

Schließen globaler Nährstoffkreisläufe durch  
Weiterentwicklung der Recyclingdünger AshDec  
und Struvit zu Düngern der nächsten  
Generation (CLOOP)

Schlussbericht, Berlin den 31.10.2021

von

Fabian Kraus, Lea Conzelmann

Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH, Ciceronstr. 24, 10709 Berlin

Förderkennzeichen: 031 B 0477B  
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2017 – 30.04.2021

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031 B 0477B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



## **Important Legal Notice**

**Disclaimer:** The information in this publication was considered technically sound by the consensus of persons engaged in the development and approval of the document at the time it was developed. KWB disclaims liability to the full extent for any personal injury, property, or other damages of any nature whatsoever, whether special, indirect, consequential, or compensatory, directly or indirectly resulting from the publication, use of application, or reliance on this document. KWB disclaims and makes no guaranty or warranty, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of any information published herein. It is expressly pointed out that the information and results given in this publication may be out of date due to subsequent modifications. In addition, KWB disclaims and makes no warranty that the information in this document will fulfil any of your particular purposes or needs. The disclaimer on hand neither seeks to restrict nor to exclude KWB's liability against all relevant national statutory provisions.

## **Wichtiger rechtlicher Hinweis**

**Haftungsausschluss:** Die in dieser Publikation bereitgestellte Information wurde zum Zeitpunkt der Erstellung im Konsens mit den bei Entwicklung und Anfertigung des Dokumentes beteiligten Personen als technisch einwandfrei befunden. KWB schließt vollumfänglich die Haftung für jegliche Personen-, Sach- oder sonstige Schäden aus, ungeachtet ob diese speziell, indirekt, nachfolgend oder kompensatorisch, mittelbar oder unmittelbar sind oder direkt oder indirekt von dieser Publikation, einer Anwendung oder dem Vertrauen in dieses Dokument herrühren. KWB übernimmt keine Garantie und macht keine Zusicherungen ausdrücklicher oder stillschweigender Art bezüglich der Richtigkeit oder Vollständigkeit jeglicher Information hierin. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die in der Publikation gegebenen Informationen und Ergebnisse aufgrund nachfolgender Änderungen nicht mehr aktuell sein können. Weiterhin lehnt KWB die Haftung ab und übernimmt keine Garantie, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen der Erfüllung Ihrer besonderen Zwecke oder Ansprüche dienlich sind. Mit der vorliegenden Haftungsausschlussklausel wird weder bezweckt, die Haftung der KWB entgegen den einschlägigen nationalen Rechtsvorschriften einzuschränken noch sie in Fällen auszuschließen, in denen ein Ausschluss nach diesen Rechtsvorschriften nicht möglich ist.

# Impressum

Dieser Bericht wurde nach den Vorgaben des Qualitätsmanagements gemäß DIN EN ISO 9001:2015 erarbeitet.

## **Titel**

Schließen globaler Nährstoffkreisläufe durch Weiterentwicklung der Recyclingdünger AshDec und Struvit zu Düngern der nächsten Generation

Schlussbericht, Berlin den 31.10.2021

## **Autoren**

Fabian Kraus, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Lea Conzelmann, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

## **Review/Qualitätssicherung**

Johannes Koslowski, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Endversion

Datum:

Version	Veranlassung Erstellung/Änderung	Ausgeführt durch
v1.0	Erstellung der Endversion	Fabian Kraus

# Inhaltverzeichnis

I.	Kurze Darstellung .....	5
I.1.	Aufgabenstellung.....	5
I.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	5
I.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
I.4.	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	7
I.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
II.	Eingehende Darstellung .....	8
II.1.	Verwendung der Zuwendung im Einzelnen und erzielte Resultate .....	8
II.1.1.	Verwendung der Zuwendung .....	8
II.1.2.	Resultate des Forschungsvorhabens .....	8
II.1.2.1.	Definition von Rohmaterialien und Düngern .....	8
II.1.2.2.	Möglichkeiten der Verbesserung von Rohmaterialien.....	9
II.1.2.3.	Experimentelle Untersuchungen zur Chemie der NextGen-Dünger .....	10
II.1.2.4.	AshDec Ökobilanz .....	13
II.1.2.5.	N-Struvit Ökobilanz .....	19
II.1.2.6.	K-Struvit Ökobilanz .....	25
II.1.2.7.	Schlussfolgerungen.....	28
II.2.	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	29
II.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	29
II.4.	Darstellung des voraussichtlichen Nutzens.....	29
II.5.	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	30
II.6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	30
III.	Erfolgskontrollbericht.....	31
III.1.	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen .....	31
III.2.	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	31
III.3.	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	32
III.4.	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben .....	35
III.5.	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer.....	35
III.6.	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung .....	35
IV.	Kurzfassung (Berichtsblatt) .....	36
Literatur	.....	38

## **I. Kurze Darstellung**

### **I.1. Aufgabenstellung**

Das Projekt „CLOOP – Closing the global nutrient loop“ setzte sich die Ambition die Nährstoffkreisläufe durch Weiterentwicklung, Erforschung und Verbesserung der Recyclingdünger aus dem AshDec-Verfahren und Struvit aus Fällungsverfahren zu schließen. Das Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB) war in diesem Verbundprojekt – durch das Teilprojekt B – in verschiedene Frage- und Aufgabenstellungen eingebunden. Zu diesen zählen:

- Die Definition von Kriterien hinsichtlich der Produktion und Charakteristika bezüglich der landwirtschaftlichen Anwendung von sogenannten Düngern der nächsten Generation
- Experimentelle Untersuchungen zur Chemie der Dünger der nächsten Generation und die Ableitung von Rückschlüssen auf deren Wirkung in der landwirtschaftlichen Anwendung
- Die ganzheitliche ökologische Bewertung von Produktion und Anwendung der Dünger der nächsten Generation im Vergleich zu konventionellen Düngemitteln mit der Methode der Ökobilanz

### **I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Vorhaben „CLOOP – Closing the global nutrient loop“ wurde im Rahmen der BMBF-Förderinitiative "Bioökonomie International" durchgeführt.

### **I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt „CLOOP – Closing the global nutrient loop“ startete zum 01.11.2017. Ein Auftakt-Treffen (Kick-off) der Deutschen Partner fand am 24.11.2017 in Oberursel beim Partner Outotec statt. Im Kalenderjahr 2017 wurde mit der Identifikation potentieller Rezyklate, welche als Dünger der nächsten Generation in Frage kommen, begonnen und die Beschaffung der beiden Rezyklate N-Struvit und Hazenit (NaK-Struvit) aus Kläranlagen für Topfversuche wurde geklärt.

Im Kalenderjahr 2018 wurden den ausländischen Partnern ebenfalls die Rezyklate N-Struvit und Hazenit zur Verfügung gestellt. Zudem führte das KWB Hintergrundrecherchen zur konventionellen Düngemittelproduktion, sowie den Anteilen der P-Düngern und den Matrix- und Schwermetallgehalten verschiedener Rezyklate durch. Es wurden Definitionen und Kriterien für die Produktion und Anwendung der Dünger der nächsten Generation formuliert, wobei bei der Düngemittelanwendung verstärkt Nährstoffverluste bei der Düngung thematisiert wurden. Auch die Herstellung eines NP-Düngers durch Mischung mit Stickstoffkomponenten und deren Auswirkungen auf den Produktionspreis wurden diskutiert. Hinsichtlich des Stoffstrommanagements in Kläranlagen im Hinblick auf eine spätere P-Düngemittelproduktion aus Klärschlammaschen betrachtete das KWB drei potentielle Möglichkeiten (Optimierung der Sandfänge/Silikat-Reduktion, Ausweitung der Bio-P/Fällmittel-Reduktion, sowie Trennung der Schlammlinien). Für die Ökobilanzen wurden erste Ziel und Untersuchungsrahmen definiert. Ein Projekttreffen der deutschen Partner fand zur Jahresmitte am 29.06.2018 in Bonn beim Partner Universität Bonn statt. Ein weiteres Projekttreffen mit allen (auch

internationalen Partnern) fand gegen Jahresende im Zuge des CLOOP-Workshops am 14.-19.12.2018 in Heron Island (Australien) beim Partner University of Queensland statt.

Im Kalenderjahr 2019 stand die Ökobilanzierung des AshDec-Verfahrens im Vordergrund. Hierzu wurden mit den Partnern Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und Outotec verschiedene Betriebsweisen abgestimmt und je Betriebsweise eine Sachbilanz erarbeitet. Da verschiedene Additive ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) je nach Betriebsweise nötig sind und diese zu unterschiedlichen Emissionen entlang ihrer Produktionskette und der Anwendung im Drehrohren führen, wurden die Vorketten dieser Salze (d.h. das Solvay-Verfahren, das Mannheimer-Verfahren, sowie der zu Grunde liegende technische Kalkkreislauf) vertiefend betrachtet. Anschließend wurde die Wirkungsabschätzung für das AshDec-Verfahren ermittelt und die Ergebnisse interpretiert. Ebenfalls wurden im Jahr 2019 bereits für relevante Produktionsmöglichkeiten innerhalb der Kläranlage für N-Struvit identifiziert und eine Sachbilanz aufgestellt. Zudem wurden N-Struvit und Hazenit für die Feldversuche der internationalen Partner bereitgestellt. Ein weiteres Projekttreffen der deutschen Partner fand im Frühjahr am 11.-12.04.2019 in Berlin beim KWB statt. Zudem fand ein Projekttreffen mit allen (auch internationalen Partnern) fand im Herbst im Zuge des CLOOP-Workshops am 21.-23.10.2019 in Berlin beim Partner BAM statt. Mit Blick auf die geplanten praktischen Versuche im Jahr 2020 wurde eine kostenneutrale Mittelumwidmung beantragt, welche genehmigt wurde.

Im Kalenderjahr 2020 wurde an den Ökobilanzierungen für N-Struvit weitergearbeitet. Auch hier wurden die Vorketten der Magnesiumsalzbereitstellung zur Struvitfällung im Rahmen der Sachbilanz verstärkt betrachtet. Für die N-Struvit Ökobilanzierung wurden im Jahr 2020 ebenso die Wirkungsabschätzung ermittelt und die Ergebnisse interpretiert. Hinsichtlich der Ökobilanzierung des Hazenit-Düngers konnten durch den Produzenten keine Daten zur Verfügung gestellt werden, allerdings konnten ersatzweise Daten für die K-Struvit Herstellung eines anderen Verfahrensanbieters bereitgestellt werden. Zudem fanden im Jahr 2020 die praktischen Versuche zur chemischen Wirkweise der Recyclingdünger im Vergleich mit konventionellen Düngemitteln statt. Im Zuge der COVID19-Pandemie verzögerten sich die praktischen Versuche, da anfänglich der Laborzugang eingeschränkt wurde und die praktischen Experimente vorläufig abgebrochen und erst im Spätsommer wieder aufgenommen wurden. Aufgrund dieser Verzögerungen und der verspäteten Bereitstellung der Daten für die K-Struvit Herstellung wurde im Jahr 2020 eine kostenneutrale Projektverlängerung beantragt und anschließend genehmigt. Ein Projekttreffen fand zwischen den deutschen Partnern aufgrund der COVID19-Pandemie lediglich am 19.05.2020 als Online-Meeting statt. Die geplante Dienstreise nach Brasilien konnte aufgrund der Pandemie nicht stattfinden.

Im Kalenderjahr 2021 wurde die restlichen Arbeiten – die abschließende Auswertung der praktischen Versuche, sowie die Ökobilanzierung der K-Struvit Herstellung durchgeführt. Am 20.04.2021 fand das finale Projektabschlussmeeting mit allen Partnern als Online-Veranstaltung statt. Das Projekt wurde planmäßig zum 30.04.2021 beendet. Anschließend wurde dieser Abschlussbericht erstellt.

#### **I.4. Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand**

Das KWB konnte für die anstehenden Aufgaben an bereits vor dem Projekt vorliegende Erfahrung anknüpfen:

- Eine umfangreiche Studie „Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung“, welche das KWB im Jahr 2019 für das Umweltbundesamt erstellte [1]
- Eine Studie „Einsatzmöglichkeiten für Nährstoffzyklate im Ökolandbau“, welche das KWB im Jahr 2019 gemeinsam mit Bioland Beratung GmbH und dem Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte (IASP) im Rahmen eines Projektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) erstellte [2]
- Zahlreiche weitere nationale und europäische Projekte und Initiativen im Bereich Klärschlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung und –recycling

#### **I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Verbundvorhaben wurde gemeinsam mit den Partnern Outotec (Koordinator), BAM und Universität Bonn durchgeführt. Als ausländische Partner waren die University of Queensland (Australien) und die Universität São Paulo eingebunden.

Zur Düngemittelbeschaffung (Struvit, Hazenit) wurde mit den Firmen Ostara, Soepenbergl und Nuresys kooperiert. Die Daten zur Ökobilanzierung der Herstellung von K-Struvit wurden ebenfalls durch die Firma Nuresys bereitgestellt. Zudem wurde mit dem Fachgebiet Bodenkunde der TU Berlin eine praktische Masterarbeit zu Vergleichenden Laborexperimenten zur Löslichkeit und Fixierung von Phosphat aus konventionellen und neuartigen Phosphatdüngern in Böden durchgeführt. Für die Durchführung der praktischen Versuche in den Laboren der TU Berlin wurde mit dem Fachgebiet Bodenkunde der TU Berlin ein Kooperationsvertrag geschlossen.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1. Verwendung der Zuwendung im Einzelnen und erzielte Resultate**

#### **II.1.1. Verwendung der Zuwendung**

Die Zuwendungen wurden am KWB insbesondere für Personalmittel verwendet. Dabei wurden die Arbeitstage grob wie folgt eingesetzt:

- 10 % für die administrative Projektsteuerung, Koordination der Absprachen mit den Partnern und die Betreuung von Studierenden (AP1)
- 20 % für Hintergrundrecherchen mit Blick auf die Definition, Produktion, Verbesserung von Düngern der nächsten Generation inklusive der Bereitstellung der Dünger (AP2 und AP3)
- 70 % für die Aggregation der Sachbilanzdaten und Durchführung der Ökobilanz, sowie Interpretation der praktischen Experimente zur Wirkweise der Dünger (AP5)

Weitere Personalkosten fielen für Beschäftigungsentgelte (zeitlich befristet beschäftigte Studierende) an. Sachkosten fielen in Form von Verbrauchsmaterial fielen vorwiegend für Laborbedarf (Durchführung der Versuche an der TU Berlin), für die Lizenzen der Umberto LCA Software für die Ökobilanzierung und in Form von Reisemitteln an.

#### **II.1.2. Resultate des Forschungsvorhabens**

##### **II.1.2.1. Definition von Rohmaterialien und Düngern**

Als Rohmaterialien für die Düngerproduktion werden bezüglich der P-Komponente Stoffe verstanden, welche aus Klärschlamm bzw. Abwasser gewonnen werden: dies sind z.B. Klärschlammasche oder Salze aus Fällungsverfahren wie Struvit oder Hazenit. Letztere weisen teilweise einen Produktstatus auf, d. h. sie werden gegen Erlöse abgegeben bzw. verkauft. Zudem können diese Stoffe im juristischen Sinne keinerlei Abfalleigenschaften mehr aufweisen. Klärschlammasche hingegen ist rechtlich Abfall und der Erzeuger muss für die Entsorgung aufkommen (d. h. es entstehen Kosten bei der Abgabe an Dritte und keinerlei Erlöse wie bei den Salzen der Fällungsverfahren). Die Fällungssalze weisen hohe Nährstoffgehalte (kumuliert über 30 %) und sehr geringe Schwermetallkontaminationen auf. Klärschlammasche aus einer rein kommunalen Klärschlammmonoverbrennung weist etwa 20 % Phosphat und 10 % Calcium und Silizium auf. Je nach Art der Phosphatelimination ist mit erheblichen Eisengehalten zu rechnen, was sich negativ auf die Weiterverarbeitung auswirken kann. Zudem hat Klärschlammasche vergleichsweise hohe Kontaminationsgrade an Schwermetallen, insbesondere Kupfer und Zink.

Hinsichtlich der Anforderungen an Dünger der nächsten Generation ist es zunächst essentiell die Effizienz konventioneller Dünger zu betrachten um eine klare Unterscheidung zwischen konventionellem Dünger und Dünger der nächsten Generation herzustellen zu können. Hierbei sind zwei Interessensgebiete zu unterscheiden, einerseits die Düngerproduktion und andererseits die Düngemittelanwendung.



- **Düngemittelproduktion:** Konventionelles Phosphat und Kalium werden in einen offenen Tagebau bzw. im Untertagebau abgebaut. Das Gestein wird meist mit Schwefelsäure zu Phosphorsäure aufgeschlossen, wobei ein relevanter Abfallstrom – der Phosphorgips – entsteht (etwa 5 t Gips pro 1 t Phosphorsäure). Im Falle von Kalium werden bei der Aufreinigung chloridhaltige Abwässer produziert. Bezüglich der Stickstoff-Dünger entstehen keine größeren Abfälle, jedoch ist für den Grundstoff der Stickstoff-Industrie, den Ammoniak, Wasserstoff erforderlich. Wasserstoff wird entweder aus der Dampfreformierung von Erdgas oder aus der partiellen Oxidation von Schweröl hergestellt, sodass je nach eingesetztem fossilem Brennstoff bei der Ammoniak-Herstellung zwischen 1 und 3 kg CO<sub>2</sub> pro kg NH<sub>3</sub> emittiert werden. Sofern eine Schonung fossiler Rohstoffe und damit eine Verminderung von Treibhausgasemission erwünscht ist, könnte eine energieeffiziente Kreislaufwirtschaft für Nährstoffe anzustreben sein. Somit sollte produktionsseitig für einen Dünger der nächsten Generation folgendes gewährleistet werden: **Dünger der nächsten Generation sollten weitestgehend aus energieeffizient recycelten Nährstoffen zusammengesetzt sein und treibhausgasneutral produziert werden können.**
- **Düngemittelanwendung:** Bei der Düngemittelanwendung stehen bei konventionellen Düngemitteln neben der teils bescheidenen Nutzungseffizienz von 15-30 % für Stickstoff-Dünger und 15-40 % für Phosphat-Dünger [3], für die Umwelt nachteilige Emissionen in die Luft und in das Wasser im Fokus. Naturgemäß sind die Ammoniakemissionen bei Ammonsulfat (geringe kovalente Bindung zwischen Ammonium und Sulfat) und bei Harnstoff (Urease) vergleichsweise hoch. Nitrathaltige Dünger wie Ammoniumnitrat und Kalkammonsalpeter weisen deutlich geringere Ammoniakemissionen pro kg N auf. Die Lachgasemissionen (vorwiegend der Denitrifikationen zuzurechnen) sind bei allen Stickstoffdüngern ähnlich. Hinsichtlich der Kohlendioxid-Emissionen sind beim Kalkammonsalpeter CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem im Karbonat und bei Harnstoff wiederum Emissionen bei der Urease relevant. Hinsichtlich der Wasseremissionen gibt es keine düngerspezifischen Emissionen, sondern nur allgemeine Richtwerte für N- bzw. P-Dünger. Für Dünger der nächsten Generation gilt hinsichtlich der Düngemittelanwendung: **Dünger der nächsten Generation sollte eine höhere Nutzungseffizienz und geringere Emissionen als konventionelle Dünger aufweisen. Das könnte auch bedeuten, dass bei geringeren Düngemengen und somit einem geringeren Umweltimpact gegenüber konventionellen Düngern der gleiche Ertrag erzielt werden sollte.**

#### II.1.2.2. Möglichkeiten der Verbesserung von Rohmaterialien

Es wurden verschiedene Maßnahmen in der Kläranlage identifiziert, welche die Rezyklatqualitäten bzw. die Rohmaterialien positiv beeinflussen. Drei Maßnahmen wurden eingehend diskutiert:

##### Option 1: Optimierung der Sandfänge mit dem Ziel der Reduktion von Silikat und gleichzeitiger Erhöhung des P-Gehaltes in der Asche

Der Sandfang wird im Allgemeinen in der Form eines kombinierten (z.T. belüfteten) Sand- und Fettfangs ausgeführt. Eine neu entwickelte Konstruktion zur Optimierung der Sandfang ist eine Unterteilung des Bauwerks in zwei einzelne, voneinander getrennte Kammern, so dass die Prozesse

der Sedimentation und der Flotation ohne gegenseitige Behinderung ablaufen können [7]. Allgemein sind die Ausbeuten an Silikat im Sandfang mit bis zu 85 % relativ hoch, sodass sich mit Blick auf die Sandelimination in den Klärschlamm auch nur ein geringes Reduktionspotential ergibt. Allerdings ist Sand in der stationären Wirbelschicht-Verbrennung erforderlich um das Wirbelbett zu gewährleisten. Einer Reduktion der Sandmenge im Klärschlamm müsste ggf. mit der Dosierung von Sand bei der Verbrennung begegnet werden. Insofern ist das Potential dieser Maßnahme eher gering einzuschätzen.

#### Option 2: Ausweitung der Bio-P und Reduktion von Eisen und Aluminium und gleichzeitiger Erhöhung des P-Gehaltes in der Asche

Die erweiterte biologische Phosphatelimination (Bio-P) – wie sie z. T. in Deutschland praktiziert wird – weist einige Vorteile im Hinblick auf die P-Rückgewinnung auf (leichtere Rückgewinnung von Struvit bzw. höherer P-Gehalt der Klärschlamm-Asche). Es ist jedoch nicht auf allen Kläranlagen anwendbar. In Deutschland wurde die Bio-P allerdings hauptsächlich in Kläranlagen mit hohen CSB Konzentrationen im Zulauf realisiert ( $CSB_{zu} > 800 \text{ mg/L}$ ). Allerdings ist die biologische Phosphorelimination auch bei einem geringeren CSB im Zulauf und geringeren Temperaturen möglich, dies zeigen einige schwedische Kläranlagen [8]. Das Potential dieser Maßnahme wird prinzipiell als hoch eingeschätzt, allerdings sind praktische Aspekte (Platzbedarf, Steuerung, Investitionen) eher hinderlich, sodass auch diese Option nicht weiterverfolgt wurde.

#### Option 3: Trennung der Schlammlinien bis zur Ascheaufbereitung und gezielte P-Rückgewinnung aus Überschussschlammasche

Da Phosphat vorwiegend während der biologischen Abwasserbehandlung entweder durch Simultanfällung mit Eisen/Aluminium oder durch die erweiterte biologische Phosphatelimination in den Überschussschlamm gefällt bzw. gebunden wird, läge eine separate Behandlung und Verbrennung des Überschussschlammes nahe, da dieser eine besonders P-reiche Asche erzeugt. Damit könnte der P-Gehalt in der Klärschlamm-Asche von ca. 90 auf 140 g P/ kg Asche erhöht und damit die P-Rückgewinnung erleichtert werden. Allerdings müssen bei diesem Vorgehen logistische und energetische Aspekte für den jeweiligen Standort genau geprüft werden. Zudem lässt sich Überschussschlamm alleinig schlecht faulen bzw. entwässern, was letztlich zu hohen Kosten führt. Auch diese Option erscheint bei näherer Betrachtung unrentabel und logistisch komplex.

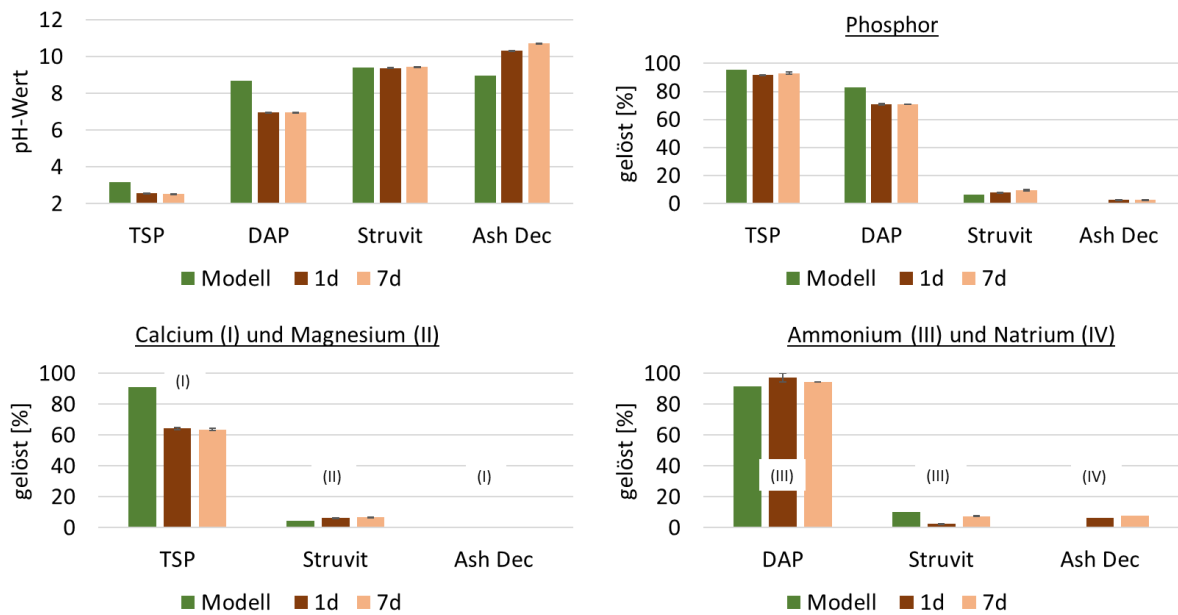
### **II.1.2.3. Experimentelle Untersuchungen zur Chemie der NextGen-Dünger**

Die Grundidee des Düngers der nächsten Generation (NextGen-Dünger) besteht in einer höheren Nutzungseffizienz gegenüber konventionellen Düngemitteln, sodass potentiell negative Umweltwirkungen bei der Düngemittelanwendung verringert werden. Um die Chemie und Wirkweise der teils sehr unterschiedlichen Verbindungen zu untersuchen, wurden zwei konventionelle wasserlösliche Dünger (TSP und DAP) und zwei neuartige neutral-ammonium-citrat-lösliche Dünger aus Abfallströmen (N-Struvit und AshDec) vertiefend mit wasserchemischen Modellen und praktischen Versuchen betrachtet.

Vor dem Hintergrund der Dissoziationsstufen der Phosphorsäure wurde zunächst abgeschätzt, wie unterschiedliche Dünger sich aufgrund der vorliegenden Phosphate als Dihydrogenphosphat ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), Hydrogenphosphat ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) und tertiären Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) theoretisch in einem Boden mit geläufigen pH-Wert verhalten.

- Dihydrogenphosphate (dazu gehört TSP:  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) haben ihr Stabilitätsoptimum im leicht sauren (pH 5), die Phosphorsäure im stark sauren (< pH 1). Sie wirken somit als Säuren, da sie übermäßig Protonen eintragen.
- Hydrogenphosphate (dazu gehört DAP:  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) und tertiäre Phosphate (dazu gehören N-Struvit:  $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  und AshDec:  $\text{CaNaPO}_4$ ) haben ihr Stabilitätsoptimum im basischen (pH 10 für Hydrogenphosphate und > pH 14 für tertiäre Phosphate). Sie wirken somit als Basen, da sie wenige/keine Protonen eintragen und übermäßig Protonen zehren. Wichtige Kationen für die Phosphat-Chemie sind insbesondere die zweiwertigen Erdalkalimetalle Calcium und Magnesium, aber auch dreiwertige Metalle wie Eisen oder Aluminium. Sie besitzen aufgrund ihres Bindungsverhaltens einen erheblichen Einfluss auf die Flüssigphase. So können unabhängig von der Speziation in der Flüssigphase beispielsweise tertiäre Calciumphosphate z.B. in Form von Hydroxylapatit bis pH 4 bilden. Als Folge werden aus den vorliegenden Dihydrogenphosphaten und Hydrogenphosphaten Protonen freigesetzt, was eine saure Wirkung verursacht. Für dreiwertige Metalle ist dies weit in den pH-Bereich der Phosphorsäure ausgeprägt. Insofern spielen die vorliegenden Kationen in den P-Düngern eine entscheidende Rolle.

Im Folgenden wurde in einem Schüttelversuch der gemahlene Dünger in Reinstwasser gegeben. Die zugegebenen Mengen orientierten sich an den verfügbaren Löslichkeiten aus der Literatur und wurden für die jeweiligen P-Dünger zusätzlich experimentell ermittelt, sodass ein verbleibender Bodensatz erzeugt wurde. Das führte dazu, dass erhebliche Mengen von den wasserlöslichen Düngern auf 50 ml Wasser gegeben wurden, von den nicht-wasserlöslichen Düngern hingegen weniger. Parallel wurde der resultierende pH-Wert mit thermodynamischen Gleichgewichtsmodellen sowie die Löslichkeit der Einzelnährstoffe bestimmt.

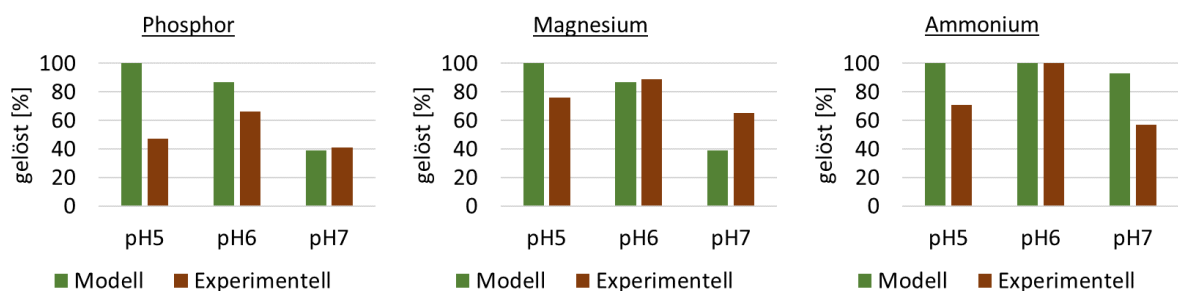


**Abbildung 1: Modellergebnisse und experimentell ermittelte pH-Werte und Löslichkeiten der einzelnen Nährstoffe.**

Abbildung 1 zeigt die experimentell ermittelten Werte gegenüber der Modellvorstellung. Prinzipiell ergibt sich eine hohe Übereinstimmung.

- TSP wirkt wie o.g. sauer, sodass sich ein pH-Wert kleiner pH 3 in Reinstwasser einstellt. Die prozentuale P-Löslichkeit ist höher als die Ca-Löslichkeit.
- DAP wirkt in den Experimenten relativ neutral.
- N-Struvit und AshDec wirken wie zu erwarten eher basisch.

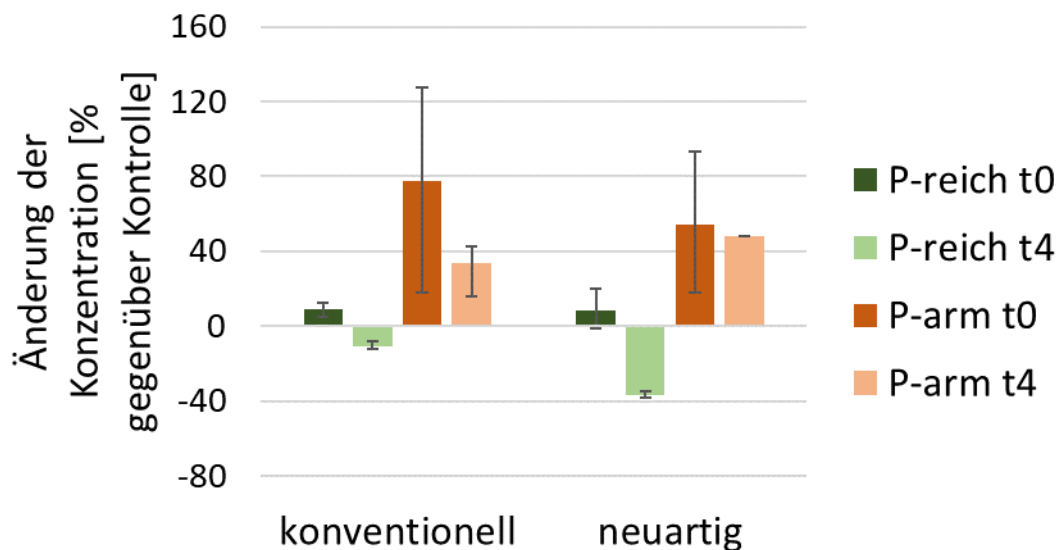
Die Dünger-Lösungen wurden anschließend auf pH 5, pH 6 und pH 7 mit HCl titriert und der Anteil an löslichem Phosphat, Magnesium und Ammonium bestimmt.



**Abbildung 2: Experimentell bestimmte Nährstofflöslichkeit im Titrationsversuch mit für N-Struvit je pH-Wert und Modellwert.**

Die in Abbildung 2 dargestellten experimentell bestimmten Werte geben gegenüber den Modellvorstellungen ein differenziertes Bild ab. Vereinzelt werden hohe Übereinstimmungen zwischen Modell und Versuch erreicht, allerdings auch erhebliche Abweichungen. Prinzipiell erhöht sich die Löslichkeit von pH 7 zu pH 6. Dass die Löslichkeit aller drei Nährstoffe bei pH 5 wieder absinkt deutet auf die Präsenz von N-Struvit hin, was allerdings nicht erklärt werden kann.

Zudem wurden Inkubationsversuche der Dünger mit verschiedenen Böden diverser P-Gehaltsklassen durchgeführt. Die Dünger wurden in gemahlener Form äquivalent zu Vorgaben der Düngeverordnung in die Böden eingemischt und über acht Wochen bei 60 % Feldkapazität inkubiert. Für die Auswertung wurden zwei Klassifikationen vorgenommen. Es wurden P-reiche (Gehaltsklassen D und E) von P-armen (Gehaltsklassen A und B) Böden sowie konventionelle, wasserlösliche (TSP und DAP) von neuartigen neutral-ammonium-citrat löslichen (N-Struvit und AshDec) Düngern unterschieden. In Abbildung 3 ist die prozentuale Änderung des calcium-ammonium-lactat-löslichem Phosphat gegenüber der Null-Kontrolle dargestellt.



**Abbildung 3: Prozentuale Änderung des Calciumammoniumlactat löslichem P im Boden gegenüber der Null-Kontrolle zum Beginn (t0) und nach acht Wochen (t4).**

Tendenziell sind die Veränderungen in P-reichen Böden gering, da diese sowieso übersorgt sind und ausreichend Phosphat nachliefern. Eine Düngung mit Phosphat ist hier i.d.R. überflüssig. Bei den P-armen Böden zeigt sich der Vorteil wasserlöslicher P-Dünger zu Beginn (t0), welche zu großem Teil sofort pflanzenverfügbares Phosphat bereitstellen. Die neuartigen Dünger zeigen hier eine geringere Änderung der Calciumammoniumlactat löslichen P-Konzentration im Boden. Nach acht Wochen (t4) hat jedoch das extrahierbare Phosphat in den Proben mit konventionellen Düngern deutlich abgenommen, während N-Struvit und AshDec relativ konstant Phosphat nachliefern. Dies deckt sich teilweise mit Beobachtungen hinsichtlich der späteren Nachlieferung von Nährstoffen durch die Uni Bonn.

#### **II.1.2.4. AshDec Ökobilanz**

Die Bewertung des ökologischen Fußabdrucks von Recyclingdüngern wird anhand von drei „Fallstudien“ durchgeführt i) Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche mit dem AshDec-Prozess, ii) Stickstoff- und Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammwasser und Klärschlamm in Form von N-Struvit und iii) Kalium- und Phosphorrückgewinnung aus industriellem Abwasser in Form von K-Struvit.

#### Definition des Ziel- und Untersuchungsrahmens

Das Ziel der Ökobilanz ist die Bewertung der Weiterverarbeitungsschritte von Klärschlamm zu Klärschlammasche und die Umwandlung zu einem sekundären Dünger mit pflanzenverfügbarem Phosphor (P) durch das AshDec-Verfahren inklusive aller dazugehörenden Prozesse. Das zugrunde liegende System umfasst die Teil- bzw. Volltrocknung von entwässertem Schlamm, die Monoverbrennung und die Aufbereitung der Asche mit dem AshDec-Verfahren. Die Funktion des Systems liegt somit in der Klärschlamm Entsorgung.

Die aus der Funktion des Systems abgeleitete funktionelle Einheit ist definiert als „Umweltauswirkungen pro t behandeltem Klärschlamm (KS)  $[t \text{ Klärschlamm}]^{-1}$  bzw.  $[t \text{ KS}]^{-1}$ “. Als Referenzfluss wurden 303.644 t Originalsubstanz (OS) entwässerter Klärschlamm pro Jahr gewählt, was in etwa 30.000 t Klärschlammasche pro Jahr und 4,6 Mio. Einwohnerwerten entspricht.

Die Systemgrenzen umfassen die Trocknung (Volltrocknung auf 85 % und Teiltrocknung auf 40 %), die Monoverbrennung, den Drehrohrofen (AshDec-Prozess), die Reinigung des Rauchgases aus dem Drehrohrofen, den Transport der Asche bzw. des AshDec-Produktes zur Anwendung und der Monoverbrennung und die Anwendung des produzierten P-Düngers. Für die Menge an Phosphor in der Asche und dem AshDec-Produkt wird Phosphatdünger gutgeschrieben. Zudem werden alle wesentlichen Hintergrundprozesse erfasst. Dazu gehören Strom, Wärme, Brennstoffe und Chemikalien. Die zusätzliche Infrastruktur durch die Implementierung eines nachgeschalteten Drehrohrofens und eines zusätzlichen Trockners wird berücksichtigt. Infrastruktur für die bestehende Monoverbrennung und dazugehörige Trocknung und Rauchgasreinigung wird nicht berücksichtigt. In der Ökobilanz werden die Szenarien mit Drehrohrofen (Abbildung 4) mit einem Referenzsystem (direkte Klärschlammascheanwendung in der Landwirtschaft) verglichen. Als Additiv wird Natriumsulfat, Natriumcarbonat oder Natriumhydrogencarbonat verwendet. Im AshDec-Drehrohrofen kann abhängig von den Szenarien eine reduzierende oder oxidierende Atmosphäre eingestellt werden.

- Reduzierende Atmosphäre bei 960 °C, dabei wird vollgetrockneter Klärschlamm als Reduktionsmittel verwendet.
- Oxidierende Atmosphäre bei 860 °C, dabei wird kein Klärschlamm als Reduktionsmittel benötigt. Bei geringer Schwermetallbelastung der Asche, kann die Filterasche dem Produkt wieder zugemischt werden

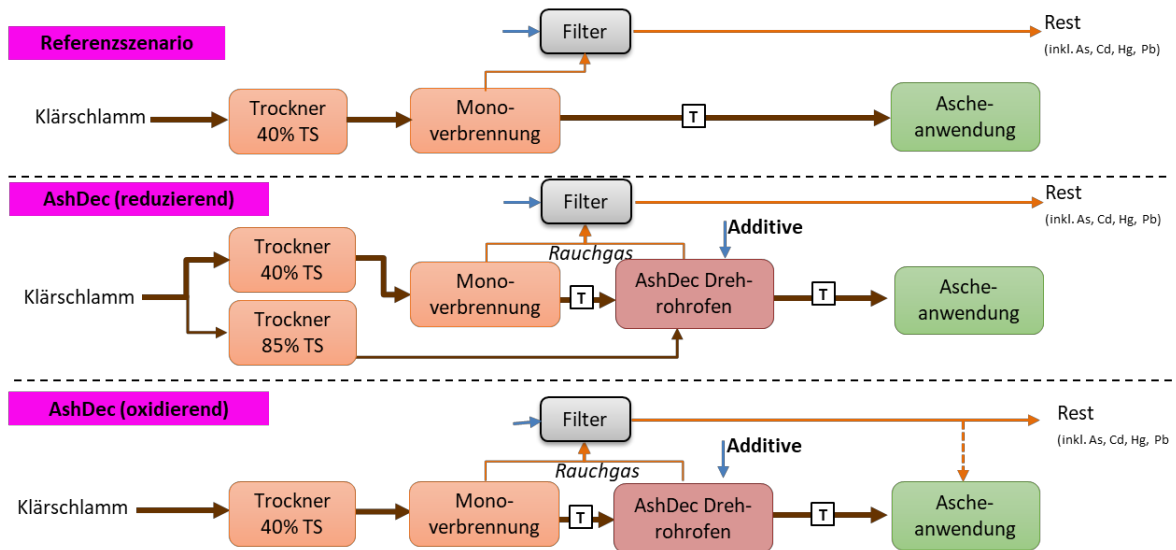


Abbildung 4: Übersicht der Szenarien für die AshDec Ökobilanz

### Ergebnisse und Wirkungsabschätzung

#### Nicht-erneuerbarer kumulierter Energieaufwand aus fossilen und nuklearen Ressourcen (KEA)

Die direkte Klärschlammaschenanwendung weist einen KEA von  $-1,4 \text{ GJ/t KS}$  auf. Die AshDec-Szenarien weisen einen KEA zwischen  $-0,3 \text{ GJ/t KS}$  und  $-1,0 \text{ GJ/t KS}$  auf. Das bedeutet, dass für alle Szenarien der Schlammensorgung die Gutschriften die Aufwendungen übertreffen. Dieses Ergebnis wird weitgehend auf die Gutschrift „Energiebilanz Monoverbrennung“ zurückgeführt. Diese Gutschrift berücksichtigt den Energiebedarf der Monoverbrennung und Klärschlammteiltrocknung, sowie die Wärme- und Stromrückgewinnung aus dem Heizwert des Klärschlammes. Als Bruttowert ergibt sich ein Gewinn an elektrischer und thermischer Energie (elektrisch:  $+0,13 \text{ kWh/kg TM}$ , thermisch  $+0,60 \text{ kWh/kg TM}$ ). Der energetische Aufwand für die Herstellung von Chemikalien kommt zu 50 bis 60 % der Aufwendungen durch die Herstellung der Natriumsalze zustande. Die Additive der Rauchgasreinigung spielen eine untergeordnete Rolle ( $< 10 \%$ ). Eine Ausnahme bildet das AshDec-Verfahren mit dem Additiv  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , dort wird zusätzlich Kalkmilch für die Rauchgasentschwefelung eingesetzt und die Additive der Rauchgasreinigung haben dadurch einen prozentualen Anteil von etwa 25 % an den Aufwendungen. Der Energiebedarf des Drehrohrföhens geht auf den Bedarf an elektrischem Strom (30 – 40 %) und den Erdgasbedarf zur Wärmeerzeugung (60 – 70 %) zurück und macht zusammengefasst etwa 25 % der Aufwendungen aus. Die Gutschriften setzen sich aus der Energiebilanz der Monoverbrennung (Energieinput und –output inkl. Schlammteiltrocknung) und der eingesparten Aufwendungen für die konventionelle P-Düngemittelproduktion zusammen. Die P-Frachten im Sekundärdünger werden über die Menge des gutgeschriebenen P-Düngers berücksichtigt. Die Gutschriften für den P-Dünger entsprechen dem deutschen P-Düngermix, wobei nur das pflanzenverfügbare P ( $P_{\text{nac}}$ ) gutgeschrieben wird, welches für die Klärschlammasche ( $P_{\text{nac}} = 30 \%$ ) wesentlich geringer als für die AshDec-Verfahren ( $P_{\text{nac}} = 75$  bzw.  $90 \%$ ) ausfällt. Bei den Szenarien mit Klärschlamm als Reduktionsmittel im Drehrohrföhen verschlechtert sich die Energiebilanz der Monoverbrennung. Da ein Teil des Input-Klärschlammes nicht in die Monoverbrennung geführt,

sondern auf 85 % getrocknet wird. Dadurch entsteht zusätzlich ein erhöhter Energieverbrauch für die Volltrocknung.

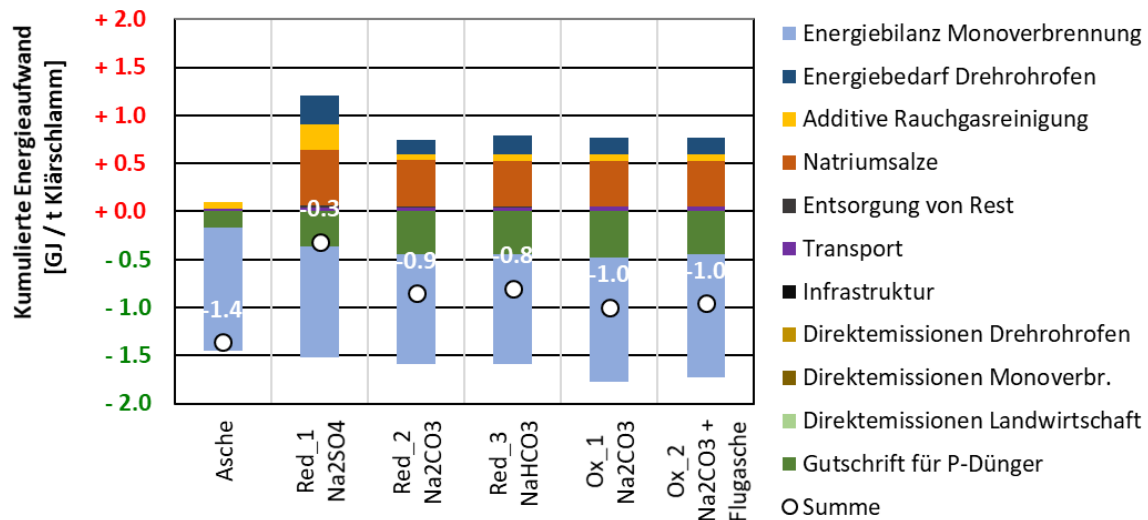


Abbildung 5: Kumulierter nicht-erneuerbarer Energieaufwand fossiler und nuklearer Ressourcen der Aschebehandlung - umfasst den Verbrauch der Ressourcen Kohle, Erdgas, Rohöl und Uran und wird nach VDI 4600 berechnet [9].

#### Treibhausgaspotenzial (GWP)

Das Wirkungskategorie Treibhausgaspotential der Aschebehandlung umfasst die Emissionen von Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas. Dadurch werden unter anderem die Emissionen aus der Monoverbrennung und dem Drehrohrofen berücksichtigt (in dem Fall vor allem N<sub>2</sub>O-Emissionen). Durch den Einsatz von Klärschlamm als Reduktionsmittel im Drehrohrofen verringert sich die monoverbrannte Klärschlammmenge zu einem kleinen Teil. Die dadurch eingesparten Lachgasemissionen in der Monoverbrennung werden allerdings im Drehrohrofen ausgestoßen (siehe Abbildung 6). Zusätzlich entstehen dort Direktemissionen aus dem gebundenen CO<sub>2</sub> in Natriumcarbonat und Natriumhydrogencarbonat. Für das AshDec-Verfahren mit Natriumsulfat, spielt die Rauchgasreinigung, aufgrund der benötigten Kalkmilch, eine größere Rolle als für die anderen Verfahren. Die direkte Ascheanwendung hat ein nahezu neutrales Treibhausgaspotential (0,4 kg CO<sub>2</sub> Eq/ t KS), d.h. die N<sub>2</sub>O-Direktemissionen der Monoverbrennung werden von der energetischen Gutschrift der Monoverbrennung aufgewogen. Dem AshDec-Verfahren mit Natriumsulfat wird ein GWP von 92 kg CO<sub>2</sub> Eq/ t KS und den Verfahren mit Natriumcarbonaten von 45 bis 52 kg CO<sub>2</sub> Eq/ t KS zugeschrieben.



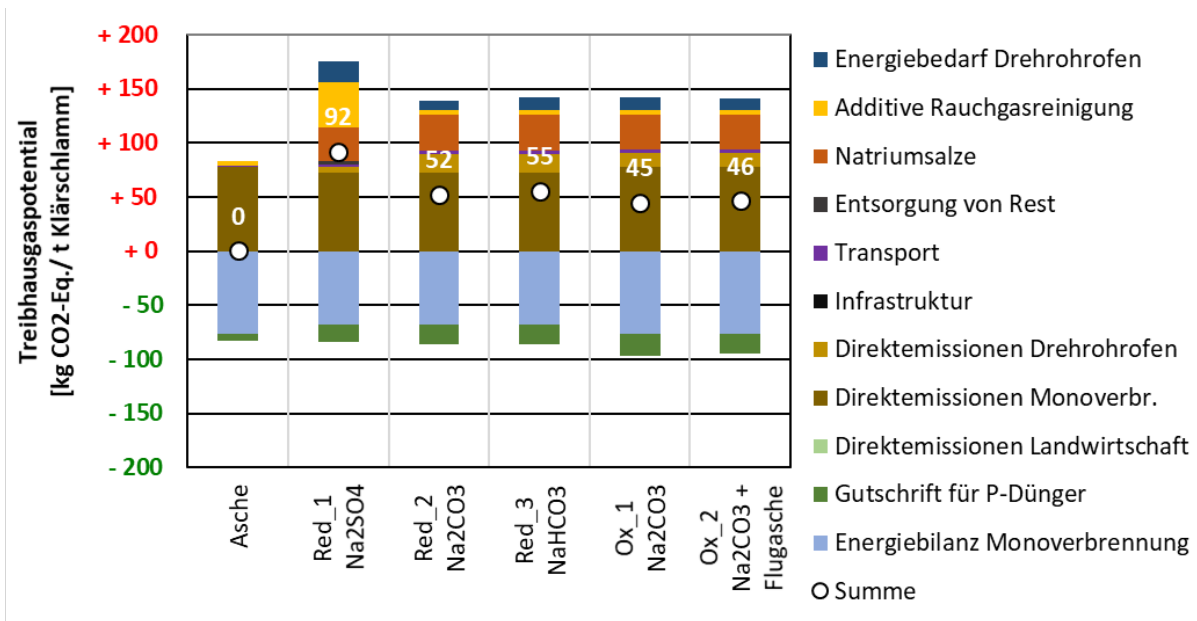


Abbildung 6: Treibhausgaspotential der Aschebehandlung umfasst die Emissionen von Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas und wird nach ReCiPe Midpoint: (Goedkoop et al., 2009) berechnet.

### Süßwassereutrophierungspotential (FEP)

Das Süßwassereutrophierungspotential ist hinsichtlich der Düngemittelanwendung für die AshDec-Verfahren nahezu neutral, da für konventionelle Dünger und die Rezyklate die gleichen Emissionsfaktoren verwendet wurden (Abbildung 7). Die Unterschiede in der Gutschrift sind damit zu erklären, dass eine unterschiedliche Pflanzenverfügbarkeit für konventionelle Dünger, Klärschlamm-Asche und die AshDec-Produkte angenommen wurden.

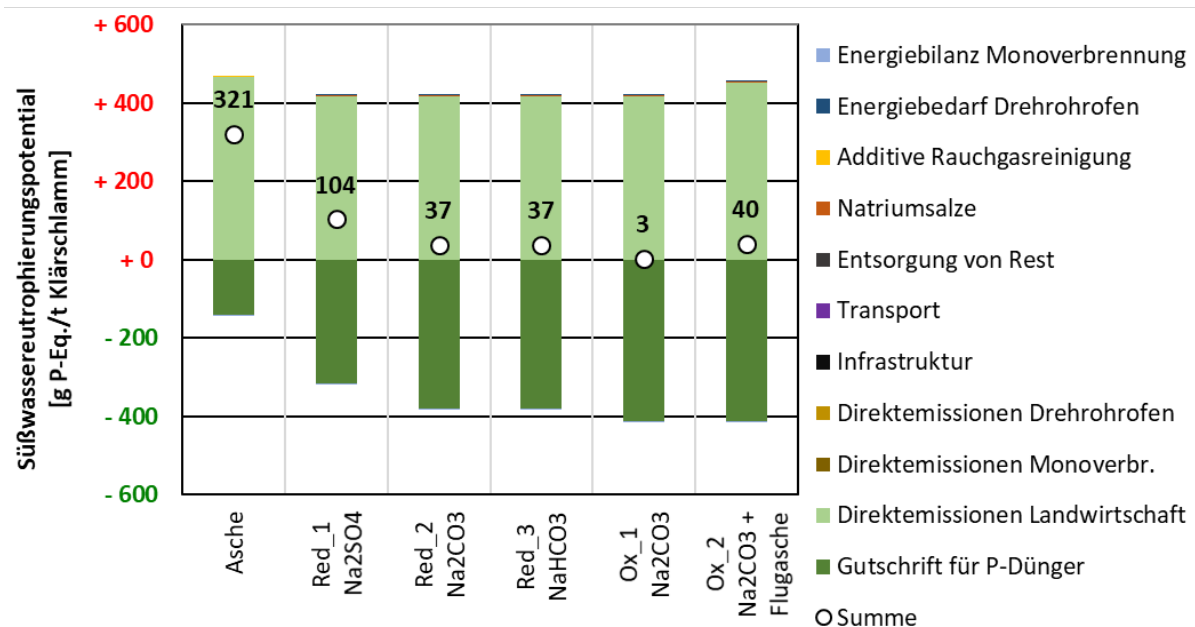


Abbildung 7: Süßwassereutrophierungspotential der Aschebehandlung umfasst Phosphatmissionen und wird nach ReCiPe Midpoint (Goedkoop et al., 2009) berechnet.

Da für konventionellen Dünger und die Rezyklate die gleichen Emissionsfaktoren angenommen wurden, können die Direktmissionen in der Landwirtschaft durch das AshDec-Produkt (im Vergleich zu Klärschlammasche) gesenkt und die Gutschrift für den P-Dünger deutlich vergrößert werden (>200 g P-Eq./ t KS). Zu möglichen „slow-release/controlled-release“-Eigenschaften und damit eingehenden P-Emissionen in die Umwelt sind keine belastbaren Daten vorhanden.

### Interpretation

Grundsätzlich kann das energetische und ökologische Profil des AshDec-Verfahrens und der direkten Verwendung von Klärschlammasche mit einer Klärschlammmonoverbrennung ohne Rückgewinnung nicht als pauschal besser oder schlechter bewertet werden. Die Ergebnisse zeigen ein differenziertes Bild für verschiedene Wirkungsindikatoren (siehe Tabelle 1):

- Der zusätzliche Energie- und Chemikalienbedarfs für das AshDec-Verfahren kann durch die Substitution von mineralischem P-Dünger nicht ausgeglichen werden, was zu einem höheren kumuliertem Energieaufwand führt.
- Auch das Treibhauspotential der AshDec-Verfahren erhöht sich durch die zusätzliche benötigte Energie, sowie durch die Herstellung und ggf. auch Anwendung von Natriumcarbonaten. Die Anwendung von Natriumsulfat reduziert die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen im AshDec-Verfahren, allerdings fallen zusätzliche Emissionen bei der Herstellung von Kalkmilch aus Kalkstein für die Rauchgasentschwefelung an.
- Durch die thermo-chemische Behandlung der Asche in einem Drehrohrofen können bis zu 98 % der gesamten P-Fracht zurückgewonnen werden, indem die Asche in ein pflanzenverfügbares P-Produkt umgewandelt wird. Das P-Produkt hat eine hohe Pflanzenverfügbarkeit (75 bis 95 %) im Vergleich zur Klärschlammasche (30 %). Dadurch wird das Süßwassereutrophierungspotential der AshDec-Szenarien mit Natriumcarbonat/-hydrogencarbonat um bis zu 85 % und das terrestrische Versauerungspotential um etwa 25 % gesenkt.
- Die Zugabe von Natriumsalzen und ggf. vollgetrocknetem Schlamm als Reduktionsmittel führt zu einer Abreicherung einzelner Schwermetalle. Dadurch wird die Schwermetallfracht reduziert. Zusätzlich vergrößert sich die Gutschrift für die Substitution der Produktion von mineralischem P-Dünger. Das führt zu einer Reduktion im Humantoxizitätspotential von 40 bis 80 % im Vergleich zum Referenzszenario. Wird die Flugasche aus der Behandlung dem Produkt wiederum zugeschlagen, erhöht sich wiederum der Schwermetallgehalt des Produktes und das Humantoxizitätspotential.

**Tabelle 1: Umweltwirkungen der Aschebehandlung durch das AshDec-Verfahren im Vergleich zur direkten Ascheanwendung je Wirkungskategorie**

Wirkungskategorie	KEA	GWP	TAP	FEP	MEP	HTP
<b>Einheit pro t KS</b>	GJ	kg CO <sub>2</sub> -Eq	g SO <sub>2</sub> -Eq	g P-Eq	g N-Eq	kg 1,4 DCB-Eq
<b>Asche</b>	-1,4	0	-129	+321	+3	+112
<b>Red_1 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	-0,3	+92	+65	+104	+3	+52
<b>Red_2 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	-0,9	+52	-153	+37	+87	+23

<b>Red_3 NaHCO<sub>3</sub></b>	-0,8	+55	-151	+37	+84	+23
<b>Ox_1 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	-1,0	+45	-192	+3	+83	+29
<b>Ox_2 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + Flugasche</b>	-1,0	+46	-165	+40	+84	+71

Es muss berücksichtigt werden, dass aufgrund der äußerst geringen Pflanzenverfügbarkeit die direkte Aufbringung von Klärschlammasche für Landwirte im Zuge neuer Regelungen im Düngerecht zunehmend auf Widerstand stößt. Eine entsprechende Entlastung hinsichtlich der Nährstoffeinträge, wie durch das Düngerecht gefordert, zeigt sich in der Ökobilanz in der Wirkungskategorie Süßwassereutrophierungspotential. Daher sind mittelfristig Alternativen, wie zum Beispiel das AshDec-Verfahren, anstelle der direkten Aufbringung von Klärschlammasche zu verfolgen.

#### II.1.2.5. N-Struvit Ökobilanz

##### Definition des Ziel- und Untersuchungsrahmens

Das Ziel der Ökobilanz ist die „ökologische Bewertung der Rückgewinnung von Struvit aus kommunalem Abwasser“. Dabei werden die zu erwartenden Nebeneffekte einer Struvitrückgewinnung auf den Betrieb der Kläranlage (KA) und auf die Klärschlammbehandlung berücksichtigt. Die funktionelle Einheit der Ökobilanz wird definiert als „Betrieb der Klärschlammbehandlung und –entsorgung pro Einwohner und Jahr“. Die Systemfunktion beinhaltet die Weiterverarbeitung von 48.000 m<sup>3</sup> Primärschlamm (PS) mit 3 % Trockenrückstand (TR) pro Jahr und 143.000 m<sup>3</sup> Überschussschlamm (ÜS) mit 1 % TR pro Jahr. Die P-Fracht im PS beträgt etwa 12 t P/a und im ÜS 52 t P/a. Das entspricht etwa einen Klärschlammfall von 100.000 Einwohnerwerten pro Jahr.

Die Systemgrenzen umfassen die Eindickung, Entwässerung, Biogasproduktion, Monoverbrennung, Rückbelastung, Ascheentsorgung und Struvitgewinnung. Es werden alle zusätzlichen Aufwendungen und Auswirkungen der Abwasser- und Schlammbehandlung sowie auf die Biogasproduktion und Monoverbrennung durch die Struvitgewinnung berücksichtigt. Zudem werden der Transport und die Anwendung des Produkts betrachtet. Für die Menge an Phosphor und Stickstoff im Struvit wird konventioneller Dünger gutgeschrieben. Alle wesentlichen Hintergrundprozesse werden erfasst. Dazu gehört die Produktion von Strom, Wärme, Brennstoffen und Chemikalien. Die zusätzliche Infrastruktur durch die Implementierung eines Fällungsreaktors und ggf. einer Hydrolyse und der zusätzlichen Entwässerung wird berücksichtigt. Die bestehende Infrastruktur der Schlammbehandlung (Aggregate der Eindickung, Entwässerung, Faulung, Biogasproduktion, Trocknung und Monoverbrennung) und Infrastruktur zur Behandlung der Rückbelastung wird nicht berücksichtigt.

In der Ökobilanz wird die Referenzkläranlage ohne Struvitrückgewinnung mit Kläranlagen mit integrierter Struvitrückgewinnung verglichen. Dabei wird die Struvitrückgewinnung im Faulschlamm und Zentrat sowie Verfahren mit und ohne Hydrolyse berücksichtigt (Abbildung 8). Alle Szenarien wurden für eine Bio-P Kläranlage mit 100.000 EW entwickelt. Die Szenarien umfassen: 0. Referenz-Kläranlage, 1. Struvitfällung im Faulschlamm (7 % P-Rückgewinnung bezogen auf Kläranlagenzulauf), 2. Struvitfällung im Zentrat (P-Rückgewinnung: 14 %), 3. Struvitrücklösung mit einer nassen Hydrolyse (1,5 % TR) und Fällung im Zentrat (P-Rückgewinnung: 27 %) und 4. Struvitrücklösung mit einer trockenen Hydrolyse (6,0 % TR) und Fällung im Zentrat (P-Rückgewinnung: 34 %).

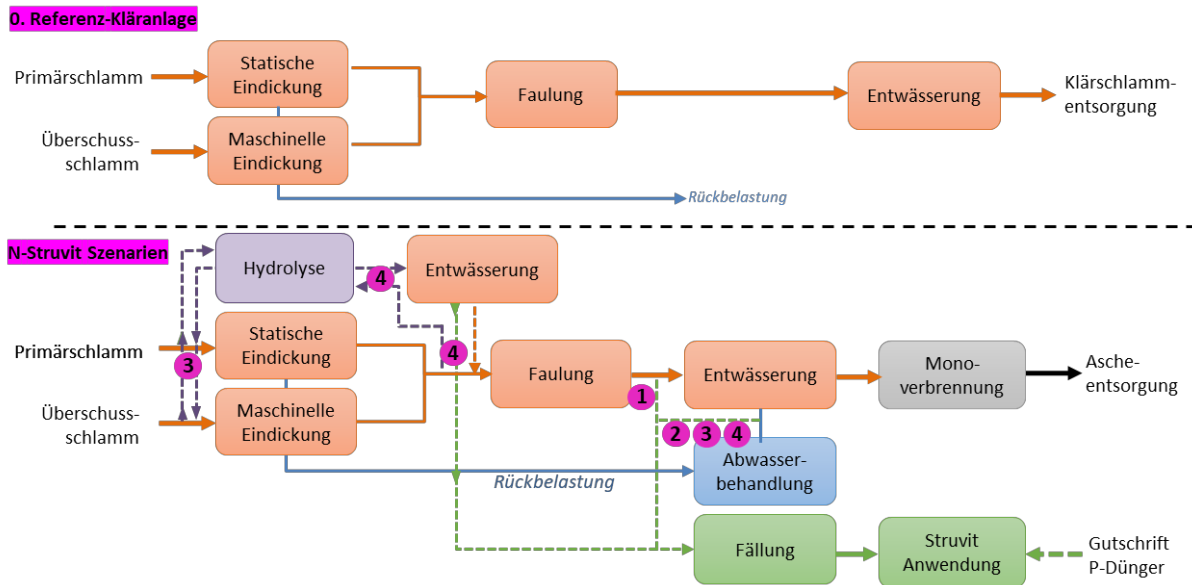


Abbildung 8: Übersicht der Szenarien für die N-Struvit-Ökobilanz – Szenarien: 0. Referenz-Kläranlage, 1. Fällung im Faulschlamm, 2. Fällung im Zentrat, 3. nasse Hydrolyse (1,5 % TR) + Fällung im Zentrat und 4. trockene Hydrolyse (6,0 % TR) + Fällung im Zentrat

### Ergebnisse und Interpretation der N-Struvit Ökobilanz

#### Nicht-erneuerbarer kumulierter Energieaufwand aus fossilen und nuklearen Ressourcen (KEA)

Das Referenzszenario weist einen netto KEA von -134 MJ/(EW\*a) auf, was sich aus Aufwendungen von +89 MJ/(EW\*a) und Gütschriften von -223 MJ/(EW\*a) ergibt (Abbildung 9). Die Aufwendungen bestehen hauptsächlich aus dem Polymerverbrauch, der Ascheentsorgung und dem Transport. Chemikalien spielen mit unter +<4 MJ/(EW\*a) kaum eine Rolle. Die Gütschriften bestehen im Referenzszenario zu 86 % aus der „Energiegewinnung BHKW“ und zu 14 % aus der „Wärme- und Strombilanz Schlammverbrennung“.

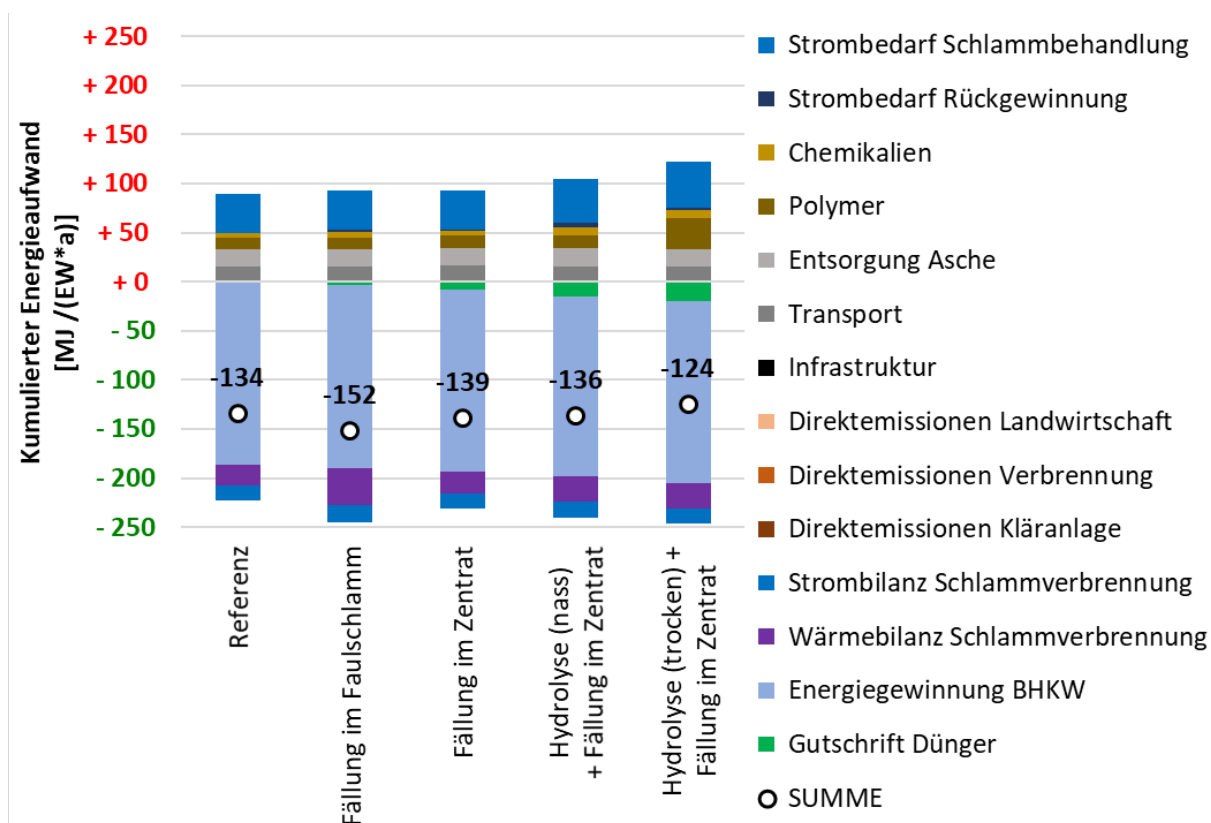


Abbildung 9: Kumulierter nicht-erneuerbarer Energieaufwand fossiler und nuklearer Ressourcen der Schlammbehandlung mit und ohne N-Struvit-Rückgewinnung - umfasst den Verbrauch der Ressourcen Kohle, Erdgas, Rohöl und Uran und wird nach VDI 4600 berechnet [9].

Die Implementierung eines der Fällung im Faulschlamm reduziert den KEA um 13 % auf  $-152 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ . Die Reduktion ist auf die verbesserte Wärmebilanz der Schlammverbrennung zurückzuführen, welche auf einen um 2 % verbesserten Entwässerungsgrad zurückzuführen ist. Die „Gutschrift Dünger“ ( $3,6 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ ) neutralisiert die zusätzlichen Aufwendungen für Infrastruktur, Strom und Chemikalien für die Rückgewinnung ( $3,6 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ ) nicht. Alle relevanten Gutschriften werden über Nebeneffekte erzielt, wie z. B. die verbesserte Schlammmentwässerung. Die Implementierung einer Fällung im Zentrat führt zu einem um 3 % reduzierten KEA und folglich zu netto Aufwendungen von  $-139 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ . Die Struvitfällung findet in Szenario 2 nach der Entwässerung statt. Dadurch wird kein erhöhter Entwässerungsgrad erzielt und die diesbezüglichen Vorteile entfallen.

Allerdings übertrifft die „Gutschrift Dünger“ die zusätzlichen Aufwendungen für Strom, Chemikalien und Infrastruktur um  $3 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ . Die Implementierung einer Fällung im Zentrat in Kombination mit einer nassen Hydrolyse führt zu einem netto KEA von  $-136 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ , also einer marginalen Reduktion um 1 %. Die zusätzlichen Aufwendungen umfassen den zusätzlichen Stromverbrauch ( $9,1 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ ) für die nasse Hydrolyse und den Fällungsreaktor sowie Aufwendungen für Chemikalien und Infrastruktur ( $5,6 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ ). Die trockene Hydrolyse mit Fällung im Zentrat führt zu einem netto KEA von  $-124 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ , was einem Anstieg von etwa 9 % gegenüber dem Referenzszenario entspricht. Durch die Implementierung der Fällung im Zentrat in Kombination mit trockener Hydrolyse steigen die Aufwendungen von  $+92 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$  auf  $+123 \text{ MJ}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ . Das liegt in erster Linie an dem erhöhten

Polymer- (+19 MJ/(EW\*a)) und Stromverbrauch der Schlammbehandlung (+7 MJ/(EW\*a)), welcher durch den zusätzlichen Entwässerungsschritt entsteht.

### Treibhausgaspotenzial (GWP)

Analog zu KEA setzten sich die Aufwendungen in der Wirkungskategorie GWP aus Strom- und Chemikalienverbrauch sowie Transport und Entsorgung zusammen. Allerdings haben zusätzliche Direktemissionen in der Monoverbrennung (N<sub>2</sub>O), in der Kläranlage (CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) sowie in der Landwirtschaft (N<sub>2</sub>O) einen großen Einfluss auf das GWP.

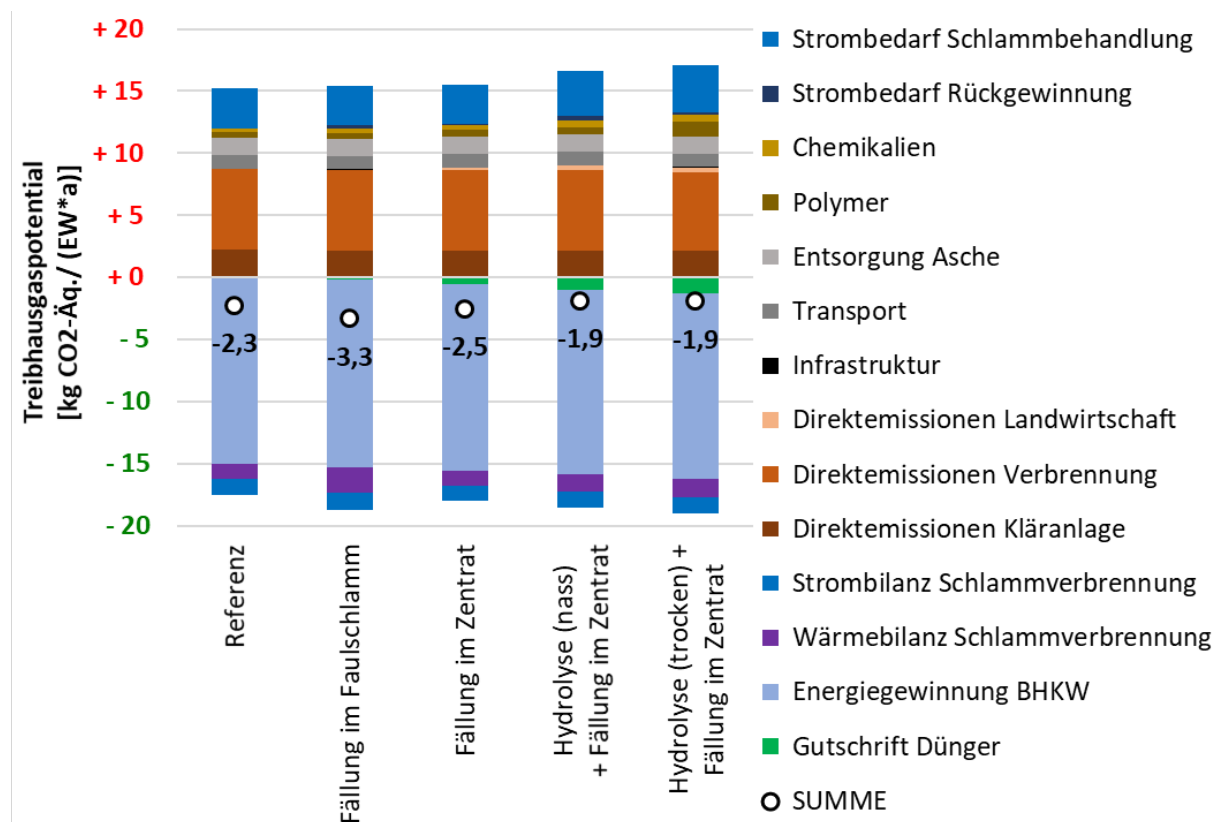


Abbildung 10: Treibhausgaspotenzial der Schlammbehandlung mit und ohne N-Struvit-Rückgewinnung - umfasst die Emissionen von Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas und wird nach ReCiPe Midpoint [10] berechnet.

Insgesamt hat die Erweiterung der Kläranlage mit einem Fällreaktor wenig Auswirkungen auf das GWP des gesamten Systems. Das Referenzsystem erreicht ein netto GWP von -2,3 CO<sub>2</sub> Eq/(EW\*a). Dies setzt sich aus Aufwendungen in Höhe von -15,2 kg CO<sub>2</sub> Eq/(EW\*a) und Gutschriften in Höhe von 17,5 kg CO<sub>2</sub> Eq/(EW\*a) zusammen. Durch die Implementierung der Fällung im Faulschlamm (Szenario 1) wird das GWP um 45 % auf -3,3 CO<sub>2</sub> Eq/(EW\*a) reduziert. Die Aufwendungen für das System werden hauptsächlich durch die „Wärmebilanz der Schlammverbrennung“ ausgeglichen. Die Fällung im Zentrat (Szenario 2) reduziert das GWP um 10 % auf -2,5 kg CO<sub>2</sub> Eq/(EW\*a). Die Verfahrenskombination aus Fällung im Zentrat und Hydrolyse (Szenarien 3 und 4) erhöht das GWP um +16 % auf -1,9 CO<sub>2</sub> Eq/(EW\*a).

Der Anteil der Kategorien an den gesamten Aufwendungen fällt für alle Szenarien ähnlich aus. Direktemissionen machen ca. 52-58 % aus, Strombedarf der Schlammbehandlung und Rückgewinnung 20-25 %, Chemikalien und Polymer 5-10% sowie Transport und Entsorgung 14-17 %. Die Infrastruktur

trägt zu <1 % der Gesamtemissionen bei. Die Gutschrift wird durch die „Energiegewinnung BHKW“ zu 80-86 %, die Strom- und Wärmebilanz Schlammverbrennung zu 14-16 % und die „Gutschrift Dünger“ zu maximal 8 % bestimmt.

### Süßwassereutrophierungspotential (FEP)

Das netto FEP (P-Emissionen in die Umwelt) der Referenz-Kläranlage beträgt +2,9 g P-Eq/(EW\*a) und liegt zwischen -1 und +1,5 g P-Eq/(EW\*a) für die Struvit-Szenarien, siehe Abbildung 11. Der Bruttoaufwand des FEP wird beim Referenzszenario zu 90 % durch die „Direktemissionen Kläranlage“ (P-Fracht im Kläranlagenablauf) bestimmt (+4,5 g P-Eq/(EW\*a)).

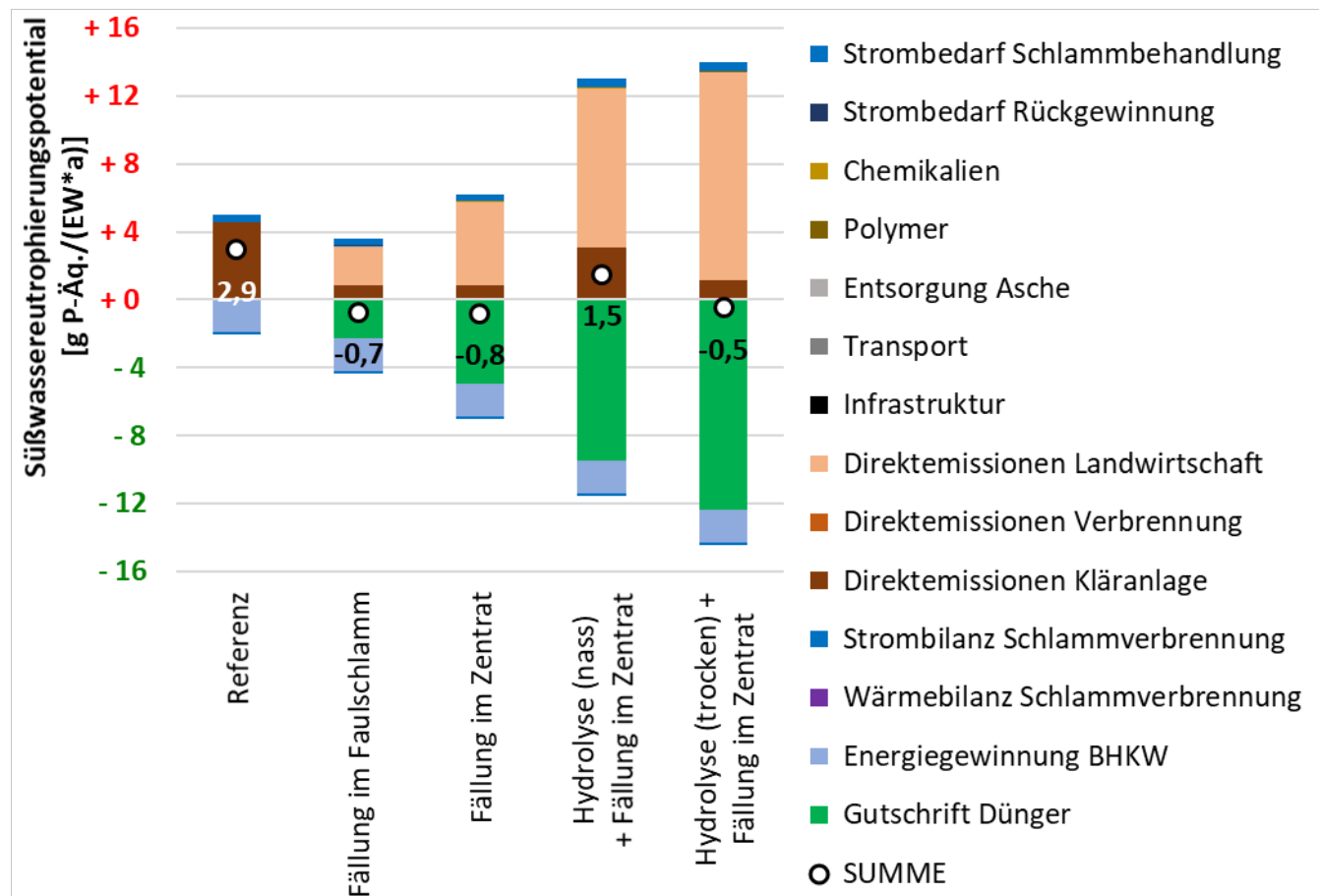


Abbildung 11: Süßwassereutrophierungspotential der Schlammbehandlung mit und ohne Struvit-Rückgewinnung - umfasst Phosphatmissionen und wird nach ReCiPe Midpoint: [10] berechnet.

Durch einen Fällungsreaktor lässt sich die ortho-P Konzentration im Schlammwasser und damit letztendlich auch im Kläranlagenablauf reduzieren. Wird eine vorgeschaltete Hydrolyse implementiert, wird die ortho-P Konzentration im Schlammwasser allerdings etwas erhöht. Auch wenn man die hohe Rückgewinnungsraten einbezieht, kann dieser Effekt durch die P-Ausschleusung in Form von Struvit nicht komplett aufgehoben werden.

Analog zur AshDec-LCA ist das FEP hinsichtlich der Düngemittelanwendung für die Struvit-Verfahren nahezu neutral, da für konventionelle Dünger und die Rezyklate die gleichen Emissionsfaktoren verwendet wurden. Das bedeutet die Direktemissionen Landwirtschaft werden durch die Gutschrift Dünger kompensiert.

### Interpretation

Die Schlammbehandlung mit und ohne Struvit-Rückgewinnung kann innerhalb der Lebenszyklusperspektive mit Umweltentlastungen einhergehen. Die betrachteten Ansätze können Umweltfolgen resultierend aus z. B. dem fossilen kumulierten Energieaufwand, dem Treibhausgaspotential, dem Eutrophierungspotential oder dem Humantoxizitätspotential verringern (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Umweltwirkungen verschiedener Schlammbehandlung mit und ohne Struvit-Rückgewinnung**

Wirkungskategorie	KEA	GWP	TAP	FEP	MEP	HTP
Einheit pro EW*a	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Eq	g SO <sub>2</sub> -Eq	g P-Eq	g N-Eq	kg 1,4 DCB-Eq
Referenzszenario	-134	-2,3	+34	+2,9	+95	0
Fällung im Faulschlamm	-152	-3,3	+31	-0,7	+89	-0,4
Fällung im Zentrat	-139	-2,5	+29	-0,9	+87	-1,0
Hydrolyse (nass) + Fällung im Zentrat	-136	-1,9	+27	+1,5	+91	-1,8
Hydrolyse (trocken) + Fällung im Zentrat	-126	-1,9	+28	-0,5	+89	-2,4

Zusammengefasst können folgende Rückschlüsse aus der Ökobilanz gezogen werden.

#### Szenario 1:

- Die Struvitfällung im Faulschlamm wird für die beiden betrachteten Wirkungskategorien als umweltentlastend bewertet.
- Ausschlaggebend für die Implementierung dieses Verfahrens sind die verbesserte Entwässerbarkeit des Klärschlammes, die Verringerung des Polymerbedarfs, die Reduktion der P- und N- Rückbelastung sowie die Vermeidung von (Struvit-) Inkrustationen.
- Die Rückgewinnungsrate (bezogen auf den KA-Zulauf) wurde mit 7 % angenommen. Die Düngerproduktion ist daher nur ein Nebeneffekt des Verfahrens.

#### Szenario 2-4:

- Die Struvitfällung im Zentrat mit einem wird für beide Wirkungskategorien als umweltentlastend bewertet.
- Die Rückgewinnungsrate bezogen auf den KA-Zulauf wurde mit 14 % angenommen. Diese Rückgewinnungsrate ist auf die höhere Ausschleuseeffizienz (nahezu 100 % im Zentrat) zurückzuführen.

#### Szenario 3:

- Die Struvitfällung im Zentrat (Hydrolysat) mit forcierter Rücklösung (bei 1,5 % TR) vor der Eindickung und der Faulung wird hinsichtlich dem KEA als positiv bewertet.
- In der Wirkungskategorie GWP steigt der Strombedarf des Fällreaktors durch die hohe zu behandelnde Zentratmenge aus der maschinellen Eindickung stark an.
- Die P-Rückgewinnungsrate verdoppelt sich nahezu mit forcierter Rücklösung von 14 % auf 27 %.

#### Szenario 4:



- Die Fällung im Zentrat mit forcierter Rücklösung (bei 6,0 % TR) nach der Eindickung steigert die P-Rückgewinnungsrate auf 34 %.
- Der kumulative Energieaufwand und das GWP fallen negativ aus. Dies geht auf den hohen zusätzlichen Chemikalien- und Polymerbedarf sowie den zusätzlichen Stromverbrauch für die Schlammbehandlung zurück.

Bei allen Verfahren wird die AbfklärV 2017 mit den Annahmen dieser Studie nicht eingehalten, auch wenn die P-Konzentration im Klärschlamm teils deutlich reduziert wird (25 g P/kg TR). An einzelnen Standorten könnten Verfahrenskombinationen mit Hydrolyse die Abfklär 2017 einhalten.

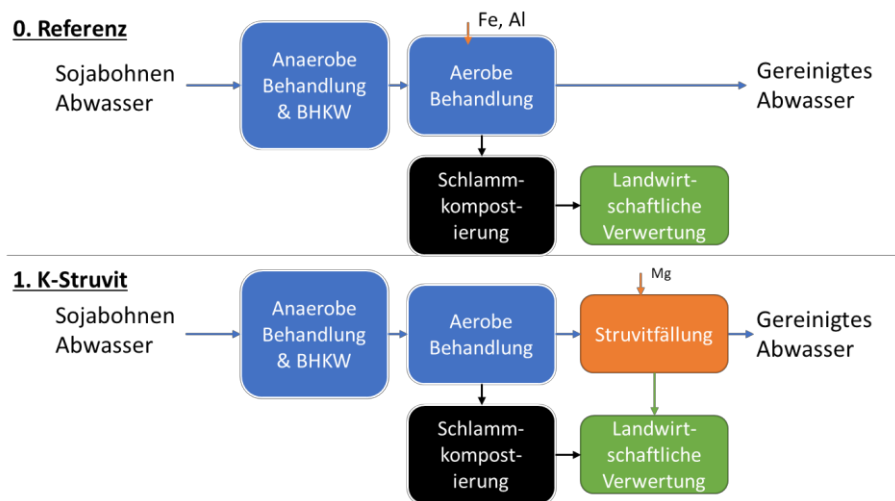
#### **II.1.2.6. K-Struvit Ökobilanz**

##### Definition des Ziel- und Untersuchungsrahmens

Das Ziel der Ökobilanz ist die „ökologische Bewertung der Rückgewinnung von K-Struvit aus industriellem Abwasser einer Sojabohnenfabrik“. Dabei werden die zu erwartenden Nebeneffekte einer Struvitrückgewinnung auf den Betrieb der Kläranlage (KA) und auf die Schlammbehandlung berücksichtigt. Die funktionelle Einheit der Ökobilanz wird definiert als „Betrieb der Abwasserbehandlung je m<sup>3</sup> Industrieabwasser“. Die Systemfunktion beinhaltet die Behandlung von 1.020.000 m<sup>3</sup> Industrieabwasser (CSB-Zulaufkonzentration: 17.000 mg/L). Die P-Fracht dieser Anlage liegt bei 163 t P/a. Das entspricht etwa einer P-Fracht von etwa 260.000 Einwohnerwerten pro Jahr.

Die Systemgrenzen umfassen eine anaerobe Vorbehandlung des Abwassers, die aerobe Behandlung, sowie die nachgeschaltete Struvitgewinnung. Ebenso wird die Schlammbehandlung bestehend aus der Entwässerung und der Schlammkompostierung mitberücksichtigt. Es werden alle zusätzlichen Aufwendungen und Auswirkungen der Abwasser- und Schlammbehandlung sowie auf die Biogasproduktion und Kompostierung durch die Struvitgewinnung berücksichtigt. Für die Menge an Phosphor und Kalium im K-Struvit wird konventioneller Dünger gutgeschrieben. Alle wesentlichen Hintergrundprozesse werden erfasst. Dazu gehört die Produktion von Strom, Wärme, Brennstoffe und Chemikalien. Die zusätzliche Infrastruktur durch die Implementierung eines Fällungsreaktors wird nicht berücksichtigt.

In der Ökobilanz wird die Referenzkläranlage ohne Struvitrückgewinnung mit einer Kläranlage mit nachgeschalteter Struvitrückgewinnung verglichen. Dabei wird die Struvitrückgewinnung im Ablauf der aeroben Behandlung realisiert. Im Gegenzug wird auf den Einsatz von Fällmitteln in der aeroben Behandlung zur P-Entfernung verzichtet (Abbildung 12). Die P-Rückgewinnungsrate des Verfahrens beträgt etwa 32 % bezogen auf den Kläranlagenzulauf.



**Abbildung 12: Übersicht der Szenarien für die K-Struvit-Ökobilanz – Szenarien: 0. Referenz-Kläranlage, 1. Nachgeschaltete K-Struvitfällung**

### Ergebnisse und Interpretation der K-Struvit Ökobilanz

#### Nicht-erneuerbarer kumulierter Energieaufwand aus fossilen und nuklearen Ressourcen (KEA) und Treibhausgaspotential (GWP)

Das Referenzszenario weist einen netto KEA von  $-120 \text{ MJ/m}^3$  auf, was sich aus Aufwendungen von  $+57 \text{ MJ/m}^3$  und Gutschriften von  $-177 \text{ MJ/m}^3$  ergibt (Abbildung 13). Die Aufwendungen bestehen hauptsächlich im Stromverbrauch der aeroben Behandlung. Die Gutschriften bestehen im Referenzszenario aus der Energiegutschrift für das Faulgas (als Resultat der hohen CSB-Zulaufkonzentration). Die Implementierung einer nachgeschalteten K-Struvitfällung sinkt der Netto-KEA geringfügig, da Fällmittel eingespart werden und eine zusätzliche Energiegutschriften für die rückgewonnen Nährstoffe P und K gutgeschrieben werden. Der netto KEA von  $-122 \text{ MJ/m}^3$  setzt sich aus Aufwendungen von  $59 \text{ MJ/m}^3$  und Gutschriften von  $-181 \text{ MJ/m}^3$  zusammen. Somit steigen letztlich Aufwand und Nutzen jeweils geringfügig an. Letztlich bewegen sich die absoluten Veränderungen allerdings im Rahmen der Unschärfe und die K-Struvitfällung kann als energieneutral gegenüber dem Klärwerksbetrieb im Referenzzustand gesehen werden.

Hinsichtlich des Treibhausgaspotentials weist der Referenzzustand ein netto GWP von  $-0,3 \text{ kg CO}_2\text{-Eq/m}^3$  Abwasser auf. Die Aufwendungen mit  $6,7 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$  setzen sich aus dem Stromverbrauch (vorwiegend der aeroben Stufe) und Direktmissionen zusammen. Sowohl bei der Schlammkompostierung als auch bei der anoxisch/aeroben Stufe entsteht das Treibhausgas Lachgas, welches eine signifikante Wirkung auf das Treibhausgaspotential hat. Gegenüber der Referenz sinken analog zum KEA die Gesamtemissionen geringfügig auf netto  $-0,6 \text{ kg CO}_2\text{-Eq/m}^3$ . Dies liegt wiederum an dem geringeren Fällmitteleinsatz und der Gutschrift durch rückgewonnene Dünger.

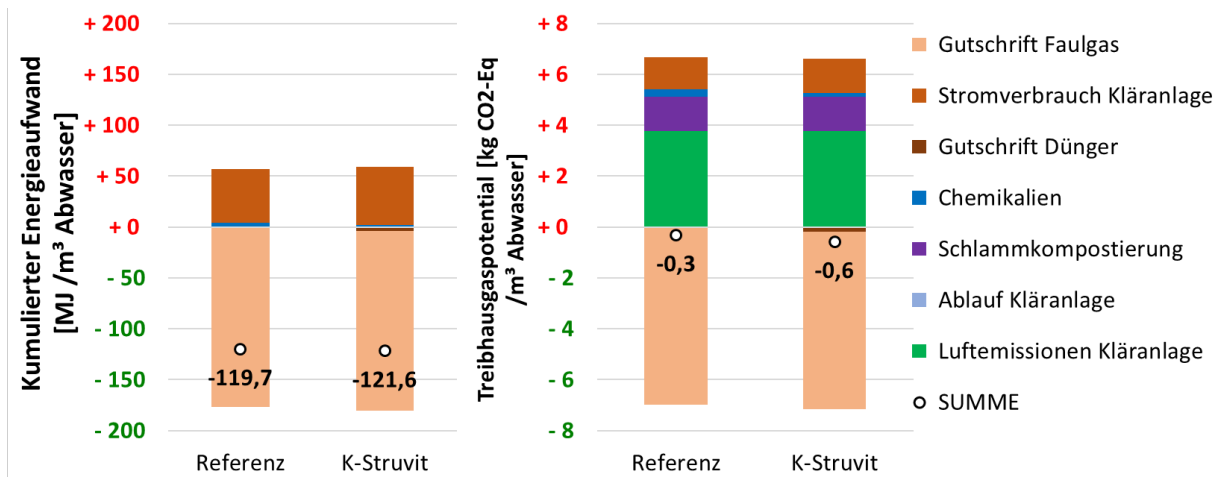


Abbildung 13: Kumulierter nicht-erneuerbarer Energieaufwand fossiler und nuklearer Ressourcen sowie Treibhausgaspotential der Industriekläranlage mit und ohne K-Struvit-Rückgewinnung

### Süßwassereutrophierungspotential (FEP)

Das Süßwassereutrophierungspotential (Abbildung 14) ist nahezu ausschließlich durch P-Emissionen im Kläranlagenablauf beeinflusst. Der Referenzzustand mit Simultanfällung durch Fällmittel weist ein FEP von 3,3 g P-Eq/m<sup>3</sup>, respektive einen Ablaufwert 3,4 mg P/L auf. Die K-Struvitfällung einen Wert von absolut 11,0 g P-Eq/m<sup>3</sup>, respektive einen Ablaufwert von 11,2 mg P/L auf. Die Reduktion des Nettowertes gegenüber dem Ablaufwert resultiert aus der Gutschrift im Bereich Strom- und Wärmebereitstellung durch Faulgas. Letztlich zeigt sich, dass die K-Struvitfällung eine geringe Fällungseffizienz als die Simultanfällung mit Eisen/Aluminium aufweist und das K-Struvit ein höheres Löslichkeitsprodukt aus Strengit (FePO<sub>4</sub>) oder Variszit (AlPO<sub>4</sub>) hat. Daher ist bei einer großtechnischen Implementierung ebenso eine Nachfällung mit Eisen(III)chlorid oder Aluminiumchlorid im Anschluss an die K-Struvitfällung ratsam. Diese würde es ermöglichen, bei moderaterem Fällmitteleinsatz als in der Simultanfällung (und entsprechendem geringeren Aufwand in Bezug auf KEA, GWP) eine höhere P-Entfernung zu erreichen und entsprechend das FEP weiter zu reduzieren.

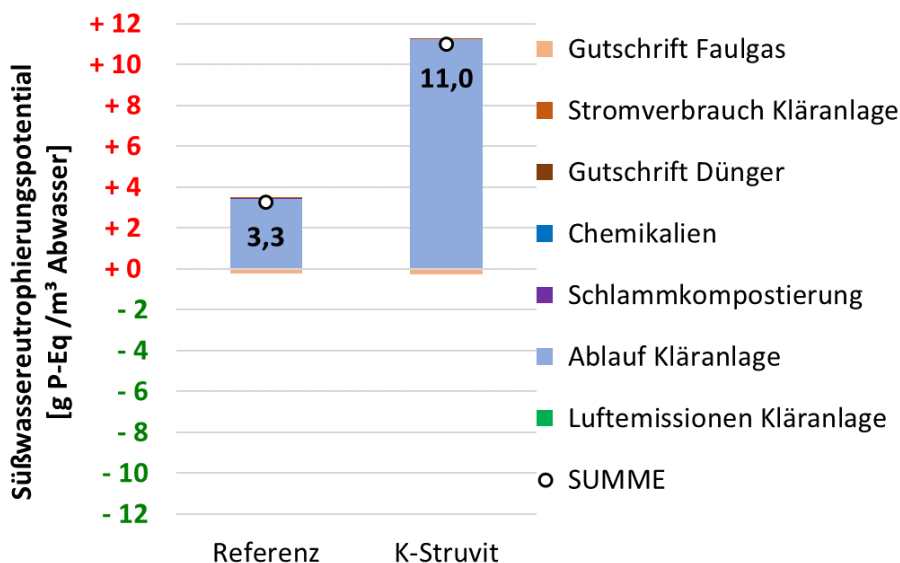


Abbildung 14: Süßwassereutrophierungspotential der Industriekläranlage mit und ohne K-Struvit-Rückgewinnung

## Interpretation

Die Behandlung von Industrieabwasser mittels anaeroben Verfahrens resultiert in einer Energiepositiven Behandlung, wobei je nach substituiertem Strom- und Wärmemix auch mit der Behandlung korrespondierende Treibhausgasemissionen komplett ausgeglichen werden können. Hinsichtlich der Ablaufwerte der aeroben Stufe ist deren Verbesserung oder eine Nachbehandlung in einer kommunalen Kläranlage erforderlich, da die Ablaufwerte nicht mit den Reinigungszielen entsprechend der Wasserrahmenrichtlinie vereinbar sind. Das vergleichsweise hohe Versauerungspotential (TAP) resultiert vorwiegend aus Ammoniakemissionen bei der Schlammkompostierung. Hier wäre eine Nachbehandlung des Gases ratsam.

Die Implementierung einer nachgeschalteten K-Struvitfällung ist aus der ökologischen Perspektive weitestgehend aufwandsneutral zu realisieren und verspricht geringfügige Verbesserungen in nahezu allen Wirkungsindikatoren. Lediglich hinsichtlich der P-Emissionen (FEP) führt die nachgeschaltete Struvitfällung aufgrund der geringeren Fällungseffizienz gegenüber der Simultanfällung mit Eisen bzw. Aluminium zu höheren Emissionen in die Umwelt, welche jedoch durch eine Nachfällung wiederum reduziert werden könnten (Tabelle 3).

**Tabelle 3: Umweltwirkungen verschiedener Schlammbehandlung mit und ohne Struvit-Rückgewinnung**

Wirkungskategorie	KEA	GWP	TAP	FEP	MEP
<b>Einheit pro m<sup>3</sup> Industrieabwasser</b>	<b>MJ</b>	<b>g CO<sub>2</sub>-Eq</b>	<b>g SO<sub>2</sub>-Eq</b>	<b>g P-Eq</b>	<b>g N-Eq</b>
Referenzszenario	-119,7	-312	235	3,3	31,5
K-Struvit	-121,6	-573	232	11,0	31,2

### **II.1.2.7. Schlussfolgerungen**

Es wurden Kriterien hinsichtlich der Produktion und Charakteristika bezüglich der landwirtschaftlichen Anwendung von sogenannten Düngern der nächsten Generation definiert. Dünger der nächsten Generation sollten weitestgehend aus energieeffizient recycelten Nährstoffen zusammengesetzt sein. Zudem sollten Dünger der nächsten Generation eine höhere Nutzungseffizienz und geringere Emissionen als konventionelle Dünger aufweisen.

Die Experimentelle Untersuchungen zur Chemie der Dünger der nächsten Generation zeigten Rückschlüssen auf deren Wirkung in der landwirtschaftlichen Anwendung. So zeigen sich verzögerte kinetische Freisetzung von Nährstoffen und unterschiedliche Löslichkeiten in Abhängigkeit des pH-Wertes. Die Dünger AshDec und Struvit können als langsam wirkende Pooldünger mit Slow-Release-Eigenschaften aufgefasst werden.

Eine ganzheitliche ökologische Bewertung von Produktion und Anwendung der Dünger der nächsten Generation im Vergleich zu konventionellen Düngemitteln mit der Methode der Ökobilanz ergab, dass Treibhausgaspotential und Rückgewinnungsrate sich gegenseitig beeinflussen. So ist beispielsweise Struvit mit einer geringen Rückgewinnungsrate treibhausgasneutral herzustellen. Wird die

Rückgewinnungsrate gesteigert (z.B. durch das AshDec-Verfahren) sind höhere Aufwendungen erforderlich, welche wiederum ein höheres Treibhausgaspotential verursachen.

## II.2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung des zahlenmäßigen Nachweises des KWB im Projekt CLOOP (Teilprojekt 031 B 0477B)

**Tabelle 4: Bescheide und Ausgaben des CLOOP (Teilprojekt 031 B 0477B)**

Position	Zuwendungsbescheid [€]	Umwidmungsbescheid [€]	Ausgaben [€]
0812 Beschäftigte E12-E15	293.537,00 €	283.537,00 €	299.827,00 €
0822 Beschäftigungsentgelte	12.000,00 €	12.000,00 €	13.545,94 €
Summe A	305.537,00 €	295.537,00 €	313.372,94 €
0843 Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	30.554,00 €	40.554,00 €	30.359,87 €
0846 Dienstreisen	11.754,00 €	11.754,00 €	5.664,82 €
Summe B	42.308,00 €	52.308,00	36.024,69 €
Summe C	5.514,00 €	5.514,00 €	5.515,43 €
<b>Gesamtausgaben</b>	<b>353.359,00 €</b>	<b>353.359,00 €</b>	<b>354.913,06</b>

## II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten und die finanziellen Mittel wurden entsprechend den Arbeitspaketen und an die im Verlauf des Projektes erhaltenen Ergebnisse ausgerichtet.

## II.4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens

### Kompetenzerweiterung:

Als Forschungsinstitution konnte das KWB seine Kompetenz im Bereich Schlammbehandlung, Klärschlamm Entsorgung, Aschebehandlung, Abwasserbehandlung und Ökobilanzierung erweitern. Die praktischen Versuche führten zudem zu einem besseren Verständnis der Wirkweise von Düngemitteln der nächsten Generation. Die Ergebnisse dazu sind im Schlussbericht dargestellt.

### Förderung von Folgeprojekten:

KWB ist bezüglich des Themas Nährstoffrückgewinnung sehr gut aufgestellt und ist durch seine langjährige Forschung am Thema Phosphorrückgewinnung in der Lage, Klärwerksbetreiber diesbezüglich zu beraten. So wurden einige Beratungsleistungen beispielsweise für die Berliner Wasserbetriebe erbracht. Das KWB ist darüber hinaus in das Projekt „R Rhenania“ des BMBF-Vorhabens „RePhoR“ im Rahmen des Förderprogramms "Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA3)" eingebunden. In diesem Projekt soll erstmalig das AshDec-Verfahren großtechnisch realisiert werden. Das KWB führt in seinem Teilprojekt die Risikobewertung des Düngers, sowie die Öko- und Kostenbilanzierung des Verfahrens durch. Darüber hinaus ist das KWB in verschiedenen EU-Projekten als Partner aktiv in dem die ökobilanzielle Bewertung von großtechnischen Struvit-Verfahren durch das KWB erfolgt. Weitere Projekte zu offenen Fragestellungen aus dem CLOOP Projekt befinden sich in Entwicklung.

## **II.5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es ist davon auszugehen, dass in anderen Projekten (z.B. im Rahmen der „RePhoR“ Fördermaßnahme) Fortschritte erzielt wurden. Diese sind zum jetzigen Stand dem KWB nicht bekannt. Es wurden allerdings keine Fortschritte von anderen Stellen, speziell auf das AshDec- oder Struvit-Verfahren erzielt, die den bisher erzielten Ergebnissen des KWB widersprechen.

## **II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Vorträge bzw. Buchkapitel wurden zu Teilaspekten im Rahmen verschiedener Schriften veröffentlicht. Näheres ist dem Verwertungsplan zu entnehmen.

### III. Erfolgskontrollbericht

#### III.1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die Durchführung des Projektes „CLOOP – Closing the global nutrient loop“ (Teilprojekt B) im Rahmen der BMBF-Förderinitiative "Bioökonomie International" hatte zum Ziel mögliche Verfahren zur Phosphorrückgewinnung sowie deren Produkte ökologisch zu bewerten. Die mögliche Anwendung entsprechender Rezyklate im internationalen Kontext wurde hierbei durch die ausländischen Partner geprüft. Die Vorzüge von Düngern der nächsten Generation insbesondere auf sauren, eisenhaltigen Böden konnten durch die Projektpartner bestätigt werden. Hinsichtlich der Schließung globaler Nährstoffflüsse zeigt sich durch einfache Abschätzungen, dass diese durch die Schließung regionaler Nährstoffkreisläufe und ausgeglichener Außenhandelsbilanzen bezüglich des N- und P-Saldos am effizientesten erreicht werden kann. Die Rückführung von Nährstoffrezyklaten aus Europa in Drittländer, welche hohen Mengen an Futter- und Nahrungsmitteln nach Europa exportieren, ist nicht zielführend, da durch den Transport mit gravierenden Mehremissionen beim Treibhausgaspotential zu rechnen ist. Insofern Bedarf es in Deutschland, in Europa und im Nicht-EU-Ausland regionaler Konzepte zum Nährstoffrecycling.

#### III.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist in Kapitel II.1.2 zu finden. Im Folgenden werden die Schlussfolgerungen kurz und prägnant dargestellt.

- **Düngerproduktion:** Die Schließung von Nährstoffkreisläufen durch Einsatz erneuerbarer Ressourcen und ein aktives Nährstoffrecycling ist im Zuge einer weitergehenden Kreislaufwirtschaft erforderlich. Allerdings müssen gewisse Randbedingungen aus ökologischer Sicht gegeben sein. Es erscheint nicht vielversprechend deutlich höhere Treibhausgasemissionen in Kauf zu nehmen nur um Nährstoffe zurückzugewinnen, sofern die konventionelle Düngemittelproduktion aus fossilen Ressourcen entsprechende Dünger mit geringeren Treibhausgasemissionen herstellen kann. Die vorliegende Studie zeigt einerseits, dass Nährstoffrecycling treibhausgasneutral realisiert werden kann, andererseits werden vereinzelt konkrete Handlungsfelder aufgezeigt. Beispielsweise wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck beim AshDec-Verfahren einerseits durch den Brennstoff (Erdgas) und andererseits durch die Natriumsalze verursacht. Letzter resultiert aus dem Kalkbrennen in der Prozesskette. Im Zuge der Dekarbonisierung der chemischen Industrie sind entsprechende Prozesse neu zu bewerten, da sich einerseits der Fußabdruck von Recyclingdüngern verbessern wird und andererseits auch der Fußabdruck konventioneller Düngemittel. Letztlich sind politische Ziele wie die Vermeidung der Klimakatastrophe, die effiziente Kreislaufwirtschaft von Nährstoffen und die Bestrebung einer schadstofffreien Wirtschaft (EU Zero Pollution Ambition) untereinander zu priorisieren, da in den Ökobilanzierungen deutlich wird, dass Zielkonflikte zwischen diesen verschiedenen Zielen bestehen und i.d.R. nicht durch weitere Techniken nivelliert werden können.
- **Düngemittelanwendung und -wirkweise:** Hinsichtlich einer höheren Nutzungseffizienz auf Ackerböden zeigt das Projekt CLOOP interessante Möglichkeiten auf. Da die P-Düngung eine

Pooldüngung ist und der Nährstoff lediglich vorhanden und pflanzenverfügbar sein muss, nicht aber wasserlöslich, stellt sich die berechtigte Frage, inwieweit wasserlösliche P-Dünger, welche zwar sofort verfügbar sind, allerdings auch schnell umgelagert und festgelegt werden können, zu einer suffizienten Düngung noch passen. Betrachtet man das Gesamtsystem holistisch, so ergeben sich für die EU etwa 600 kt P/Jahr in Abwässern und Schlämmen, hingegen werden rund 900 kt P/Jahr in Böden akkumuliert. Wird von der Schließung der Nährstoffkreisläufe gesprochen, so wird Recycling aus Abfallströmen politisch gefordert, die „Ineffizienz“ bei der Düngemittelanwendung jedoch eher billigend in Kauf genommen. Letztlich wird durch Recycling der Nährstoffkreislauf nicht allein geschlossen werden können. Eine höhere Nutzungseffizienz hingegen führt zu einem geringeren Verbrauch von Ressourcen und geringeren Emissionen in die Umwelt. Gerade hier können die Produkte AshDec und Struvit interessante chemische Charakteristika aufweisen, welche weiter im Hinblick auf eine höhere Nutzungseffizienz von P-Düngern erforscht werden müssen. Zudem muss der Wissenstransfer diesbezüglich in die Praxis (Landwirtschaftskammern etc.) deutlich gestärkt werden.

- **Ökobilanzieller Vergleich der Recyclingwege:** Prinzipiell können vergleichend folgende Aussagen getroffen werden. Das AshDec-Verfahren ermöglicht das P-Recycling mit hohen Rückgewinnungsraten, ist allerdings hinsichtlich des Treibhausgaspotentials mit gewissen Aufwendungen verbunden und weist gewisse Schwermetallgehalte auf. Konkurrierende nasschemische Ascheverfahren mit ähnlich hohen Rückgewinnungsraten weisen in der Regel deutlich geringere Schwermetallgehalte auf, sind allerdings hinsichtlich des Treibhausgaspotentials deutlich aufwendiger. Struvit (als N- oder K-Struvit) weist eine deutlich geringere Rückgewinnungsrate auf, dafür sind allerdings die Treibhausgasbilanz neutral und die Schwermetallgehalte gering. Werden Wege beschritten die Struvitrückgewinnungsrate zu steigern (siehe Kapitel II.1.2.5) steigen die Aufwendungen und i.d.R. auch das Treibhausgaspotential.

### III.3. Fortschreibung des Verwertungsplans

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.

Aus dem Projekt CLOOP resultierten keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen durch KWB.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) -z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).

Die wirtschaftliche Verwertung der Erkenntnisse hinsichtlich des AshDec-Verfahrens obliegt den Patentinhabern. KWB verfolgt die Beratung bzgl. P-Rückgewinnung/Ökobilanzierungen für seine Zielgruppe die Klärwerksbetreiber. Der Projektleiter Herr Kraus ist u.a. durch die Erfahrungen in CLOOP



dazu befähigt Beratungen durchzuführen. Dies belief sich im Zeitraum des Projektes CLOOP auf 6 Aufträge. Aktuell sind keine neuen Beratungsaufträge in Planung.

- *Welche der in der Vorhabensbeschreibung genannten Verwertungsmöglichkeiten konnten umgesetzt werden?*

- *Vorhabensbeschreibung:*

- 2 Anträge im 8. FP der EU (Horizon2020 2018-2020, verstärkte internationale Ausrichtung erwartet)
- Entwicklung eines Konzepts für eine Modellkläranlage für die Berliner Wasserbetriebe; EU Life-Antrag zur Kofinanzierung.
- Antrag für eine erwartete BMBF-Ausschreibung zum Thema „Nährstoffrückgewinnung“.
- Auftrag der Global Water Research Coalition (GWRC) zum Thema „P-Recycling“.

- *Aktueller Stand:*

- KWB beantragte als Koordinator im Jahr 2018 ein EU-Projekt im Call SC5-11-2018 „Digital solutions for water“ – Der Vollertrag wurde positiv bewertet und das Projekt befindet sich in der Umsetzung.
- KWB beantragte im Jahr 2019 als Koordinator ein EU-Projekt im Call SC5-04-2018 „Building a water-smart economy and society“ – die Skizze wurde abgelehnt.
- KWB beantragte im Jahr 2020 als Koordinator ein EU-Projekt im Call CE-RUR-08-2020 „Closing nutrient cycles“ – Die Skizze wurde positiv bewertet, der Vollertrag wurde bewertet und das Projekt befindet sich auf der Warteliste. Eine Förderung erscheint unwahrscheinlich.
- Die Entwicklung eines Konzepts für eine Modellkläranlage wurde seitens der Berliner Wasserbetriebe nicht weiterverfolgt, sodass kein Antrag gestellt wurde. Allerdings gehen Erkenntnisse aus den Projekten des KWB in den Neubau des Klärwerks Berlin-Stahnsdorf ein.
- KWB beantragte im Jahr 2018 eine Konzeptphase in der BMBF-Ausschreibung „RePhoR – Regionales Phosphor Recycling“ – der Antrag wurde positiv bewertet und das Projekt bePhor wurde gemeinsam mit den Berliner Wasserbetrieben durchgeführt.
- KWB erhielt einen Folgeauftrag der Berliner Wasserbetriebe, bei dem es um die Beratung hinsichtlich deren P-Recyclingstrategie, Öko- und Kostenbilanzen für den Standort Berlin und das zukünftige Verwerten von 33.500 Jahrestonnen Klärschlammasche geht.
- KWB war als Partner in zwei Anträgen im Jahr 2019 für die Umsetzungsphase in der BMBF-Ausschreibung „RePhoR – Regionales Phosphor Recycling“ beteiligt, von denen einer positiv bewertet und einer abgelehnt wurde. Daraus ging das von der BAM koordinierte Projekt R-Rhenania hervor, an dem auch Partner des Projektes CLOOP beteiligt sind.
- KWB erhielt einen Auftrag der GWRC (Global Water Research Coalition) zum Thema „P-Recycling“.

- KWB erhielt einen Auftrag der Gelsenwasser AG zur Beratung über die Marktpotentiale von verschiedenen P-Rezyklaten im Speziellen Phosphorsäure und Calciumphosphate

- *Welche Projektergebnisse konnten nicht wirtschaftlich verwertet werden und warum?*

Projektergebnisse, welche neue wissenschaftliche Fragestellungen aufweisen, müssen zunächst erforscht werden und können nicht direkt wirtschaftlich verwertet werden. Hier ist insbesondere die Fragestellung der genauen Wirkweise der Dünger der nächsten Generation zu nennen. Es müssen in Folgeprojekten stärker die spezifischen Vorteile gegenüber konventionellen Produkten verstärkt herausgearbeitet werden.

- *Welche neuen Verwertungswege sind hinzugekommen?*

Insbesondere Auftragsarbeiten zu verschiedenen Aspekten mit Bilanzierungen im Bereich Schlammbehandlung. Neben den o.g. Aufträgen wurden u.a. die Berliner Wasserbetriebe und ein dänischer Kläranlagenbetreiber hinsichtlich der Schlammverwertung und Treibhausgasminimierung bei der Schlammverwertung beraten.

- *Welche Zwischenschritte sind für die weitere Verwertung erforderlich?*

Hinsichtlich der o.g. Forschungsfragen, sind geförderte Folgeprojekte denkbar und z.T. in Konzeption. Hinsichtlich der Beratungsaufträge ist die Vernetzung des KWB zu stärken, sodass KWB häufiger von Kläranlagenbetreibern für Beratungsaufträge angefragt wird. Letztere Strategie wird aktiv durch das KWB verfolgt.

- *Wie kann der Wirtschaftsstandort Deutschland durch die Erkenntnisse gestärkt werden?*

Einerseits plant die Firma Outotec in Deutschland die erste großtechnische AshDec-Anlage. Zum anderen werden die Erkenntnisse aus CLOOP dazu beitragen, dass die Vorgaben zur P-Rückgewinnung in Deutschland erfüllt werden können und in diesem Zuge eine P-basierte Industrie in Deutschland wiederaufgebaut wird. Damit einher gehen Industriezweige für entsprechende Betriebsmittel zum P-Recycling (Säureindustrie etc.)

- c) *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen.*

Das KWB hat sein Wissen im Bereich Phosphorrückgewinnung aus Klärwerken weiter vertieft und einen sehr guten Überblick über aktuelle deutsche (und europäische) Entwicklungen gewonnen. Dadurch kann sich das KWB auf Beratungsaufträge und weitere Forschungsvorhaben in diesem Bereich bewerben und auf Grund der Erfahrungen qualitativ hochwertige Arbeit liefern. Der Zeithorizont für die Beratungstätigkeit wird zunächst auf 2023 gesetzt, da sich bis dahin die meisten Klärwerke und Verbände für eine Strategie entschieden haben müssen, um rechtzeitig die P-Rückgewinnung durchführen zu können.

Aufgrund der hohen Expertise im Bereich der rechtlichen Rahmenbedingungen und einer detaillierten Verfahrensübersicht über P-Rückgewinnungsverfahren, ist die Mitarbeit des KWBs in Projekten mit vergleichbaren Themen bereits angefragt worden.

- d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse.

Das KWB ist ein Forschungsinstitut und wird daher die FE-Ergebnisse weitergeben, aber nicht direkt umsetzen.

#### **III.4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

- Die in Kapitel II.1.2.2 beschriebenen Verbesserungsmöglichkeiten für die Recyclingprodukte sind starken ökonomischen Limitierung ausgesetzt, sodass eine weitere Verfolgung der beschriebenen Optionen (insb. 1 & 3) unwahrscheinlich erscheint.
- Die in Kapitel II.1.2.3 beschriebenen Ergebnisse der Experimente zeigen eine gewisse aber nicht eine absolute Übereinstimmung mit den Modellvorstellungen. Hier sind wie o.g. weitere Forschungsvorhaben anzustreben um die Wirkweise der Dünger der nächsten Generation genauer zu verstehen. Zudem konnten in den Experimenten keine Emissionsfaktoren für die neuartigen Dünger abgeleitet werden, was letztlich somit auch nicht in der Ökobilanz berücksichtigt werden konnte.
- Die in Kapitel III.1 und in der Vorhabenbeschreibung angesprochene Schließung des globalen Nährstoffkreislaufs durch Rücktransport von recycelten Düngemitteln wurde verworfen, da die Aufwendungen für den Transport diesen nicht rechtfertigt. Es sind wie angemerkt, jeweils regionale Nährstoffkreisläufe zu schließen um die Gesamtsituation zu verbessern.

#### **III.5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**

Die Forschungsergebnisse und Projektberichte werden potentiellen Nutzern auf dem Publikationsserver des KWB (<https://publications.kompetenz-wasser.de/de/publication/>) zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus finden regelmäßig öffentliche Kolloquien, wie z.B. die Berliner Wasserwerkstatt statt (<https://www.kompetenz-wasser.de/de/veranstaltungen/>). Zudem präsentiert das KWB seine Forschungsergebnisse regelmäßig auf Anwenderkonferenzen, wie die der DWA, z.B. im Jahr 2021 DWA Klärschlammstage, DWA Netzwerktage NordOst, DWA Phosphor – ein kritischer Rohstoff mit Zukunft.

#### **III.6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Kostenplanung wurde eingehalten, allerdings gab es eine kostenneutrale Umwidmung von der Position 0812 zur Position 0843, welche genehmigt wurde. Zudem wurde eine kostenneutrale Projektverlängerung beantragt, welche ebenfalls genehmigt wurde.

#### IV. Kurzfassung (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel  Schlussbericht  Schließen globaler Nährstoffkreisläufe durch Weiterentwicklung der Recyclingdünger AshDec und Struvit zu Düngern der nächsten Generation (CLOOP)		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Kraus, Fabian  Conzelmann, Lea	5. Abschlussdatum des Vorhabens  30.04.2021	
	6. Veröffentlichungsdatum  31.10.2021	
	7. Form der Publikation  Bericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH  Cicerostr. 24  10709 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen:  031 B 0477B	
	11. Seitenzahl  38	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF)  53170 Bonn	13. Literaturangaben  10	
	14. Tabellen  4	
	15. Abbildungen  14	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		

#### 18. Kurzfassung

Das Projekt „CLOOP – Closing the global nutrient loop“ setzte sich die Ambition die Nährstoffkreisläufe durch Weiterentwicklung, Erforschung und Verbesserung der Recyclingdünger aus dem AshDec-Verfahren und Struvit aus Fällungsverfahren zu schließen.

Es wurden Kriterien hinsichtlich der Produktion und Charakteristika bezüglich der landwirtschaftlichen Anwendung von sogenannten Düngern der nächsten Generation definiert. Dünger der nächsten Generation sollten weitestgehend aus energieeffizient recycelten Nährstoffen zusammengesetzt sein. Zudem sollten Dünger der nächsten Generation eine höhere Nutzungseffizienz und geringere Emissionen als konventionelle Dünger aufweisen.

Die Experimentelle Untersuchungen zur Chemie der Dünger der nächsten Generation zeigten Rückschlüssen auf deren Wirkung in der landwirtschaftlichen Anwendung. So zeigen sich verzögerte kinetische Freisetzung von Nährstoffen und unterschiedliche Löslichkeiten in Abhängigkeit des pH-Wertes. Die Dünger AshDec und Struvit können als langsam wirkende Pooldünger aufgefasst werden.

Eine ganzheitliche ökologische Bewertung von Produktion und Anwendung der Dünger der nächsten Generation im Vergleich zu konventionellen Düngemitteln mit der Methode der Ökobilanz ergab, dass Treibhausgaspotential und Rückgewinnungsrate sich gegenseitig beeinflussen. So ist beispielsweise Struvit mit einer geringen Rückgewinnungsrate treibhausgasneutral herzustellen. Wird die Rückgewinnungsrate gesteigert (z.B. AshDec) sind höhere Aufwendungen erforderlich, welche wiederum ein höheres Treibhausgaspotential verursachen.

Die Arbeiten und Ergebnisse des KWB werden im vorliegenden Bericht ausführlich erläutert.

#### 19. Schlagwörter

Phosphor, Klärschlamm, Klärschlammasche, AshDec, Struvit, Dünger, Recycling, Rückgewinnung

#### 20. Verlag

#### 21. Preis

## Literatur

1. Kraus, F., et al., *Phorwärts Abschlussbericht: Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung*. 2019, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH, Proman Management GmbH, Umweltbundesamt, Julius Kühn Institut: UBA Texte 13/2019.
2. Kraus, F., et al., *Einsatzmöglichkeiten für Nährstoffzyklate im Ökolandbau - Abschlussbericht des Projektes nurec4org*. 2019, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.
3. Fixen, P., et al., *Nutrient/Fertilizer Use Efficiency: Measurement, Current Situation and Trends*, in *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification*, P. Drechsel, et al., Editors. 2014, International Fertilizer Industry Association, International Water Management Institute, International Plant Nutrition Institute, International Potash Institute: Paris.
4. EEA, *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016 - Part 3 D Crop production and agricultural soils*. 2016, European Environmental Agency: Brussels.
5. Brentrup, F. and C. Pallière, *Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions in European Nitrogen Fertilizer Production and Use*. 2014, Fertilizers Europe: Yara International.
6. ReCiPe, *ReCiPe 2008 Version 1.08 - Characterization factors belonging to the report, from excel-file ReCiPe108.xlsx*. 2012.
7. Hunze, M., et al., *Entwicklung, Optimierung und Test eines neuen Sandfangkonzeptes, Abschlussbericht, Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt AZ 29569-24/2*. 2013.
8. Jönsson, K. and J.I.C. Jansen, *Hydrolysis of Return Sludge for Production of Easily Biodegradable Carbon – Effect of Pre-treatment, Sludge Age and Temperature*. *Water Science & Technology*, 2006. **53**(12): p. 47-54.
9. VDI, *VDI-Richtlinie 4600: 2012-01: Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Berechnungsmethoden 2012*, Beuth Verlag: Berlin.
10. Goedkoop, M.J., et al., *ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. 2009, Ministerie Van Volkshuisvesting: Den Haag.