsproblemen und hohen spezifischen Kosten führen. Hinzu kommen neue Herausforderungen hinsichtlich der Behandlung von Arzneimittelrückständen und Mikroverunreinigungen. Darüber hinaus erfordert die Schwemmkanalisation zum Teil erhebliche Mengen an Wasser, um die Feststoffe zu transportieren. Sinkt der Wasserverbrauch kann das dazu führen, dass Rückstände im Kanal zusätzlich gespült werden müssen, wofür oftmals Trinkwasser zum

¹⁴ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/165429/umfrage/anschlussgrad-an-die-oeffentliche-abwasserentsorgung-in-europa-2007/>

Einsatz kommt. Angesichts einer zunehmenden Verknappung des Trinkwassers stellt sich grundsätzlich die Frage, ob ein solcher Ansatz noch zukunftsfähig ist.

Darüber hinaus kommt es mit zunehmendem Alter des Kanalsystems vermehrt zu unerwünschten Leckagen durch die Schmutzwasseraustritt begünstigt wird. Dies führt zu Boden- und Grundwasserbelastungen. Aber auch umgekehrt tritt Fremdwasser in erheblichem Ausmaß (als unerwünschter Abfluss) in das Kanalsystem ein und fließt somit zusätzlich in die Kläranlage. Das relativ unbelastete Fremdwasser muss dort zusätzlich behandelt werden und führt dabei zu einer Mehrbelastung der Anlage (u.a. erhöhte hydraulischen Belastung, Reduzierung des Speichervolumens, verminderte Reinigungsleistung)¹⁵.

Ressourcenorientierte Sanitärsysteme als Alternative zum konventionellen System verfolgen einen anderen Ansatz. Ausgangsbasis ist die Trennung der Teilströme des häuslichen Abwassers in Grauwasser (häusliches Abwasser ohne Fäkalien, z.B. aus Duschen, Waschbecken, Waschmaschine etc.) und Schwarzwasser (Fäkalien mit Spülwasser). Das Schwarzwasser kann weiter unterteilt werden in Fäzes (Kot, feste menschliche Ausscheidungen), Urin (Urin, flüssige menschliche Ausscheidung) sowie (im Falle einer Spül- und Vakuumtoilette) Spül- und Regenwasser. Diese Teilströme werden separat erfasst und abgeleitet, um sie anschließend einer getrennten Behandlung zuzuführen.

Die Anwendung von ROSS verfolgt das Ziel einer möglichst ressourcenorientierten Behandlung des Abwassers in einem dezentralen Kontext. Dazu gehört die Nutzung oder Wiederverwertung von Stoff- und Wasserströmen sowie eine geeignete und möglichst ressourceneffiziente Erfassung, Ableitung und Behandlung der Teilströme. Im Vordergrund steht nicht der Entsorgungs- sondern der Kreislaufgedanke. Durch die Teilstromtrennung ist eine gezielte Behandlung und Rückgewinnung der Nährstoffe und im Abwasser enthaltenen Ressourcen möglich. In diesem Zusammenhang gibt verschiedene erprobten Verfahren (Stand der Technik). Eine Auflistung und Bewertung ist im DWA-Themenband Neuartige Sanitärsysteme zu finden (DWA, 2008) (Londong, 2008).

Aus den jeweiligen spezifisch zum Einsatz kommenden Verfahren ergeben sich mehrere Vorteile. Insgesamt besitzen solche Systeme durch den dezentralen Ansatz eine höhere Flexibilität, um sich an verändernde Rahmenbedingungen anzupassen. Gerade angesichts der aktuellen Entwicklungen (demografische Entwicklung, Klimawandel, steigende Rohstoffpreise und Wassermangel) gewinnen die ROSS in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung.

5.1 Ressourcenorientierte Sanitärsysteme und P-Recycling

Wie bereits angeführt besteht einer der Vorteile der ROSS in der getrennten Behandlung des anfallenden kommunalen Abwassers. Das hat zur Folge, dass die abwasserteilstromspezifischen Schadstoffe (z.B. organische Schadstoffe, Schwermetalle) nicht vermisch werden. Gleichzeitig werden die im häuslichen Abwasser anfallenden Nährstoffe nicht oder in erheblich geringeren Maßen verdünnt, als dies im konventionellen System der Fall ist.

¹⁵ https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Boden_Wasser_Luft_Laerm/Abwasser/Fremdwasser/fremdwasser_broschuere_11_2005.pdf (DWA, 2008)

Innerhalb des häuslichen Schmutzwassers entfällt der größte Teil des Phosphors auf den Urin mit etwa 1 g/(EW*d), gefolgt von Schwarzwasser mit 0,5 g/(EW*d) und Grauwasser mit 0,5 g/(EW*d), z.B. aus Wasch- oder Spülmitteln. In Bezug auf die Schwermetalle kommt nur ein Teil aus dem häuslichen Abwasser (z.B. Zn und Cu durch Hausinstallationen, Zn durch Ausscheidungen von Menschen) und je nach Schwermetall z.T. erhebliche Mengen aus anderen Quellen eingetragen (z.B. Industrieabwässern oder Abfluss von Straßen bei der Mischkanalisation). Durch die getrennte Erfassung könnte der Eintrag von Schwermetallen aus anderen Quellen teilweise erheblich reduziert werden.

Zur Rückgewinnung von Phosphor aus Urin und Fäzes gibt es eine Reihe von Ansätzen, wie beispielsweise die interaktive P-BANK der Universität Weimar (<https://www.uni-weimar.de/de/bauingenieurwesen/aktuell/news-aus-der-fakultaet/titel/phosphorus-donation-recycling-toilette-am-12-april-eingeweiht/>) oder die Gewinnung von Recyclingdüngern aus Trockentoiletteninhalten (<https://finizio.de/pilotanlage/>).

5.2 Aufbau des ROSS in SAmPSONS

Im Folgenden wird ein Ressourcenorientiertes Sanitärsystem (ROSS) einem konventionellen Abwasserreinigungssystem (KARS) gegenübergestellt. In diesem Szenario wird Grauwasser und Schwarzwasser getrennt abgeleitet. Der Transport des Schwarzwassers erfolgt mithilfe eines Unterdrucksystems und wird direkt einer Vergärung zugeführt. Die Schnittstelle zur Erfassung ist dabei eine Unterdrucktoilette, welche ein Vielfaches weniger Spülwasser als eine konventionelle Toilette benötigt. Das weniger stark belastete Grauwasser wird in einer spezifischen Grauwasseraufbereitungsanlage, hier der Nolde-Block, gereinigt und in ein Gewässer eingeleitet: Die Phosphor-Reinigungsleistung wurde auf Basis des SAmPSONS-Abschlussberichts im Vergleich zu den Default-Werten angepasst auf 80 %. Der Schlamm aus der Grauwasserreinigung wird anschließend ebenfalls der Vergärung zugeführt.

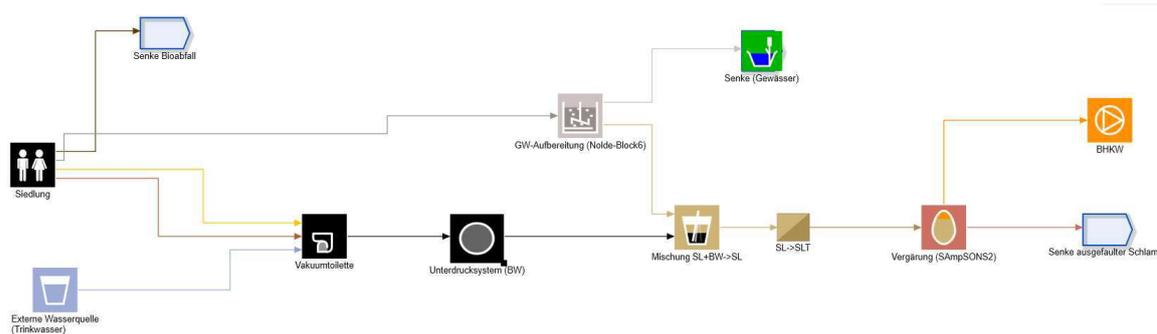


Abbildung 17: Aufbau der ROSS-Simulation in SAmPSONS.

Dem gegenüber steht ein konventionelles Abwassersystem mit einer Ableitung des gesamten Abwassers in eine Kläranlage, einer anschließenden Eindickung des Rohschlammes und dessen Vergärung.

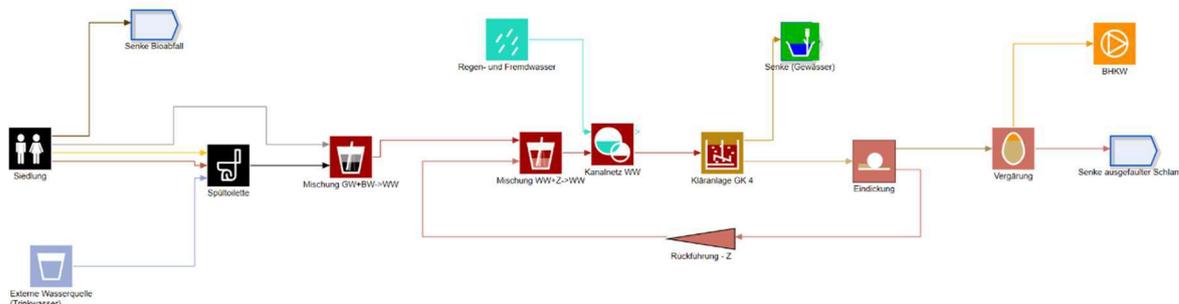


Abbildung 18: Aufbau der KARS-Simulation in SAMPSONS.

5.3 Ergebnisse des Vergleichs

Zunächst wurde die in den Senken verfügbare P-Fracht verglichen. Dabei zeigten sich nahezu identische Werte in beiden Szenarien, die mit etwa 34 t P/a beziffert werden können (Tabelle 2).

Tabelle 2: Ergebnisse des Vergleichs des ROSS mit dem konventionellen System

	Konventionelles System	ROSS
THG Gesamt [kg CO ₂ -eq/a]	2.129.666,39	1.488.887,50
THG Op [kg CO ₂ -eq/a]	1.947.803,66	1.301.037,39
THG Cap [kg CO ₂ -eq/a]	181.862,72	187.850,10
Phosphor (kg/a)	34.623,90	34.675,00

Der Anteil an theoretisch zurückgewinnbarem Phosphor liegt damit auf einem vergleichbaren Niveau in Bezug auf die Szenarien mit konventioneller P-Rückgewinnung. Das liegt daran, dass in diesem Vergleich noch kein P-Recyclingverfahren berücksichtigt ist.

Bezogen auf die THG-Emissionen liegen die Umweltwirkungen des konventionellen Abwasserreinigungssystem 40 % über denen des ROSS-Szenarios. Gründe dafür sind:

- Die direkten Lachgasemissionen liegen im ROSS-Szenario fast um ein Drittel unterhalb derer im konventionellen System. Emissionen fallen im konventionellen System insbesondere auf der Kläranlage an.
- Einem höheren Energieverbrauch im konventionellen System, wobei der Unterschied im Wesentlichen auf die Eindickung zurückzuführen ist. Der Energieverbrauch für die Grauwasserreinigung und die Kläranlage liegt ungefähr in der gleichen Größenordnung. Im Vergleich zu anderen Quellen wurden bei den in SAMPSONS hinterlegten Default-Werten ein hoher Wert für den Energiebedarf für die Grauwasserreinigung angenommen (Vergleich SAMPSONS-Abschlussbericht).

Die Gegenüberstellung mit den Szenarien 1 – 3 zeigt, dass die THG-Emissionen beim KARS- wie auch beim ROSS-Szenario deutlich niedriger liegen als in den beiden Szenarien 1 a und 1 b. Das lässt sich im Fall des KARS-Szenarios dadurch erklären, dass hier noch kein P-Recyclingverfahren

berücksichtigt ist. Die Differenz zu den Szenarien 1 a und 1 b entfällt somit auf die höheren Aufwendungen für die weitere Schlammbehandlung und das P-Recycling. Zudem ist im Gegensatz zu den Szenarien 1 – 3 in diesem Vergleich im KARS die Ableitung mittels Kanals berücksichtigt, um eine Vergleichbarkeit zur Unterdruckentwässerung im ROSS-System zu gewährleisten. Die Emissionen, die durch die Ableitung der Abwässer im Kanal entstehen, betragen 31.736 kg CO₂-eq/a. Bei der Betrachtung der Szenarien wurde dieser Teil des Abwassertransports nicht betrachtet. Bei analoger Betrachtung hinsichtlich des Kanals fällt die Differenz für die Aufwendungen der weiteren Schlammbehandlung und des P-Recyclings daher sogar noch geringfügig größer aus.

Bezogen auf den Vergleich mit den Szenarien 2 und 3 schneidet das konventionelle Szenario schlechter ab. Das ROSS-Szenario weist geringere THG-Emissionen auf als das Szenario 3 (HTC) aber schlechter als das Szenario 2 (Pyrolyse). Hier wird deutlich, welchen Einfluss die Gutschriften (gesteigerter Gasertrag, Kohlenstoffsenke) auf das Ergebnis haben, insbesondere die CO₂-Sequestrierung bei der Pyrolyse.

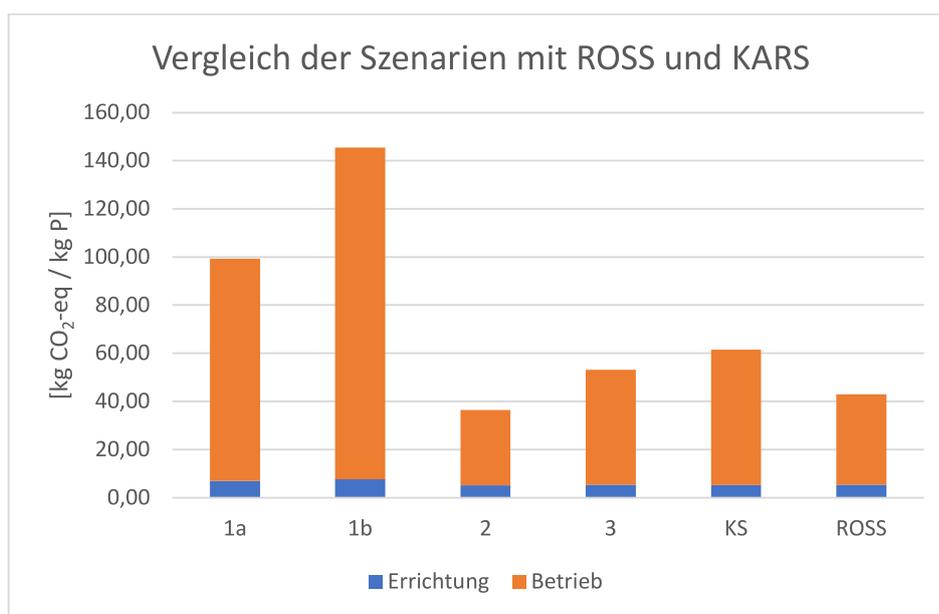


Abbildung 19: Vergleich der THG-Emissionen der betrachteten Szenarien erweitert um das Szenario ROSS und das konventionelle System (KARS).

6 Fazit

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Szenarien 1 – 3 zusammengefasst. Die Simulation in SAMPSONS zeigt die geringsten THG-Emissionen für das Szenario 2 (Pyrolyse mit 1.218.472 kg CO₂-eq / a). Das Szenario 3 (HTC) schneidet mit 1.781.593 kg CO₂-eq / a etwas schlechter ab. Deutlich schlechter schneiden die beiden Szenarien ab, die eine Monoverbrennung mit anschließendem P-Recycling beinhalten. Das Szenario 1 a (AshDec mit 2.866.719 kg CO₂-eq / a) liegt dabei noch vor dem Szenario 1 b (TetraPhos mit 3.897.686 kg CO₂-eq / a). In Bezug auf das Phosphorrückgewinnungspotenzial (in den Senken zur Verfügung stehender Phosphor) liegen die Szenarien 2 und 3 ebenfalls vor den Szenarien 1 a und 1 b. Alle Verfahren halten unter den getroffenen Annahmen jedoch die Vorgaben der AbfKlärV ein.

Im Vergleich zu den THG-Emissionen aus dem Betrieb spielen die THG-Emissionen für die Errichtung bzw. den Bau einer Technologie bei den Ergebnissen der Simulation nur eine untergeordnete Rolle (Anteil an Gesamtemissionen: Szenario 1 a: ca. 7%, Szenario 1 b: ca. 5%, Szenario 2: ca. 13%, Szenario 3: ca. 10%). Die Ausweisung der Umweltwirkungen, die mit der Errichtung einer Technologie verbunden sind, stellt eine Besonderheit in SAMPSONS dar. Oft werden diese Emissionen in vergleichbaren Studien nicht berechnet, da davon ausgegangen wird, dass sie im Vergleich zum Betrieb zu vernachlässigen sind. Der verhältnismäßig geringe Einfluss wird auch in der vorliegenden Untersuchung deutlich. Allerdings steigt die relative Relevanz dieser Emissionen, wenn die tatsächliche Auslastung unterhalb der installierten Kapazität liegt

Die größten Unterschiede zwischen den Szenarien 1 – 3 in Bezug auf die THG-Bilanzen entstehen in der Simulation mit SAMPSONS durch die Gutschriften (Wärme und Energie, Nebenprodukte) und Senken. Die größte Gutschrift in allen Szenarien ergibt sich aus der Energiegewinnung aus dem BHKW, wobei diese beim HTC-Szenario am höchsten ist (+15 % im Vergleich zu den anderen Szenarien). Die Gutschrift für die rückgewonnenen Nährstoffe bzw. Düngemittelgutschrift (vermiedene THG-Emissionen im Vergleich zur konventionellen Düngemittelproduktion) macht bei allen Verfahren nur einen sehr geringen Anteil aus, obwohl hier von einer maximalen Verfügbarkeit und somit Anrechenbarkeit ausgegangen wird. THG-Emissionen, die auf den Transport zurückzuführen sind, fallen ebenfalls kaum ins Gewicht.

Die Treiber der THG-Emissionen bei den Verfahren 1 a und b sind die zu entsorgende Asche und die Gutschrift für die Nebenprodukte. Ebenfalls hohe THG-Emissionen verursacht die Trocknung bei den Szenarien 1 a und b und dem Szenario 2. Diese entfallen bei Szenario 3. Die Vorteilhaftigkeit des Szenarios 2 hängt wesentlich davon ab, ob die Gutschrift für die CO₂-Sequestrierung tatsächlich erfolgen kann, da dies eine wesentliche Gutschrift im „PYREG“-Verfahren in der Simulation in SAMPSONS darstellt. Dafür ist eine Zulassung als Düngemittel erforderlich, die aktuell zwar in einigen EU-Mitgliedsstaaten besteht, nicht aber in Deutschland. Die ebenfalls guten Simulations-Ergebnisse des Szenario 3 (HTC-Verfahren) und dem damit verbundenen Vorteil gegenüber den Verfahren 1 a und b hängt ebenfalls stark davon ab, ob die Vergärung des Filtrats tatsächlich wie beschrieben integriert auf der Kläranlage erfolgen kann. Aus aktueller Sicht bestehen hier Zweifel und weiterer Forschungsbedarf. Verfahren der integrierten P-Rückgewinnung auf der Kläranlage wurden nicht in der Simulation, sondern anhand der Literatur betrachtet. Diese sind zwar in Bezug auf die THG-Bilanz i.d.R. vorteilhaft, beschränken sich aber meist auf Bio-P und erreichen P-Rückgewinnungsraten < 50 %. Verfahren der integrierten P-Rückgewinnung auf der Kläranlage, die auch für chem-P geeignet sind und höhere Rückgewinnungsraten erreichen, gehen mit einem erhöhten Einsatz von Säuren einher, was sich wiederum negativ auf die CO₂-Bilanz auswirkt.

BUND Naturschutz in Bayern e.V.

Analyse von Klimawirkungen unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren

Tabelle 3: Ergebnisse der Simulation mit SAmPSONS, Szenario 1 - 3.

Szenario Name			1a	1b	2	3
Bezugsgrößen			Mono+AshDec	Mono+TetraPhos	Pyrolyse	HTC mit SL-Rückführung
	P-Rückgewinnung	[kg/a]	28.858	26.800	33.500	33.503
	Einwohner	[EW]	50.000	50.000	50.000	50.000
THG	Errichtung/Bau	[kg CO2-eq/a]	201.726	202.907	168.802	179.594
	Betrieb	[kg CO2-eq/a]	2.664.993	3.694.961	1.049.670	1.601.999
	Total	[kg CO2-eq/a]	2.866.719	3.897.868	1.218.472	1.781.593
THG / EW	Errichtung/Bau	[kg C02-eq/a*EW]	4,03	4,06	3,38	3,59
	Betrieb	[kg C02-eq/a*EW]	57,33	77,96	24,37	35,63
	Total	[kg C02-eq/a*EW]	61,37	82,02	27,75	39,22
THG / kg (P)	Errichtung/Bau	[kg C02-eq/kg P]	6,99	7,57	5,04	5,36
	Betrieb	[kg C02-eq/kg P]	92,35	137,87	31,33	47,82
	Total	[kg C02-eq/kg P]	99,34	145,44	36,37	53,18

Tabelle 4: Ergebnisse der Simulation mit SAmPSONS, KARS und ROSS-Szenario

Szenario Name			KARS	ROSS
Bezugsgrößen			konventionelles System	
	P-Rückgewinnung	[kg/a]	34.624	34.675
	Einwohner	[EW]	50.000	50.000
THG	Errichtung/Bau	[kg CO2-eq/a]	181.863	187.850
	Betrieb	[kg CO2-eq/a]	1.947.804	1.301.037
	Total	[kg CO2-eq/a]	2.129.666	1.488.887
THG / EW	Errichtung/Bau	[kg C02-eq/a*EW]	3,64	3,76
	Betrieb	[kg C02-eq/a*EW]	38,96	26,02
	Total	[kg C02-eq/a*EW]	42,59	29,78
THG / kg (P)	Errichtung/Bau	[kg C02-eq/kg P]	5,25	5,42
	Betrieb	[kg C02-eq/kg P]	56,26	37,52
	Total	[kg C02-eq/kg P]	61,51	42,94

Im Vergleich zwischen dem KARS und dem ROSS schneidet das ROSS-Szenario in der SAmPSONS-Simulation in Bezug auf die THG-Emissionen (ROSS-Szenario besitzt nur 70 % THG-Emissionen in Bezug auf das KARS-Szenario) (Tabelle 4). Sowohl beim ROSS-Szenario als auch beim konventionellen Szenario endet die Betrachtung beim ausgefaulten Schlamm. Ob die in SAmPSONS ermittelte Vorteilhaftigkeit des ROSS-Szenarios gegenüber dem konventionellen Szenario bestehen bleibt, hängt somit davon ab, wie die weitere Schlammbehandlung und das nachgeschaltete P-Recyclingverfahren gestaltet werden. Insbesondere dann, wenn bei einem ROSS-System direkt ein Recyclingdünger zurückgewonnen wird, könnte sich somit ein signifikanter Vorteil bezogen auf die THG-Emissionen gegenüber der Rückgewinnung aus dem konventionellen Abwasserpfad ergeben. Zudem fallen i.d.R. nahezu keine Reststoffe an, was den Kreislaufgedanken unterstützt. Allerdings sind Recyclingdünger aus Schwarzwasser aktuell nicht als Düngemittel zugelassen. Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer Gründe, die für die ROSS-Systeme sprechen, beispielsweise die Flexibilität der Systeme oder die Einsparung von Trinkwasser und die Rückgewinnung von Brauchwasser. Auch das Thema Schwermetalle und Kontamination mit weiteren Schadstoffen spielt hier eine Rolle.

Im Gesamtvergleich aller Verfahren schneidet das ROSS-Szenario etwas besser ab, als das HTC-Szenario und etwas schlechter als das Pyrolyse-Szenario. Beide Szenarien, die eine Klärschlammmonoverbrennung mit anschließendem P-Recycling beinhalten, schneiden deutlich schlechter ab. Dies liegt bei der Simulation mit SAmPSONS allerdings nicht direkt an der Monoverbrennung oder den P-

Recyclingverfahren selbst, sondern lässt sich entweder auf hohe Emissionen durch die Beseitigung der anfallenden Reststoffe oder durch geringe Gutschriften erklären. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass in Bezug auf die THG-Bilanz eine ganzheitliche Betrachtung der gesamten Prozesskette und nicht nur der einzelnen Verfahren notwendig ist, so wie es derzeit häufig der Fall ist.

Aus Sicht des technischen Stands ist das PYREG-Verfahren derzeit am weitesten entwickelt mit einigen großtechnisch umgesetzten Anlagen zur Pyrolyse von Klärschlamm (aktuell in Deutschland: 4 Anlagen, zusätzlich nochmal 3 weitere Anlagen weltweit). Die Monoverbrennung ist ebenfalls eine etablierte und erprobte Technologie, dies gilt jedoch nicht für die potenziell zur Verfügung stehenden Verfahren zum nachgeschalteten P-Recycling aus Klärschlamm-Asche. Aktuell ist hierfür kein Verfahren großtechnisch in Betrieb. Die monoverbrannte Asche wird daher derzeit entweder deponiert, um gegebenenfalls einer späteren P-Rückgewinnung zur Verfügung zu stehen oder in Bergwerken entsorgt. Eine HTC-Anlage im großtechnischen Maßstab wird zurzeit in China betrieben.

Das Treibhausgaspotenzial der konventionellen Düngemittelproduktion liegt bei etwa 1,2 kg CO₂-eq / kg P₂O₅ (Kraus, et al., 2019). Bei einem Umrechnungsfaktor von P zu P₂O₅ von 2,29 ergeben sich daraus etwa 2,75 kg CO₂-eq / kg P (im Vergleich zu 36,73-145,44 kg CO₂-eq / P in der hier angefertigten Simulation). Hier wird deutlich, welchen Einfluss die Wahl der Systemgrenzen auf die Ergebnisse der THG-Bilanz hat. Kraus et al. (2019) betrachteten in ihrer Untersuchung nur die zusätzlichen Aufwendungen für das P-Recyclingverfahren und kamen damit auf ein nahezu neutrales Treibhausgaspotenzial für das AshDec und das TetraPhos-Verfahren im Vergleich zur konventionellen Düngemittelproduktion. Bei Betrachtung der gesamten Prozesskette wird jedoch deutlich, dass das Treibhausgaspotenzial deutlich höher liegt als bei der konventionellen Düngemittelproduktion.

BUND Naturschutz in Bayern e.V.

Analyse von Klimawirkungen unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren

Aufgestellt:

M.Sc. Imke Wißmann, Stefan Metz

Leonberg, Dezember 2022

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH



Dr.-Ing. Michael Probst



M.Sc. Imke Wißmann

Literaturverzeichnis

- Appell, T. (13. 10 2022). *Pyrolyse-Technologie üfr das Phosphorrecycling. Vortrag auf dem DPP-Forum am 13.10.2022 in Frankfurt am Main.* .
- Bertau, M., Fröhlich, P., Gellermann, C., Maurer, A., Vohrer, U., & Wendler, K. (2017). *Statuspapier Phosphatrückgewinnung, Statuspapier der ProcessNet-Fachgruppe "Rohstoffe"*.
- Blöhse, D. (2017). *Hydrothermale Karbonisierung - Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe.* . Essen: Dissertation .
- Dichtl, N., Könemann, R., Lehrmann, F., Schäfer, A., Schmelz, K.-G., Six, J., . . . Voss, E. (2020). *Stellungnahme aus dem DWA-Hauptausschuss KEK zum Artikel "Ökologischer Fußabdruck von Klärschlamm-Karbonisat und von Klärschlamm-Asche im Vergleich". KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2020 (67), Nr 4.*
- DWA. (2008). *Neuartige Sanitärsysteme.* (A. u.-3.-9.-3.-2. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Hrsg.)
- Heinrich, K., Lorenz, E., Hagemann, P., Kick, R., & Heinrich, S. (2020). *Ökologischer Fußabdruck von Klärschlamm-Karbonisat und von Klärschlamm-Asche im Vergleich. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2020 (67), Nr. 3, S. 185 - 193.*
- Ipiales, R., de la Rubia, M., Diaz, E., Mohedano, A., & Rodriguez, J. (35 2021). *Integration of Hydrothermal Carbonization and Anaerobic Digestion for Energy Recovery of Biomass Waste: An Overview. Energy Fuels, S. 17032 - 17050.*
- Jacobi, F., Löber, J., Koch, D., & Schumann, C. (2022). *P-Düngewirksamkeit von Klärschlamm-Rezyklaten, Abschlussbericht.* Hessisches Landeslabor, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen.
- Kassel Wasser, TransMIT. (2021). *Machbarkeitsstudie Klärschlammverwertung und Phosphorrecycling für die Region Nord-Ost-Hessen (RePhoNOH), Endbericht.* . Gefördert mit Mitteln des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. .
- Kraus, F., Zamzow, M., Conzelmann, L., Remy, C., Kleyböcker, A., Seis, W., . . . Kabbe, C. (2019). *Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Abschlussbericht.* Im Auftrag des Umweltbundesamts (Hrsg.), Forschungskennzahl 3716 31 330 0. .
- Londong, J. (2008). *Zukunftsperspektiven Neuartiger Sanitärsysteme. Conference Paper: 2. Aachener Kongress Dezentrale Infrastruktur (Wasser Abwasser Band 215).* Aachen. Abgerufen am 02. 12 2022 von https://www.researchgate.net/publication/330468695_Zukunftsperspektiven_Neuartiger_Sanitärsysteme

- Medina-Martos, E., Istrate, I., Villamil, J., Gálvez-Martos, J., Dufour, J., & Moedano, A. (2020). Techno-Economic and Life Cycle Assessment of an Integrated Hydrothermal Carbonization System for Sewage Sludge. *Cleaner Prod.*, S. 277.
- Quicker, P., & Weber, K. (Hrsg.). (2016). *Biokohle*. Springer Verlag. doi:10.1007/978-3-658-03689-8
- Remy, C., & Stüber, J. (2015). *Weiterentwicklung des Klima- und Ressourceneffizienzpotentials durch HTC-Behandlung ausgewählter Berliner Klärschlämme - HTC-Berlin*. . Berlin: Abschlussbericht im Rahmen des Projektes 11443UEPII/2, gefördert vom Berliner Umweltentlastungsprogramm (UEP).
- Tahir Khan, M., Huelsemann, B., Krümpel, J., Wüst, D., Oechsner, H., & Lemmer, A. (8 2022). Biochemical Methane Potential of a Biorefinery's Process Wastewater and its Components at Different Concentrations and Temperatures. *Fermentation*.
- Tahir Khan, M., Krümpel, J., Wüst, D., & Lemmer, A. (9 2021). Anaerobic Degradation of Individual Components from 5-Hydroxymethylfurfural Process-Wastewater in Continuously Operated Fixed Bed Reactors. *Processes*, S. 677.
- Theilen, U., Eichenauer, S., Schwenk, H., & Luthardt-Behle, T. (2021). *Mitbehandlung von Abwasser aus der Hydrothermalen Carbonisierung von Klärschlamm in einer Laborkläranlage*. . Gießen: Kompetenzzentrum für nachhaltiges Engineering und UmweltSysteme, Technische Hochschule Mittelhessen im Auftrag der TerraNova Energy GmbH.
- UBA. (17. 10 2019). *Abwasser*. Von Umweltbundesamt:
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/abwasser> abgerufen
- Wagner, J., Richter, R., Struck, K., & Dinslage, R. (2020). *Statusbericht zur Klärschlamm entsorgung 2020 aus der kommunalen Abwasserbehandlung im Freistaat Sachsen*. LFULG - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel. (kein Datum). Klärschlamm - vom wertvollen Energierohstoff zum Düngemittel. Abgerufen am 11 2022 von
<https://docplayer.org/41832025-Klaeranlage-linz-unkel.html>

Anlagen

Anlage 1: Zusammenfassung der im Bericht verwendeten Phosphor-Recycling Verfahren

Anlage 2a: Aufbau des AshDec-Szenarios in SAmpSONS

Anlage 2b: Aufbau des TetraPhos-Szenarios in SAmpSONS

Anlage 2c: Aufbau des Szenarios 2 Klärschlammpyrolyse in SAmpSONS

Anlage 2d: Aufbau des Szenarios 3 Hydrothermale Karbonisierung in SAmpSONS

Anlage 3: Datensteckbriefe der in SAmpSONS verwendeten Technologien (anzufordern bei den AutorInnen des Berichts)

Anlage 4: Simulationsdateien der untersuchten Szenarien (anzufordern bei den AutorInnen des Berichts)

BUND Naturschutz in Bayern e.V.

Analyse von Klimawirkungen unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren

Anlage 1: Zusammenfassung der im Bericht verwendeten Phosphor-Recycling Verfahren

Catalogue of phosphorus recycling technologies (ESPP) regarding TetraPhos, AshDec, Pyreg and Terra Nova (<https://www.phosphorusplatform.eu/activities/p-recovery-technology-inventory>)

Process	Input materials	Output products	Operating status
TetraPhos (Remondis)	Sewage sludge incineration ash, from sewage works using biological and/or chemical P-removal.	<ul style="list-style-type: none"> - Phosphoric acid - Gypsum - Iron and aluminium salts - Mineral ash residues 	<p>Pilot plant: Hamburg, Germany and Elverlingsen, Germany, 50 kg/h ash</p> <p>Full scale: Hamburg, Germany (commissioning underway 2022), 20.000 t/y ash</p> <p>Other full scale plants in project phase in Kiel, Lünen (Germany) and Merdijk (Netherlands)</p>
AshDec	All ashes with P-content > 7%	Modified Rhenania Phosphate (Calcium-Sodium-Phosphate) P _{nac} solubility >80%; granular material with P ₂ O ₅ content of 15-25% (depending on input-ash); no organic matter; product is blendable with all other fertilising products.	Pilot plant (300 kg/h) operational for several years, Leoben, Austria. Continuous operating campaigns produced several hundred tons of product. A full scale plant (30 000 t/y ash input) is planned in Altenstadt (Bavaria), with Enter GmbH and sePura GmbH, in the R-Rhenalia RePhoR project.
Pyreg	Sewage sludge (minimum calorific value 10 MJ/kg, that is around 80% DS). Biomass materials.	<p>Output biochar, from sewage sludge as input, has (as % of DM, and depending on the input sludge characteristics): c. 25% (15 - 35%) organic carbon,- 6 - 7% P content (of which c. 80% is NAC-soluble),- just over 1% N</p> <p>- more than 10% K.</p> <p>Pyreg biochar (from sewage sludge) registered as a fertiliser in Sweden (PYREGphos). However, sewage sludge biochar is not included in EU Fertilising Products Regulation CMC14.</p>	<p>Nearly 50 full scale units in operation today, of which 7 using sewage sludge (below:tonnage = input capacity):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Unkel, Germany (1200 tDS/y, since 2015) - Homburg, Germany (1200 tDS/y, since 2016) - Redwood, California (1200 tDS/y, since 2016) - Hammenhög, Sweden (1200 tDS/y, since 2016) - Trutnov, Czech Republic (1.200t DS/y, since 2020) - Lorsbach, Germany (1.500 t DS/y, since 2021) - Kleve, Germany (1.600 t DS/y, in commissioning) <p>Also: Basel, Switzerland (11 000 t DS/y food waste) and three further plants using sewage sludge under construction in the USA.</p>

BUND Naturschutz in Bayern e.V.

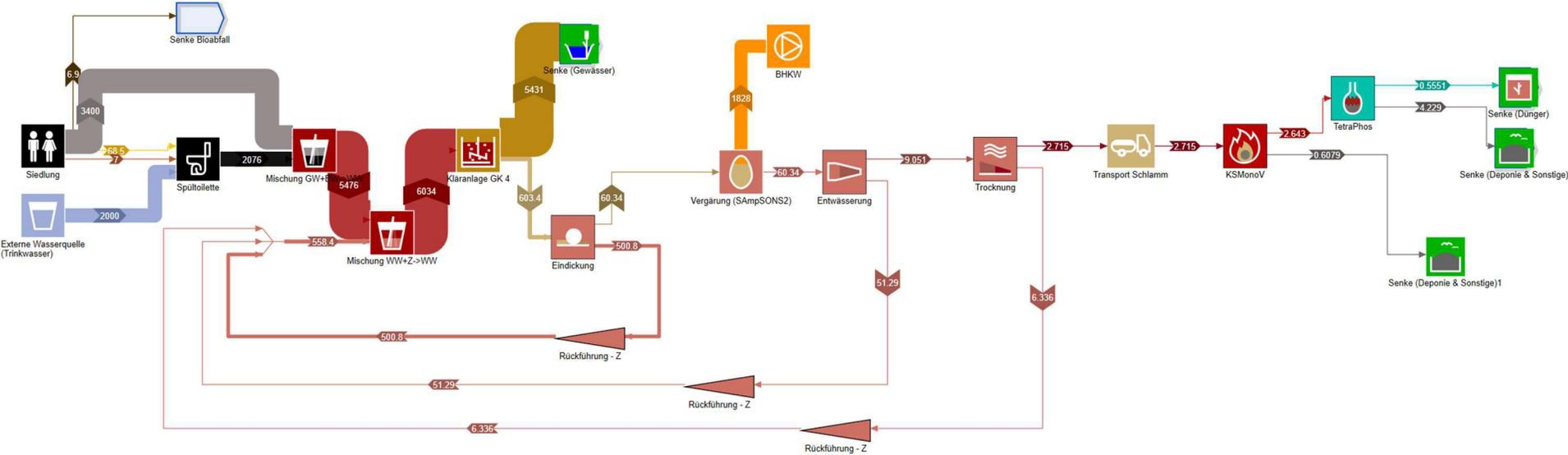
Analyse von Klimawirkungen unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren

Terra Nova (HTC)	Input: raw or digested sludge after dewatering, Bio- & Chem-P, Mass balance of iron and aluminium in input sludge: pending.	Calcium phosphate salt	Full scale plant operating on dewatered sewage sludge in China (since 2016) input capacity 2 t/h Demonstration plant at Ruhrverband/Duisburg Germany, input capacity 250 kg/h.
-------------------------	---	------------------------	--

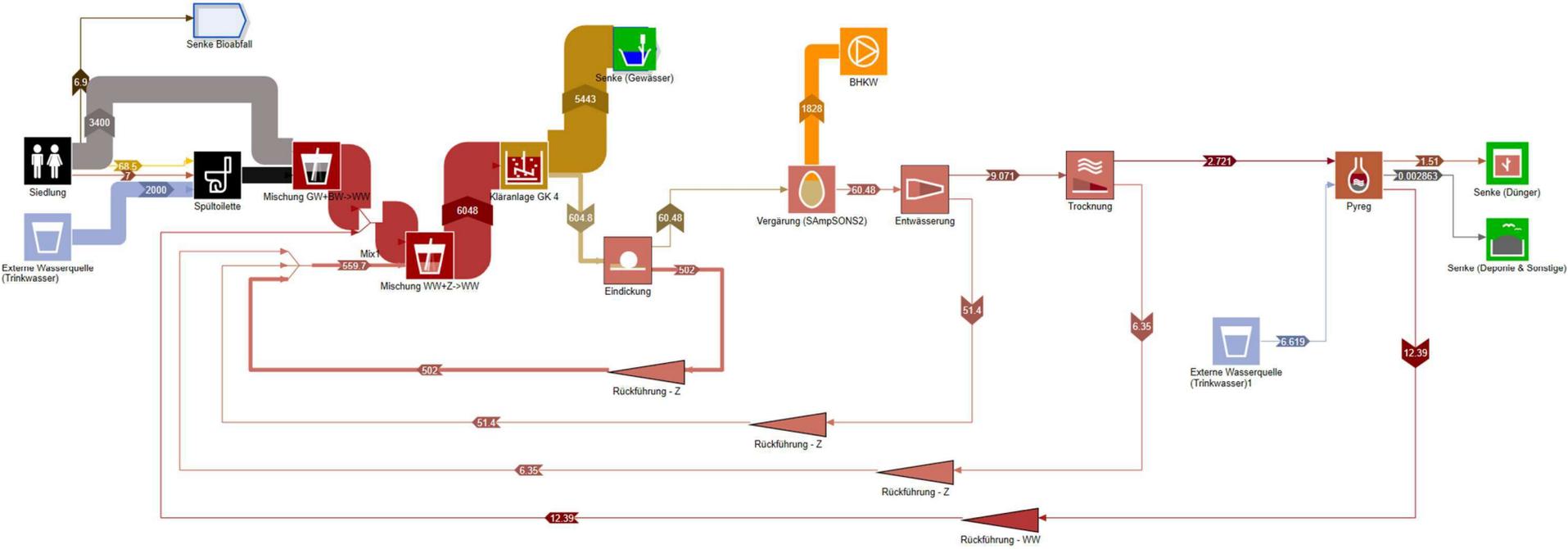
BUND Naturschutz in Bayern e.V.

Analyse von Klimawirkungen unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren

Anlage 2b: Aufbau des TetraPhos-Szenarios in SAmPSONS



Anlage 2c: Aufbau des Szenarios 2 Klärschlammpyrolyse in SAMPSONS



BUND Naturschutz in Bayern e.V.

Analyse von Klimawirkungen unterschiedlicher Klärschlammbehandlungsverfahren

Anlage 2d: Aufbau des Szenarios 3 Hydrothermale Karbonisierung in SAmPSONS

