



Technische Universität Berlin  
Fakultät III - Prozesswissenschaften  
Institut für Technischen Umweltschutz  
Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie

## Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc.)

# **Recycling Performances in sanitären Nährstoffkreisläufen**

vorgelegt von:

Clara Madalena Bahrs



1. Gutachterin:

Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter

2. Gutachter:

Albrecht Fritze M.Sc

Betreuung:

Elsa Jung M.Sc, Albrecht Fritze M.Sc

Abgabedatum:

23. Dezember 2022

# Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Ausführungen, die anderen veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, habe ich kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Fassung noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift



Fakultät III Prozesswissenschaften  
Institut für technischen Umweltschutz

Fachgebiet Abfallwirtschaft

Fachgebietsleitung  
**Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter**

Sekretariat Z 2 Raum Z 102  
Straße des 17. Juni 135  
10623 Berlin

Telefon +49 (0)30 314-22619  
Telefax +49 (0)30 314-21720  
Vera.rotter@tu-berlin.de

## Abtretung der Nutzungsrechte der Arbeit

1. Ich, \_\_\_\_\_, räume der Technischen Universität Berlin, Fakultät III, Fachgebiet Abfallwirtschaft, Leitung Frau Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter (nachfolgend Hochschule genannt) die zum Gebrauch meiner Arbeit mit dem Titel \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

in Forschung und Lehre erforderlichen Nutzungsrechte ein, soweit die Hochschule zur Nutzung durch die gesetzlichen Schrankenbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes nicht ohnehin berechtigt ist.

Die Nutzungsrechte verstehen sich als einfache, unentgeltliche, zeitlich, örtlich und inhaltlich unbeschränkte und unwiderrufliche Nutzungsrechte. Sie umfassen das Vervielfältigungsrecht, das Bearbeitungsrecht, das Ausstellungsrecht und das Recht der öffentlichen Wiedergabe sowie das Recht der Bearbeitung und betreffen alle bekannten und unbekanntem Nutzungsarten. Ich räume der Hochschule darüber hinaus das Recht ein, ihrerseits zustimmungsfrei Nutzungsrechte an der Arbeit auf Dritte zu übertragen.

2. Ich verpflichte mich, die Zustimmung der Hochschule einzuholen, soweit die Verwertung der Arbeit durch mich selbst unter Nennung der Hochschule erfolgen soll.

Berlin, den \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_

## Einwilligungserklärung zur Veröffentlichung personenbezogener Daten

### **Hintergrund:**

*Um ein Wissensnetzwerk zu schaffen und den Austausch von Wissen zu fördern, möchte das Institut des Technischen Umweltschutzes eine Datenbank mit Informationen zu angefertigten Bachelor- und Masterarbeiten auf der Internetseite des Instituts veröffentlichen.*

Hiermit erkläre ich mich bis auf Widerruf damit einverstanden, dass folgende personenbezogene Daten mit meinem Namen auf einem Server der TU Berlin gespeichert und im Internet veröffentlicht werden. Mir ist bewusst, dass diese Daten somit weltweit über das Internet abrufbar sind und auch externen Personen zur Verfügung stehen.

- Name, Vorname:

---

- Titel der Bachelor- / Masterarbeit:

---

- Name der Betreuer\*in:

---

- Abstract (*bitte der Einwilligungserklärung anhängen*)

Zusätzlich stimme ich zu, dass ich von meiner Betreuer\*in per E-Mail darüber informiert werde, falls externe Personen Rückfragen zu meiner Arbeit haben. Daraufhin kann ich dem direkten Kontaktaufbau zustimmen oder ihn ablehnen. Die E-Mail Adresse wird **nicht** veröffentlicht oder weitergegeben.

- E-Mail Adresse:

---

Die Erteilung der Einwilligung ist freiwillig. Aus der Verweigerung der Einwilligung oder ihrem Widerruf entstehen **keine** Nachteile. Mit Einwilligung entsteht kein Anspruch auf Veröffentlichung. Eine erteilte Einwilligung kann jederzeit schriftlich widerrufen werden. Soweit die Einwilligung nicht widerrufen wird, gilt sie zeitlich unbeschränkt. Einen etwaigen Widerruf der Einwilligung richten Sie bitte an das entsprechende Fachgebiet des Technischen Umweltschutzes.

Mit meiner Unterschrift bestätige ich, die Einwilligungserklärung gelesen zu haben und dieser zuzustimmen.

Berlin, den \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank für all diejenigen aussprechen, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit in den letzten Monaten unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Betreuer:innen, Albrecht Fritze und Elsa Jung, die den Prozess des Verfassens stets begleitet und die Arbeit begutachtet haben. Die regelmäßigen Treffen in der Anfangszeit sowie die hilfreichen Anregungen haben mir Struktur und Sicherheit gegeben, sodass ich Herausforderungen gut meistern konnte. Vor allem für die schnelle Hilfe und Beratung, nachdem ich gegen Ende des Schreibprozesses einen Rechenfehler entdeckte, sowie für die Verbesserungsvorschläge und die allzeit schnelle Beantwortung meiner Fragen in den letzten Wochen vor der Abgabe, möchte ich mich bedanken.

## Abstract

This thesis examines recycling performances in sanitary nutrient cycles. The recyclability of nutrients in faeces and urine will be analysed by comparing the collection in dry toilets with water toilets. It focusses on the research question how nutrients can be recovered from sanitary residuals in the most efficient and eco-friendly way to close nutrient cycles.

For this study, fertilizer production from dry-collected excreta by composting and urine treatment, as well as fertilizer production from sewage sludge, are analysed for nutrient losses, energy and water consumption. The study shows that per person per year 2 *kg* of nitrogen, 0.72 *kg* of phosphorus and 2.25 *kg* of potassium can be recovered from dry collected excreta. In contrast, 0.65 *kg* of phosphorus can be recovered from sewage sludge. For nitrogen and potassium, there are no established recovery methods yet. The energy consumption shows that the treatment of dry collected excreta is more energy intensive than phosphorus recovery from sewage sludge. The water consumption of a dry toilet is much lower than of a water toilet.

The results indicate that the use of dry toilets and the production of fertilizer from the faeces and urine is a good way to close the nutrient cycles, reduce environmental pollution and prevent water shortage. However, the implementation is unlikely due to the legal situation as well as the infrastructure.

## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von Recycling Performances in sanitären Nährstoffkreisläufen. Dazu wird die Recyclingfähigkeit der Nährstoffe in Fäkalien untersucht, indem die Sammlung in Trockentoiletten mit konventionellen Wassertoiletten verglichen wird. Es stellt sich die Forschungsfrage, wie Nährstoffe aus sanitären Reststoffen möglichst effizient und umweltschonend zurückgewonnen werden können, um die Nährstoffkreisläufe wieder zu schließen.

Um die Forschungsfrage zu beantworten, wird die Düngemittelherstellung aus trocken gesammelten Fäkalien durch Kompostierung und Urinaufbereitung sowie die Düngemittelherstellung aus Klärschlamm auf Nährstoffverluste und den Energie- und Wasserverbrauch untersucht. Die Untersuchung zeigt, dass bei der trockenen Sammlung von Fäkalien pro Person pro Jahr 2 kg Stickstoff, 0,72 kg Phosphor und 2,25 kg Kalium zurückgewonnen werden können. Aus dem Klärschlamm hingegen können 0,65 kg Phosphor zurückgewonnen werden, bei Stickstoff und Kalium sind Rückgewinnungsmethoden noch zu unausgereift. Die Energiebilanzen zeigen, dass die Aufbereitung von trocken gesammelten Fäkalien energieintensiver ist als die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm. Der Wasserverbrauch bei einer Trockentoilette ist hingegen deutlich geringer als bei einer Wassertoilette.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Einsatz von Trockentoiletten und die Herstellung von Dünger aus den Fäkalien eine sinnvolle Möglichkeit wäre, die Nährstoffkreisläufe zu schließen, Umweltbelastungen zu mindern und der zunehmenden Wasserknappheit entgegenzuwirken. Die Umsetzung ist wegen der aktuellen gesetzlichen Lage sowie der Infrastruktur allerdings unwahrscheinlich.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . .	V
Tabellenverzeichnis . . . . .	VII
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	VIII
Einheitenverzeichnis . . . . .	IX
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Theoretischer Hintergrund</b>	<b>3</b>
2.1. Wasserversorgung und Abwassersysteme in Barnim . . . . .	3
2.2. Fäkalienentsorgung in der Vergangenheit und Gegenwart . . . . .	3
2.3. Konventionelle Düngung in der Landwirtschaft . . . . .	4
2.4. Nährstoffe in Fäkalien . . . . .	5
2.5. Gesetzliche Lage . . . . .	6
2.6. Stand der Forschung zur Düngemittelherstellung aus Trockentoiletteninhalten . . . . .	8
2.6.1. Übersicht über aktuelle Projekte . . . . .	8
2.6.2. Das Projekt zirkulierBAR . . . . .	9
2.7. Trockentoiletten . . . . .	9
2.7.1. Funktionsweise und Bauarten . . . . .	9
2.7.2. Verwertung der Reststoffe . . . . .	11
2.8. Konventionelle Kläranlagen . . . . .	14
2.8.1. Anthropogener Wasserkreislauf . . . . .	14
2.8.2. Klärschlammbehandlung und -verwertung . . . . .	15
<b>3. Material und Methoden</b>	<b>17</b>
3.1. Vorgehen . . . . .	17
3.2. Systemgrenzen . . . . .	17
3.3. Auswahl einer funktionelle Einheit . . . . .	18
3.4. Auswahl von Recycling Performance Indikatoren . . . . .	18
3.5. KSK und Urinaufbereitung von Trockentoiletteninhalten . . . . .	19
3.5.1. Systemmodellierung . . . . .	19
3.5.2. Nährstoffrückgewinnung bei der KSK . . . . .	20
3.5.3. Nährstoffrückgewinnung bei der Urinaufbereitung . . . . .	24
3.5.4. Energiebilanz . . . . .	26
3.5.5. Wasserbilanz . . . . .	26
3.6. Konventionelle Kläranlagen . . . . .	27
3.6.1. Systemmodellierung . . . . .	27
3.6.2. Nährstoffrückgewinnung aus KSA . . . . .	28
3.6.3. Energieverbrauch Düngemittelherstellung aus KSA . . . . .	29
3.6.4. Wasserverbrauch der Düngemittelherstellung aus KSA . . . . .	30

<b>4. Ergebnisse</b>	<b>31</b>
4.1. Trockentoiletten . . . . .	31
4.1.1. Nährstoffrückgewinnung durch KSK . . . . .	31
4.1.2. Nährstoffrückgewinnung der Urinaufbereitung . . . . .	33
4.1.3. Zurückgewonnene Nährstoffe durch Behandlung der Fäkalien . . . . .	34
4.1.4. Energiebilanz der KSK und Urinaufbereitung . . . . .	34
4.1.5. Wasserverbrauch der KSK und Urinaufbereitung . . . . .	35
4.2. Koventionellen Kläranlagen . . . . .	36
4.2.1. Nährstoffrückgewinnung aus KSA . . . . .	36
4.2.2. Energiebilanz . . . . .	36
4.2.3. Wasserverbrauch der Düngemittelherstellung aus KSA . . . . .	37
<b>5. Diskussion</b>	<b>38</b>
5.1. Vergleich beider Methoden . . . . .	38
5.1.1. Nährstoffrecycling . . . . .	38
5.1.2. Energiebilanz . . . . .	39
5.1.3. Wasserbilanz . . . . .	40
5.2. Vergleich der Ergebnisse mit vorhandener Literatur . . . . .	40
5.3. Bewertung der Ergebnisse . . . . .	41
5.4. Bewertung des Vorgehens . . . . .	43
5.4.1. Einfluss der Systemmodellierung auf die Ergebnisse . . . . .	43
5.4.2. Einfluss der Systemgrenzen auf die Ergebnisse . . . . .	44
5.4.3. Einfluss der Wahl der funktionellen Einheit . . . . .	44
5.4.4. Einfluss von Literaturwerten auf die Nährstoffzusammensetzung . . . . .	45
5.4.5. Betrachtung der Berechnung von Wasser- und Energiebilanzen . . . . .	45
5.5. Umsetzbarkeit eines flächendeckenden Einsatzes von Trockentoiletten und der Fäkalienaufbereitung zu Dünger . . . . .	46
5.5.1. Ökologische Bewertung . . . . .	46
5.5.2. Gesetzliche Möglichkeiten . . . . .	47
5.5.3. Infrastrukturelle Möglichkeiten . . . . .	48
5.5.4. Ausblick auf zukünftige Forschung . . . . .	49
<b>6. Fazit</b>	<b>51</b>
Anmerkung . . . . .	53
Literaturverzeichnis . . . . .	X
<b>A. Anhang</b>	<b>A</b>
A.1. KSK und Urinaufbereitung . . . . .	A
A.2. Düngemittelherstellung aus KSA . . . . .	D
A.3. Veränderte Ergebnisse durch Behebung des Rechenfehlers . . . . .	D

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Aufbau einer Trockentoilette [Eigene Darstellung nach Finizio GmbH, 2021b]	10
2.2. Phasen einer Kompostierung [Eigene Darstellung nach Stentiford et al., 2010]	11
2.3. Stickstoffumwandlungen während der Kompostierung [Eigene Darstellung nach Boldrin et al., 2010]	12
2.4. Entwicklung der Stickstoffverbindungen während der Nitrifikation [Etter et al., 2015 (angepasst)]	13
2.5. Verfahrensfließbild der Abwasserbehandlung [Eigene Darstellung nach BMUV, 2022]	14
2.6. Funktionsweise des „Ash Dec“-Verfahrens [Eigene Darstellung nach Herzel et al., 2018]	16
3.1. Fließbild der KSK- und Urinaufbereitungsanlage	19
3.2. Modellierung der KSK mit der Monte-Carlo-Simulation	20
3.3. Modellierung des Systems der Urinaufbereitung mit der Monte-Carlo-Simulation	24
3.4. Fließbild der konventionellen Kläranlage mit Phosphorrückgewinnung	28
3.5. Phosphorbilanz nach Anteilen bei der Düngemittelherstellung	29
4.1. Entwicklung der Massen in der KSK	31
4.2. Entwicklung der Nährstoffmengen in der KSK	31
4.3. Entwicklung der Nährstoffanteile in der KSK	32
4.4. Stickstoffanteile nach ihrer Herkunft	32
4.5. Phosphoranteile nach ihrer Herkunft	33
4.6. Kaliumanteile nach ihrer Herkunft	33
4.7. Nährstoffmengen während der Urinaufbereitung	33
4.8. Nährstoffanteile während der Urinaufbereitung	34
4.9. Energieverbrauch der Fäzesaufbereitung	35
4.10. Energieverbrauch der Urinaufbereitung	35
4.11. Menge an $P$ während der Rückgewinnung	36
4.12. Energieverbrauch der $P$ -Rückgewinnung pro FE	36
4.13. Energieverbrauch der $N$ - und $K$ -Herstellung pro FE	37
5.1. Zurückgewonnene Nährstoffe bei der trockenen Fäkalienaufbereitung und dem „Ash Dec“-Verfahren	38
5.2. Zurückgewonnene Nährstoffe bei der Fäkalienaufbereitung (ohne Zuschlagstoffe) und dem „Ash Dec“-Verfahren	38
5.3. Energieverbräuche der untersuchten Systeme	39
A.1. Verteilung der Inputmengen	A
A.2. Verteilung der Mengen des ungesiebten Kompostes	A
A.3. Verteilung des fertigen Kompostes	A
A.4. Verteilung der $N$ -Mengen im Kompost	A
A.5. Verteilung der $P$ -Mengen im Kompost	A

A.6. Verteilung der $K$ -Mengen im Kompost . . . . .	A
A.7. Verteilung der Urindüngermengen . . . . .	C
A.8. Verteilung der $N$ -Mengen im Urindünger . . . . .	C
A.9. Verteilung der $P$ -Mengen im Urindünger . . . . .	C
A.10. Verteilung der $K$ -Mengen im Urindünger . . . . .	C

## Tabellenverzeichnis

3.1. Zusammensetzung und Mengen einer optimalen Kompostmiete . . . . .	21
3.2. Nährstoffanteile der Inputs . . . . .	22
3.3. Nährstoffanteile und -mengen im Urin (MW) . . . . .	25
3.4. Phosphormengen pro funktionelle Einheit . . . . .	29
4.1. Zurückgewonnene Nährstoffmengen der Fäkalienbehandlung . . . . .	34
4.2. Zurückgewonnene Nährstoffmengen der Fäkalienbehandlung in Barnim und Brandenburg . . . . .	34
4.3. Energiebilanz der KSK und Urinaufbereitung . . . . .	35
4.4. Wasserverbrauch der KSK und Urinaufbereitung . . . . .	35
5.1. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit BioFAVOR II . . . . .	40
5.2. Vor- und Nachteile der untersuchten Systeme . . . . .	42
A.1. Entwicklung der Prozessströme in der KSK (leichte Abweichungen durch die Monte-Carlo-Simultaion) . . . . .	B
A.2. Entwicklung der Prozessströme in der Urinaufbereitung . . . . .	B
A.3. Aufgeschlüsselter Energieverbrauch der KSK und Urinaufbereitung . . . . .	C
A.4. <i>P</i> -Mengen in den Prozessströmen der Düngemittelherstellung . . . . .	D
A.5. Aufgeschlüsselter Energieverbrauch des „Ash Dec“-Verfahrens sowie der synthetischen <i>N</i> - und <i>K</i> -Herstellung . . . . .	D
A.6. Prozessströme in der KSK mit behobenem Fehler . . . . .	D
A.7. Energieverbrauch der synthetischen <i>N</i> -Herstellung mit behobenem Fehler . . . . .	D
A.8. Zurückgewonnene <i>N</i> -Nährstoffmengen der Fäkalienbehandlung mit behobenem Fehler . . . . .	D

# Abkürzungsverzeichnis

**bzw.** beziehungsweise

**Ca** Calcium

**Cd** Cadmium

**Cu** Kupfer

**d. h.** das heißt

**EG** Europäische Gemeinschaft

**EU** Europäische Union

**FE** funktionelle Einheit

**K** Kalium

**K<sub>2</sub>O** Kaliumoxid

**KA** Kläranlage

**KS** Klärschlamm

**KSA** Klärschlammasche

**KSK** Kontrollierte sauerstoffversorgte Kompostierung

**N** Stickstoff

**Ni** Nickel

**P** Phosphor

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** Phosphorpentoxid

**Pb** Blei

**TC** Transferkoeffizient

**TR** Trockenrückstand

**z. B.** zum Beispiel

**Zn** Zink

# Einheitenverzeichnis

*a* Jahr

*d* Tag

*E* Einwohner:in

*EW* Einwohner:innenwert

*g* Gramm

*h* Stunde

*kg* Kilogramm

*km* Kilometer

*kW* Kilowatt

*kWh* Kilowattstunden

*l* Liter

*m* Meter

*Mg* Megagramm

*mg* Milligramm

$m^3$  Kubikmeter

*W* Watt

*Wh* Wattstunden

# 1. Einleitung

Über 30 % des Trinkwassers in Deutschland werden für die Toilettenspülung verbraucht. Das sind täglich 34 Liter an Wasser mit Trinkqualität, das durch Urin und Fäzes verschmutzt wird und energie- und kostenintensiv wieder aufgereinigt werden muss. [Berliner Wasserbetriebe, 2022b] Gleichzeitig werden wertvolle Nährstoffe wie Stickstoff ( $N$ ), Phosphor ( $P$ ) und Kalium ( $K$ ) aus Fäzes und Urin in Kläranlagen (KA) eliminiert, während zur Bewirtschaftung der Felder synthetische Düngemittel hergestellt werden. Die zunehmende Wasserknappheit sowie die immer kleiner werdenden Vorräte an  $P$  und  $K$  benötigen alternative Konzepte für sanitäre Systeme, um die Kreislaufwirtschaft zu fördern und die Umwelt zu schonen. [Sundermann et al., 2021]

Große Mengen an Klärschlamm (KS) wurden in den letzten Jahrzehnten landwirtschaftlich verwendet, um den Düngewert der Fäkalien auszunutzen. Das führte jedoch gleichzeitig zu Schadstoffeinträgen in die Böden, Gewässer und die gedüngten Pflanzen. Über die Umweltwirkung vieler Schadstoffe, die sich im Abwasser befinden, ist wenig bekannt, wodurch der Eintrag in die Umwelt ein Risiko darstellt. Um dies zu verhindern, wird das Austragen von KS in der Landwirtschaft gesetzlich immer weiter eingeschränkt und ist ab 2032 ganzheitlich verboten. Damit die Nährstoffe aus dem Abwasser nicht verloren gehen, werden Technologien zur Nährstoffrückgewinnung entwickelt. Besonders die Rückgewinnung von  $P$  aus KS stellt eine Möglichkeit dar, der Problematik der knapper werdenden Phosphatlagerstätten entgegenzuwirken. [Umweltbundesamt, 2018]

Ein alternatives Konzept, mit welchem die Nährstoffkreisläufe direkter geschlossen werden könnten und kein Umweg über Abwasser gegangen werden müsste, ist die trockene Sammlung und Aufbereitung von Fäkalien durch Trockentoiletten. Sowohl aus Fäzes als auch aus Urin können mit geeigneter Aufbereitung unbedenkliche Dünger entstehen. [Sundermann et al., 2021]

In der vorliegenden Arbeit soll daher die Forschungsfrage untersucht werden, wie die Nährstoffe aus sanitären Reststoffen möglichst effizient und umweltschonend zurückgewonnen werden können, um die Nährstoffkreisläufe wieder zu schließen. Dazu soll hauptsächlich die trockene Sammlung und Aufbereitung von Fäkalien im Gebiet Barnim untersucht werden. Zum Vergleich soll die Nährstoffrückgewinnung aus Abwasser kommunaler KA herbeigezogen werden. Der Vergleich beider Konzepte soll hinsichtlich der Nährstoffrecyclingraten, den Energie- und den Wasserverbräuchen erfolgen. Die Untersuchung der trockenen Sammlung und Aufbereitung von Fäkalien beruht auf dem Projekt „zirkulierBAR“, in welchem die Düngerherstellung aus Fäkalien getestet und gefördert wird. [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022d]

Für die Untersuchung sollen zuerst geeignete Recycling Performance Indikatoren gewählt und Systemgrenzen sowie eine funktionelle Einheit (FE) festgelegt werden. Danach sollen die Systeme jeweils modelliert und die Recyclingraten der Nährstoffe mit einer Stoffstromanalyse be-

rechnet werden. Um die Ergebnisse genauer darstellen zu können, sollen die Berechnungen mit der Monte-Carlo-Simulation im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel durchgeführt werden.

Es wird erwartet, dass in der trockenen Sammlung und Aufbereitung der Fäkalien ein Potential liegt, die Probleme des aktuellen Abwasser- und Düngesystemes teilweise zu lösen. Daher soll nach der Quantifizierung von den Nährstoffrecyclingraten sowie dem Energie- und Wasserverbrauch beider Methoden die Umsetzbarkeit eines vermehrten Einsatzes von Trockentoiletten auf Grundlage der Ergebnisse diskutiert werden.

## 2. Theoretischer Hintergrund

### 2.1. Wasserversorgung und Abwassersysteme in Barnim

Das Land Brandenburg gehört zu den gewässerreichsten Bundesländern [MLUK, 2022b], allerdings auch zu den wasserärmsten, was durch zurückgehende Niederschläge und hohe Lufttemperaturen zustande kommt. Die Wasserspiegel der Seen sowie die Grundwasserspiegel sinken insbesondere seit 2010 und die Grundwasserneubildung verlangsamt sich. Zeitgleich steigt der Bedarf an Wasser durch die Industrie, aber auch durch die Trinkwasserversorgung, weiter an. Über 90 % des Trinkwassers wird in Brandenburg durch Grundwasser gewonnen. [Naturschutzbund Deutschland e.V., 2022]

Die Bevölkerungszahl in Brandenburg betrug zum 31.12.2021 2.537.868 [Statistisches Bundesamt, 2022]. Der Landkreis Barnim zählte 2020 187.343 Einwohner:innen [UrbiStat S.r.l., 2022].

Im Gebiet Barnim wird das Grundwasser in neun Wasserwerken auf Trinkwasserqualität gebracht. Eberswalde wird von den Wasserwerken in Stadtsee und Finow versorgt [Zweckverband für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung Eberswalde, 2022]. Außerdem befinden sich in Barnim elf KA. Die größte mit einer Ausbaugröße von 702.000 Einwohner:innenwerten (EW) ist lokalisiert in Schönerlinde. Drei weitere besitzen Ausbaugrößen zwischen 10.000 und 100.000 EW (Werneuchen, Joachimstal und Eberswalde); die KA in Lunow, Lobetal und Marienwerder besitzen Ausbaugrößen von 2.000 - 10.000 EW und fünf KA im Barnimer Gebiet haben eine Ausbaugröße unter 2.000 EW. Alle KA über 2.000 EW haben eine mechanisch-biologische Abwasserbehandlung mit weitergehender Reinigung, also einer *N*- und/oder *P*-Eliminierung, nur die Kleinkläranlagen unter 2.000 EW besitzen keine weitergehende Reinigung. Der Anschluss der Haushalte an die KA beträgt in den meisten Landkreisen über 90 %, mit Ausnahme von Ziethen, Lunow-Stolzenhagen, Hohenfinow und Breydin, in denen der Anschluss zwischen 80 und 90 % beträgt, sowie in Parsteinsee mit einem Anschluss von 70-80 %. Panketal, gelegen im südlichen Teil von Barnim in unmittelbarer Nähe zum Klärwerk Schönerlinde, hat als einziger Landkreis einen Anschluss von 100 %. Insgesamt hat Barnim einen Anschluss zur Kanalisation und einer zentralen KA von 90,1 %. 8,9 % der Bevölkerung entsorgen das Abwasser über dezentrale Sammelgruben, die geleert und zu einer zentralen KA gebracht werden müssen. 1 % sind an dezentrale Kleinkläranlagen angeschlossen. [MLUK, 2021]

### 2.2. Fäkalienentsorgung in der Vergangenheit und Gegenwart

Die landwirtschaftliche Verwertung von Fäkalien zum Schließen der Nährstoffkreisläufe ist keine Erfindung der Neuzeit. Bevor in der Industrialisierung Kanalisationen erbaut wurden, war die Nutzung der Fäkalien als Düngung verbreitet. Durch Epidemien, die Europa im 19. Jahrhundert trafen, rückte die Frage der Hygiene mehr in den Vordergrund. Es wurde der Zusammenhang des fäkal-oralen Kreislaufes erkannt, jedoch wurde der Düngewert auch nach der Kenntnis über die hygienischen Risiken durch Bakterien in Fäkalien von vielen favorisiert und gesam-

melte Fäkalien weiter auf Felder gebracht. Mit der Einführung erster Wassertoiletten waren die wasserverdünnten Fäkalien nicht mehr nährstoffreich genug für die Düngung und wurden meist direkt in Gewässer geleitet, was das Problem der Hygiene verstärkte. Erst mit der Entwicklung der Schwemmkanalisation und erster KA konnte das Problem der Hygiene gelöst werden und die Reinigung von Abwässern immer weiter verbessert. Heute ist in Deutschland das Konzept der Wassertoilette mit einem Abwassersystem zu einer KA fast flächendeckend gebräuchlich. [Bauhaus-Universität Weimar, 2009]

### 2.3. Konventionelle Düngung in der Landwirtschaft

Damit hohe und qualitativ gute landwirtschaftliche Erträge erzielt werden können, benötigen Pflanzen Nährstoffe. So sind Makronährstoffe wie  $N$ ,  $P$  und  $K$  unabdingbar, aber auch Mikronährstoffe wie Kupfer ( $Cu$ ) und Zink ( $Zn$ ) werden zum Wachstum benötigt. Nährstoffe werden von den Pflanzen über den Boden aufgenommen, weshalb gerade Boden, auf dem jährlich Landwirtschaft betrieben wird, gedüngt werden muss. Es kann zwischen organischen und mineralischen Düngern unterschieden werden. Organische Dünger sind natürliche Dünger, wie z.B. Kompost, Mulch, Gülle oder auch menschliche, hygienisierte Fäkalien. Mineralische Dünger werden auch als synthetische Dünger bezeichnet und werden durch Rohstoffe synthetisch hergestellt. Auf dem Markt werden sie als Einzel- oder Mehrfachnährstoffdünger verkauft. [Umweltbundesamt, 2022]

Die synthetische Herstellung von Düngern ist mit einem hohen Energieverbrauch und Emissionen von Treibhausgasen verbunden [Umweltbundesamt, 2022]. Die Herstellung von Stickstoffdünger wird beispielsweise mit dem Haber-Bosch-Verfahren durchgeführt, bei dem hohe Drücke und Temperaturen benötigt werden, um Ammoniak herzustellen.  $P$  bzw. Phosphate sowie  $K$  werden für die Düngemittelherstellung aus Lagerstätten gewonnen. [LANUV, 2022] Besonders der Abbau von  $P$  wird als kritisch eingestuft, da die fossilen Phosphorvorkommen knapper werden. Prognosen zur Folge werden die weltweiten Vorräte in 100 bis 300 Jahren erschöpft sein. 80% des Rohphosphors wird für die Düngemittelherstellung abgebaut. [Naturschutzbund Deutschland e.V., 2022]

Neben den negativen Umweltauswirkung der synthetischen Düngemittelherstellung kann auch die Qualität des Bodens, der Gewässer und der Luft durch übermäßiges Düngen negative Auswirkungen tragen. So kann Auswaschung aus den Böden zu Nährstoffeinträgen in Gewässern führen und Ammoniak- sowie Lachgasemissionen beim Ausbringen von Stickstoffdüngern verminderte Luftqualität zur Folge haben. Eine weitere Gefahr für negative Umweltauswirkungen besteht durch Schwermetalle in Düngemitteln. Vor allem bei mineralischen Phosphordüngern aus sedimentären Rohphosphaten, aber auch durch das Ausbringen von Klärschlamm, können Schwermetalle im Boden angereichert werden. Die Pflanzen nehmen diese zusammen mit den Nährstoffen auf, sodass die Schwermetalle Nahrungsmittel sowie Grundwasser belasten können. [Umweltbundesamt, 2022]

In Brandenburg werden neben der Düngung mit organischen Wirtschaftsdüngern, also tierischer Gülle, Mist und Gärresten, zwischen drei und sechs Prozent der deutschlandweiten Menge an Handelsdüngern, also mineralische Dünger, abgesetzt. Aufgrund der schwankenden Energiepreise zur Düngemittelherstellung entspricht der jährliche Absatz nicht dem absoluten Verbrauch, da bei günstigen Preisen häufig auf Vorrat gekauft wird. Zusätzlich können Absätze in anderen Bundesländern erfolgen, obwohl der Endverbrauch in Brandenburg sitzt. Nichtsdestotrotz gibt der Absatz eine Einordnung darüber, wie viel mineralische Dünger in Brandenburg benötigt werden. Insgesamt wurden von den Jahren 2011 bis 2021 im Schnitt  $76.734,9 \text{ Mg } N_{ges}$ ,  $7.848,4 \text{ Mg } P_2O_5$  und  $13.723,7 \text{ Mg } K_2O$  in Düngemitteln pro Jahr abgesetzt. [MLUK, 2022a] Die Herstellung, das Inverkehrbringen und das Ausbringen von Düngern werden durch das Düngegesetz sowie einige Verordnungen geregelt [Umweltbundesamt, 2022].

## 2.4. Nährstoffe in Fäkalien

Fäzes und Urin machen große Anteile der Nährstoffe im Abwasser aus. Im Urin befinden sich ungefähr 80 % des  $N$ , 50 % des  $P$  und 60 % des  $K$  aus dem häuslichen Abwasser. In den Fäzes befinden sich ca. 15 % des  $N$ , 25 % des  $P$  und 15 % des  $K$ . Im Grauwasser, also dem häuslichen Abwasser ohne Fäkalien, sind demnach nur ca. 5 % des  $N$ , 25 % des  $P$  und 25 % des  $K$  enthalten. Fäzes und besonders Urin sind damit sehr nährstoffreiche Stoffströme. Die genaue Menge an Nährstoffen in Fäkalien variiert je nach Datenerfassung und ist auch stark von den Ernährungsgewohnheiten sowie vom Ort und der Art der Erfassung, abhängig. [Bauhaus-Universität Weimar, 2009]

Die Literaturangaben über die Menge an  $N$  in den Fäzes bewegen sich zwischen einem Mittelwert (MW) von  $1,48 \frac{g}{E \cdot d}$  [Naudascher, 2001] und  $1,8 \frac{g}{E \cdot d}$  [Geigy Scientific Tables, 1982]. Die Angaben über  $P$  bewegen sich zwischen  $0,3 \frac{g}{E \cdot d}$  [Geigy Scientific Tables, 1982] und  $1,4 \frac{g}{E \cdot d}$  [Naudascher, 2001] und die von  $K$  zwischen  $0,44 \frac{g}{E \cdot d}$  [Geigy Scientific Tables, 1982] und  $1 \frac{g}{E \cdot d}$  [SNV, 1995]. Beim Urin sind ähnliche Abweichungen der Mengen in der Literatur zu finden. Die MW für  $N$  bewegen sich hier zwischen von  $9,94 \frac{g}{E \cdot d}$  [Berger et al., 2008] und  $11,5 \frac{g}{E \cdot d}$  [Geigy Scientific Tables, 1982]. Bei  $P$  liegen die MW in einem Bereich von  $0,8 \frac{g}{E \cdot d}$  [Geigy Scientific Tables, 1982] und  $1,1 \frac{g}{E \cdot d}$  [Welzl, 1985] vor, bei  $K$  zwischen  $2 \frac{g}{E \cdot d}$  [Welzl, 1985] und  $2,7 \frac{g}{E \cdot d}$  [Geigy Scientific Tables, 1982].

Neben den hohen Gehalten an Nährstoffen sind auch Bakterien, Viren und andere Krankheitserreger in Fäkalien enthalten. So befinden sich häufig Darmbakterien wie Salmonellen, Shigellen, *Escherichia coli* (*E. coli*) und Campylobacter in der Fäzes [Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, 2022]. Sowohl in Fäzes als auch in Urin können Schwermetalle wie  $Cu$ ,  $Zn$ , Blei ( $Pb$ ), Cadmium ( $Cd$ ) oder Nickel ( $Ni$ ) nachgewiesen werden. Im Abwasserstrom machen die Mengen der Schwermetalle aus Urin und Fäzes allerdings im Vergleich zu Grauwasser nur einen kleinen Anteil aus. So befinden sich ungefähr jeweils  $0,02 \frac{mg}{E \cdot d}$   $Pb$  in Urin und Fäzes, während sich im Grauwasser  $3 \frac{mg}{E \cdot d}$  befinden.  $Cu$  befinden sich  $0,1 \frac{mg}{E \cdot d}$  im Urin und  $1,1 \frac{mg}{E \cdot d}$  im Fäzes, während sich  $6,5 \frac{mg}{E \cdot d}$   $Cu$  im Grauwasser befinden. [Bauhaus-Universität Weimar, 2009]

## 2.5. Gesetzliche Lage

Für Düngemittel sowie die Untersuchung von Düngern aus Fäkalien oder KS bzw. Klärschlamm- asche (KSA) müssen in Deutschland mehrere Gesetze und Verordnungen betrachtet werden. Folgend soll eine kurze Übersicht über relevante Gesetzgebungen gegeben werden:

### Kreislaufwirtschaftsgesetz

An erster Stelle ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) zu nennen. Das KrWG regelt die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen sowie sonstige Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung [§ 2 Absatz 1 Satz 1-4 KrWG]. Es dient dem Zweck die Kreislaufwirtschaft zu fördern, um natürliche Ressourcen sowie Mensch und Umwelt zu schützen [§ 1 Absatz 1 KrWG]. KS gelten als Abfälle und fallen somit unter das KrWG [§ 11 KrWG]. Fäkalien und somit auch die Verwertung derer fallen nach § 2 Absatz 1 Satz 5 KrWG nicht unter das Gesetz.

Das KrWG legt in § 6 Absatz 1 Satz 1-6 eine Hierarchie fest, nach der Abfälle behandelt werden sollen. An höchster Stelle steht die Vermeidung von Abfällen, gefolgt von der Vorbereitung zur Wiederverwendung. An dritter Stelle steht das Recycling von Abfällen, gefolgt von der sonstigen Verwertung, also z.B. die energetische Verwertung. An letzter Stelle der Abfallhierarchie steht die Beseitigung von Abfällen. [KrWG, 2012]

### Düngemittelverordnung (DüMV)

Die DüMV - die „Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln“ - regelt nach § 2 Absatz 1 das Inverkehrbringen obig genannter Düngemittel, die keine EG-Düngemittel sind (diese werden durch die Europäische Düngemittelverordnung geregelt). KS ist nach Anlage 1 Tabelle 7 7.4.3 DüMV als Hauptbestandteil von Düngemitteln (organisch/organisch-mineralisch) zugelassen, soweit sie gemäß der AbfKlärV zugelassen sind. KSA ist als mineralischer Dünger zugelassen, soweit es „in granulierter oder staubgebundener Form“ auftritt und bestimmte Siebdurchgangsanforderungen erfüllt [Anlage 1 Tabelle 6 6.2.3 DüMV]. Fäkalien werden in der DüMV nicht erwähnt, allerdings sind organische Abfälle nach Anlage 1 Tabelle 7 7.4.4 DüMV gemäß § 2 Nummer 1 BioAbfV als Dünger zugelassen.

In der DüMV sind zudem Mindest- und Höchstgehalte für die verschiedenen zugelassenen Dünger definiert. Organische *N*-, *P*-, *K*-, oder Mehrstoffdünger mit *N*, *P* und *K*, unter welche kompostierte Fäkalien einzuordnen wären, müssen auf die Trockenmasse (TM) bezogen Mindestgehalte an den Nährstoffen besitzen. Ein Einnährstoffdünger muss mindestens 3% des Nährstoffes enthalten. Ein *NPK*-Dreinnährstoffdünger muss mindestens 1% *N*, 0,3%  $P_2O_5$  oder 0,5%  $K_2O$  enthalten. [Anlage 1 Abschnitt 3 3.1 DüMV] Mineralische *NPK*-Dünger müssen je nach Aggregatzustand unterschiedliche Mindestgehalte erfüllen: feste *NPK*-Dünger müssen 3% *N*, 5%  $P_2O_5$  und 5%  $K_2O$  enthalten, als Lösung hingehen 3% *N*, 4%  $P_2O_5$  und 4%  $K_2O$  [Anlage 1 Abschnitt 2 2.4 DüMV, 2012].

## Europäische Düngemittelverordnung

Die „Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlamentes und des Rates“ wurde 2019 verabschiedet und regelt das Inverkehrbringen sowie die Anwendung von Düngemitteln auf dem EU-Markt. Es werden Grenzwerte an Schadstoffen sowie Mindestgehalte für Nährstoffe definiert. Nach PFC 1(A)(I) Satz 2 a-c L170/40 EU 2019/1009 sind die Mindestgehalte für organische, feste Düngemittel 2,5 %  $N$ , 2 %  $P_2O_5$  oder 2 %  $K_2O$ . Flüssige organische Düngemittel müssen nach PFC 1(A)(II) Satz 2 a-c L170/40 EU 2019/1009 2 %  $N$ , 1 %  $P_2O_5$  oder 2 %  $K_2O$  enthalten. Das Inverkehrbringen von Recyclingdüngern soll durch die Europäische Düngemittelverordnung erleichtert werden. So sollen Düngemittel, die aus Abfällen recyclet wurden, wie z.B. KS, „ohne unnötige Verzögerungen Zugang zum Binnenmarkt haben“ [Satz 58 L170 s. 9 EU 2019/1009]. Fäzes oder Urin werden in der Europäischen Düngemittelverordnung nicht erwähnt. [Verordnung (EU), 2019]

## Düngegesetz (DüngG)

Das Düngegesetz regelt generell nach § 3 die Anwendung und nach § 5 das Inverkehrbringen von Düngemitteln. Nach § 1 ist der Zweck des Gesetzes unter anderem, „die Ernährung der Nutzpflanzen sicherzustellen“ [§ 1 Satz 1 DüngG] sowie „einen nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit Nährstoffen bei der landwirtschaftlichen Erzeugung sicherzustellen, insbesondere Nährstoffverluste in die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden“ [§ 1 Satz 4 DüngG, 2022].

## Düngeverordnung (DüV)

Die „Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen“ regelt nach § 1 die Anwendung von oben genannten Stoffen und soll Risiken durch die Anwendung von Düngemitteln vermindern [§ 1 Absatz 1 Satz 1 2 DüV]. Die Verordnung enthält unter anderem genaue Anforderungen und Beschränkungen für stickstoff- und phosphorhaltige Dünger sowie Regelungen zum Aufbringen von Düngemitteln. In Anlage 3 wird die Mindestwirksamkeit des Stickstoffes von Düngemitteln mit KS als Ausgangsstoff geregelt [Anlage 3 zu § 3 Absatz 5 Satz 1 Nummer 2 DüV]. KSA sowie Fäkalien werden in der DüV nicht erwähnt. [DüV, 2022]

## Klärschlammverordnung - AbfKlärV

Eine genaue Regelung zur Klärschlammverwertung ist in der „Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemische und Klärschlammkompost“ definiert. Die AbfKlärV wurde im September 2017 ausgefertigt und regelt nach § 1 Absatz 1 die Behandlung, Abgabe und Auf- oder Einbringen von KS, Klärschlammgemischen und Klärschlammkompost. §§ 4 und 5 legen Untersuchungspflichten auf Schadstoffe im Boden fest, auf den der KS ausgebracht werden soll. Außerdem werden Schadstoffgehalte im KS selbst definiert. In §§ 7 und 8 sind Grenzwerte an Schadstoffen für Boden und KS festgelegt, nach denen der KS als Dünger auf Felder ausgebracht werden darf. Nach § 14 Absatz 1 dürfen maximal fünf  $Mg$  KS (TM) je Hektar innerhalb von drei Kalenderjahren auf Böden ausgebracht werden. Außerdem sind in der AbfKlärV

Regelungen zur *P*-Rückgewinnung aus KS festgelegt. In § 3 Absatz 1 wird die Pflicht definiert, den KS „möglichst hochwertig zu verwerten, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist“ [§ 3 Absatz 1 AbfKlärV]. Artikel 5 der AbfKlärV legt die Anforderungen an die *P*-Rückgewinnung fest. So muss *P* wiedergewonnen werden, wenn der Anteil im KS über 2 % der TM beträgt [Artikel 5 § 3 Absatz 1 Nr. 1 AbfKlärV]. Diese Regelung gilt nach Artikel 5 § 3 Absatz 3 AbfKlärV ab 2029 für alle KA mit einer Ausbaugröße über 100.000 EW und ab 2032 für alle KA. Die direkte bezogene Verwertung ist dann nicht mehr zulässig [Artikel 5 § 3, Absatz 3 AbfKlärV, 2017].

Bisher sind die wasserlose Sammlung sowie Verwertung von Fäzes und Urin weder national noch auf europäischer Ebene geregelt [Sundermann et al., 2021]. In der Schweiz hingegen fand eine Zulassung von Düngemitteln aus Fäkalien bereits statt. Der Dünger „Aurin“ der Firma „Vuna GmbH“ wurde 2018 nach einer mehrjährigen Testphase vom Schweizer Bundesamt für Landwirtschaft als Dünger zugelassen und ist im Produktregister registriert [Bundesamt für Gesundheit, 2022]. In den letzten Jahren wurde „Aurin“ zudem in Österreich und Liechtenstein zugelassen und wird in diesen Ländern sowie online vertrieben [Vuna GmbH, 2022a].

## 2.6. Stand der Forschung zur Düngemittelherstellung aus Trockentoiletteninhalten

### 2.6.1. Übersicht über aktuelle Projekte

Obwohl es die gesetzliche Lage auf deutscher und europäischer Ebene nicht zulässt, Düngeprodukte aus trocken gesammelten Fäkalien zu vertreiben (vgl. Kapitel 2.5), gibt es eine handvoll Projekte, die die Aufbereitung der Fäkalien untersuchen und testen. Einige sollen im Folgenden genannt und das Projekt „zirkulierBAR“ vorgestellt werden.

Fruchtbare Erde aus menschlichen Fäkalien wird bereits seit mehreren Jahrtausenden im Amazonas hergestellt. Die so genannte „Terra Petra“ (portugiesisch: schwarze Erde) ist ein Gemisch aus Fäkalien und einigen Zuschlagstoffen wie Holzkohle, Tonmineralen und anderer Organik und zeichnet sich durch einen sehr hohen Nährstoffgehalt aus. Durch Sauerstoffentzug entsteht eine stabilisierte Erde, die als Kompost eingeordnet werden kann. [Finizio GmbH, 2021a]

In Deutschland gibt es aktuell mehrere Wohnsiedlungsprojekte zur Düngung mit Fäkalien, eines ist z. B. das „Ökodorf Sieben Linden“. Hier werden Trockentoiletten verwendet und die Baumbepflanzungen auf dem Gelände mit der kompostierten Fäzes und den aufbereiteten Urin gedüngt. Durch die kleinere Belastung des Abwassers durch die getrennte Sammlung wird nur eine Pflanzenkläranlage zur Wasseraufbereitung genutzt. Von den aufbereiteten Fäkalien sind allerdings keine Nährstoffgehalte bekannt. [Ökodorf Sieben Linden, 2022]

Ein weiteres Projekt, bei dem die Aufbereitung von Fäkalien untersucht und getestet wurde, ist „BioFAVOR II“ vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH. Hierbei wurde die Fäzes hygienisiert und mit Biokohle zusammen in verschiedenen Zusammensetzungen und unter

unterschiedlichen Bedingungen kompostiert. Die Ergebnisse lieferten einen Kompost mit 2,8 % Trockensubstanz (TS)  $N$ ; 4,8 %TS  $P_2O_5$  und 2,6 %TM  $K_2O$ . [Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, 2021]

Europaweit gibt es vor allem Projekte, die die Aufbereitung von Urin untersuchen. Neben „Vuna GmbH“, die den Recyclingdünger „Aurin“ produzieren (siehe Kapitel 2.4), gibt es beispielweise das „Rewaise Sweden Project“ in Schweden oder „FosVaasje“ in den Niederlanden, die die Düngerherstellung aus Urin untersuchen. [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022a]

### 2.6.2. Das Projekt zirkulierBAR

„zirkulierBAR“ ist ein interdisziplinäres Projekt in Eberswalde, das sich zum Ziel gesetzt hat, einen unbedenklichen Dünger aus Fäkalien durch kontrollierte sauerstoffversorgte Kompostierung (KSK) herzustellen. Es wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen von „REGION.innovativ“ gefördert und wird durch die Zusammenarbeit verschiedener Partner verwirklicht. Einige der am Projekt beteiligten Institutionen sind das Leibniz-Institut (IGZ) e.V., die Stadt Eberswalde und der Landkreis Barnim, die Kreiswerke Barnim, Finizio - Future Sanitation GmbH und die Technische Universität Berlin sowie die Hochschule für nachhaltige Entwicklung (HNE) Eberswalde. [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022d]

Das Projekt läuft seit Juni 2021 und ist bis Juni 2024 gefördert. In dieser Zeit sollen Inhalte aus Trockentoiletten auf einer Pilotanlage in Eberswalde in mehreren Prozessschritten zu Recyclingdünger verarbeitet werden und zeitgleich ein rechtlicher Rahmen für das Inverkehrbringen dieser geschaffen werden. [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022d] Die Kompostierung von Fäzes läuft bereits auf dem Pilotgelände, eine Urinaufbereitungsanlage ist geplant. Der fertige Kompost wird durch Laboranalysen kontrolliert und wurde 2020 erstmals auf einem Feldversuch ausgetragen, von dem später Roggen geerntet wurde. Um den rechtlichen Rahmen zu schaffen, arbeitet „zirkulierBAR“ eine DIN-Norm zur Qualitätssicherung der Fäkalien aus, die DIN SPEC 91421:2020. Mit dieser soll die Herstellung der Dünger standardisiert werden und das Ziel erreicht werden, Fäkalien in das Düngerecht mit aufzunehmen. [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022c]

## 2.7. Trockentoiletten

### 2.7.1. Funktionsweise und Bauarten

Eine Trockentoilette ist allgemein definiert als Toilette ohne Wasserspülung. Sie kann damit an Orten ohne Abwasseranschluss verwendet werden. Trockentoiletten können weiter unterteilt werden. So gibt es z. B. Komposttoiletten, Trockentoiletten mit integrierter Kompostierung, oder Trockentrenntoiletten, Trockentoiletten mit getrennter Erfassung von Urin und Fäzes. Die Sammlung der Fäkalien kann entweder direkt unter dem Toilettensitz in einem meist herausnehmbaren Behältnis geschehen oder in einem größeren Sammelbehältnis, mit welchem die Toiletten mit einem Fallschacht verbunden sind. Letzteres kann zum Beispiel in Mehrfamilienhäusern integriert werden. Um Geruchsbildung zu verhindern, ist in mehrgeschossigen Systemen neben dem Fallschacht meist ein Ventilationssystem eingebaut, das einen leichten Unter-

druck im Sammelbehältnis erzeugt. Ebenfalls gegen die Geruchsbildung wird meist ein Einstreu in die Toilette gegeben, welches die Fäkalien bedeckt und Geruch neutralisieren soll. Die Behandlung der Inhalte kann vor Ort stattfinden oder nach der dezentralen Sammlung auf eine Behandlungsanlage transportiert werden. [Bauhaus-Universität Weimar, 2009]

Da im Rahmen dieser Arbeit die Pilotanlage zur Kompostierung in Eberswalde von Finizio betrachtet wird, soll im folgenden genauer auf die Bauweise der Trockentoiletten eingegangen werden, die von Finizio auf dem Markt sind. Neben der klassischen Indoor-Toilette vertreibt Finizio auch stationäre oder mobile Kabinen, die beispielsweise in Kleingärten oder an öffentlichen Orten aufgestellt werden können. Außerdem werden Toilettenkabinen für Großveranstaltungen angeboten. [Finizio GmbH, 2021b]

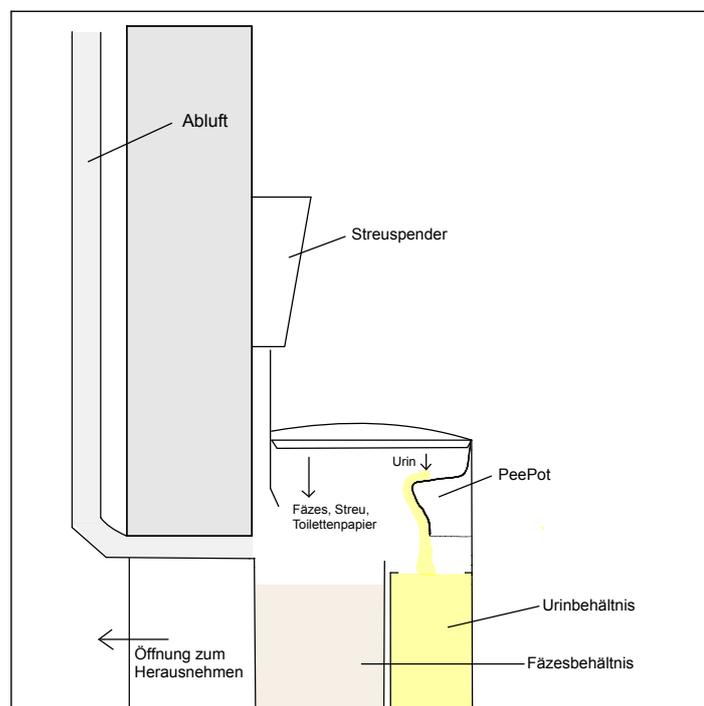


Abbildung 2.1.: Aufbau einer Trockentoilette [Eigene Darstellung nach Finizio GmbH, 2021b]

Der Aufbau aller Trockentoiletten von Finizio ist identisch, die Produkte unterscheiden sich lediglich im Fassungsvermögen der Sammelbehältnisse. Die Toilettenschüssel sowie das Gehäuse bestehen aus Edelstahl, der Sitz aus Bambus. Bei der Indoor-Toilette befindet sich unterhalb des Sitzes ein Feststoffbehälter, der 10 l fasst. Die stationäre Kabine besitzt ein weitaus größeres Sammelbehältnis für 1.100 Urinablassungen sowie 120 bis 180 Fäzesablassungen. Neben den Behältnissen zur Feststoffsammlung verfügen die Toiletten über einen so genannten „PeePot“ zur Urinableitung. Dies ist ein Edelstahlbogen, an dem der Urin entlang fließt und einem getrennten Behältnis gesammelt oder abgeleitet werden kann. Durch den „PeePot“ können ca. 95 % des Urins von den festen Reststoffen getrennt werden. Die Toiletten besitzen Anschlüsse für Abluft sowie eventuell für den abzuleitenden Urin. Außerdem ist durch einen weiteren Anschluss ein Streuspender verbunden, der nach dem Toilettengang benutzt werden kann, um Einstreu über die Fäkalien zu geben. Durch die herausnehmbaren Behälter können Fäzes und

Urin abgeholt und zur Verwertungsanlage transportiert werden. Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau einer Trockentoilette von Finizio. [Finizio GmbH, 2021b]

## 2.7.2. Verwertung der Reststoffe

### Kontrollierte Sauerstoffversorgte Kompostierung

Um aus den gesammelten Fäkalien einen unbedenklichen Dünger herstellen zu können, werden mehrere Aufbereitungsschritte durchlaufen, um Schadstoffe, Bakterien und Medikamentenrückstände zu entfernen. Auf der Pilotanlage in Eberswalde durchlaufen die Fäzes zunächst eine Hygienisierung. In einem Container wird das Material belüftet, wodurch Mikroorganismen aktiviert werden und Temperaturen über  $70^{\circ}\text{C}$  entstehen. Dadurch sterben Bakterien wie z. B. *E. coli* oder Salmonellen, die sich in den Fäzes befinden, ab. Die Hygienisierung dauert sieben Tage. Danach durchläuft das Material für ca. acht Wochen die eigentliche KSK, bei der die restlichen Krankheitserreger eliminiert werden. [Finizio GmbH, 2021a]

Kompostierung wird allgemein als mikrobielle Umwandlung und Stabilisierung von festen organischen Materialien unter aeroben Bedingungen definiert. Der Kompostierungsprozess kann in drei Phasen unterteilt werden, diese sind in Abbildung 2.2 zu sehen.

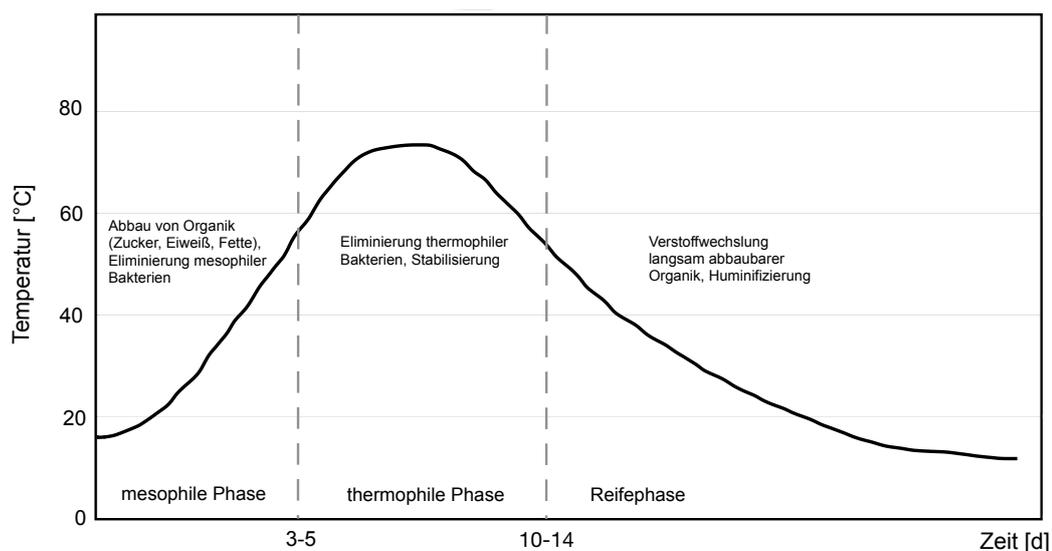


Abbildung 2.2.: Phasen einer Kompostierung [Eigene Darstellung nach Stentiford et al., 2010]

Zunächst wird die mesophile Phase durchlaufen, in der leicht abbaubare Organik zersetzt und Wärme freigesetzt wird. Nach wenigen Tagen wird die thermophile Phase mit Temperaturen von  $70^{\circ}\text{C}$  erreicht, wodurch Bakterien und Krankheitserreger eliminiert werden. Mit einer kontrollierten Sauerstoffversorgung, durch z. B. Wenden des Kompostes, kann die Temperatur reguliert werden, sodass das Optimum zwischen der Stabilisierung der Organik und der benötigten Desinfektion erreicht werden kann. In der dritten Phase, der Reifephase, sinkt die Temperatur wieder und komplexere Verbindungen werden zersetzt. Die Reifephase kann mehrere Wochen dauern. Als Output entsteht eine stabilisierte, nährstoffreiche Komposterde. [Stentiford et al., 2010]

Während des Kompostierungsprozess werden Kohlenstoff ( $C$ ) und  $N$  abgebaut. Insgesamt findet während der Kompostierung ein Stickstoffverlust von ca. 30 % statt. Dieser setzt sich aus den Verlusten von  $NH_3$ ,  $N_2$  und  $N_2O$  durch Gasbildung sowie den Verlusten von  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$  und  $NO_3^-$  im Sickerwasser zusammen. [Boldrin et al., 2010] Die Umwandlung des  $N$  ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

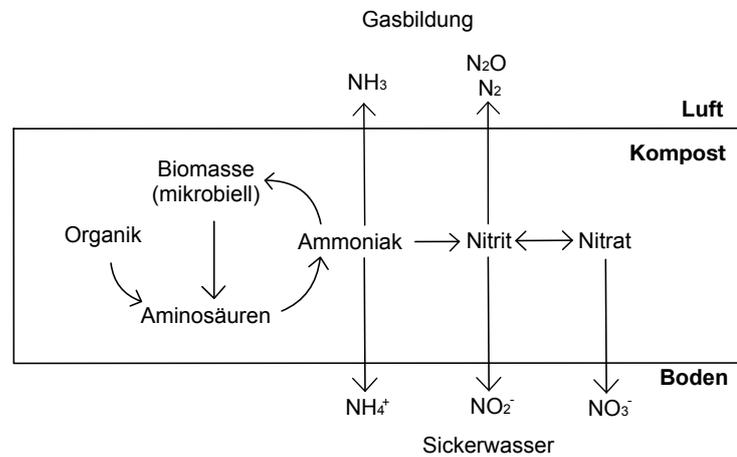


Abbildung 2.3.: Stickstoffumwandlungen während der Kompostierung [Eigene Darstellung nach Boldrin et al., 2010]

Bei anderen Makronährstoffen, wie  $P$  und  $K$ , sind nahezu keine Verluste zu verzeichnen [Boldrin et al., 2010]. Ist nicht genug Sauerstoff vorhanden, so stellen sich anaerobe Bedingungen ein und Methan ( $CH_4$ ) entsteht. Dies kann ebenfalls durch die kontrollierte Sauerstoffversorgung verhindert werden. [Stentiford et al., 2010]

Ein guter Kompostierungsprozess zeichnet sich durch gute Lebensbedingungen für die Mikroorganismen aus. Dafür müssen einige Randbedingungen erfüllt sein: Im Ausgangsmaterial sollte ein Wassergehalt von 40 - 60 % herrschen, welcher im Laufe des Prozesses nicht unter 30 % sinken sollte, da die mikrobielle Aktivität dann schnell absinkt. Außerdem sollte ein ausgewogenes Gesamtnährstoffverhältnis vorhanden sein, welches durch das Verhältnis von  $C$  zu  $N$  ( $C:N$ -Verhältnis) gekennzeichnet ist. Für eine ideale Kompostierung sollte ein  $C:N$ -Verhältnis von 30:1 vorliegen. Bei einem zu niedrigen  $C:N$ -Verhältnis entweicht überschüssiger  $N$  in Form von Ammoniak ( $NH_3$ ), bei einem zu hohem Verhältnis verlangsamt sich der mikrobielle Abbau, da die vorhandenen Kohlenstoffverbindungen nicht schnell genug abgebaut werden können. Des Weiteren ist eine große Materialoberfläche sowie hinreichendes Luftporenvolumen notwendig, damit der Kompost mit genug Sauerstoff versorgt werden kann. Der pH-Wert sollte zwischen 6,5 und 7,5 liegen. [Naudascher, 2001]

Da Fäzes die Bedingungen für eine gute Kompostierung nicht alleine erfüllt, werden Zuschlagstoffe wie Grünschnitte, Tonminerale, Pflanzenkohle und ein Teil fertiger Kompost hinzugegeben. Das Material wird zu Kompostmieten aufgesetzt, die ca. 30 Meter lang, zwei Meter hoch und einen Meter breit sind. In der ersten Woche muss der Kompost einmal täglich gewendet werden, um die ideale Sauerstoffzufuhr und Temperaturentwicklungen aufrecht zu erhalten. Danach nimmt die Häufigkeit des Wendens ab. Nach der Kompostierung wird der fertige Kompost auf der Pilotanlage gesiebt, um Fremdstoffe zu entfernen. [Finizio GmbH, 2021a]

## Urinaufbereitung

Urin kann mit wenigen Prozessschritten zu einem hygienisch unbedenklichem Dünger verarbeitet werden. Die Schweizer Firma „Vuna GmbH“ stellt aus Urin den Flüssigdünger „Aurin“ her, der durch drei Prozessschritte von Pathogenen befreit wird. Der erste Schritt der Urinaufbereitung ist eine Nitrifikation, bei der der  $N$  stabilisiert und schlechter Geruch entfernt wird. Der gelagerte Urin enthält hohe Konzentrationen flüchtigen Ammoniaks. Bei der Nitrifikation wird durch Bakterien ungefähr die Hälfte des Ammoniaks zu nicht-flüchtigem Nitrat ( $NO_3^-$ ) oxidiert. Dabei sinkt auch der pH-Wert von 9 auf 6,5; wodurch die andere Hälfte des Ammoniaks zu nicht-flüchtigem Ammonium ( $NO_4^+$ ) stabilisiert wird. Durch eine dritte, heterotrophe Bakteriengruppe werden organische Inhaltsstoffe zersetzt, sodass schlechter Geruch entfernt wird. Die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen sind in Abbildung 2.4 zu sehen. Für die Nitrifikation sind die richtige Temperatur und pH-Werte, sowie ein gutes Verhältnis der oxidierenden Bakterien ausschlaggebend. [Etter et al., 2015]

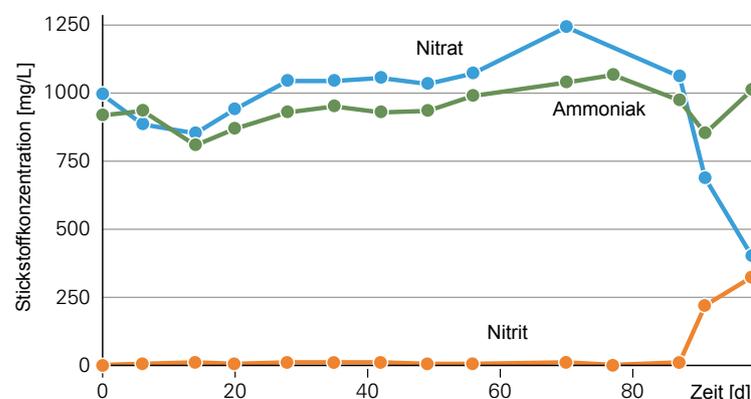


Abbildung 2.4.: Entwicklung der Stickstoffverbindungen während der Nitrifikation [Etter et al., 2015 (angepasst)]

Als weiterer Schritt findet eine Aktivkohlefiltration statt, bei der Medikament- und Hormonrückstände aus dem stabilisierten Urin entfernt werden [Vuna GmbH, 2022a]. Zuletzt wird der stabilisierte, gefilterte Urin destilliert, wodurch letzte Krankheitserreger entfernt werden und sauberes Wasser als Output entstehen. Nach der Destillation verbleiben 99 % des  $N$  sowie 100 % des  $P$  und  $K$  in ca. 5 % der ursprünglichen Flüssigkeitsmenge. Dieses Urinkonzentrat kann als  $N$ -Flüssigdünger verwendet werden. [Etter et al., 2015]

## 2.8. Konventionelle Kläranlagen

### 2.8.1. Anthropogener Wasserkreislauf

Bei der Trinkwassergewinnung aus Grundwasser wird dieses durch Tiefbrunnen aus Wasserschutzgebieten zu den Wasserwerken befördert. Hier wird das Grundwasser durch Filtrierung aufbereitet und zu den angeschlossenen Haushalten geführt. In den Haushalten wird das Trinkwasser für Küche, Bad, Waschen und Toilettenspülung verwendet und mit gelösten und ungelösten Stoffen verunreinigt. Anschließend wird das Abwasser je nach Kanalisationssystem zusammen oder getrennt vom anfallenden Regenwasser in die Klärwerke geleitet. [Berliner Wasserbetriebe, 2022a]

In der KA wird das Abwasser in drei Stufen gereinigt. Abbildung 2.5 zeigt die Abwasseraufbereitung mit nachgeschalteter Schlammbehandlung. Die erste Reinigungsstufe ist die mechanische Abwasserreinigung, in der ca. 30% der Verunreinigungen entfernt werden. Als erstes passiert das Abwasser einen Rechen, dabei werden grobe Störstoffe mechanisch entfernt. Danach fließt das Abwasser durch einen Sandfang, in dem sich alle Stoffe mit einer deutlich höheren Dichte als Wasser, wie z. B. Sand, am Boden absetzen. Der letzte Schritt der mechanischen Reinigungsstufe ist das Vorklärbecken. Hier steht das Wasser mehrere Stunden, sodass sich auch feine Schwebstoffe am Boden absetzen. Der abgesetzte Schlamm wird abgesaugt und zur Weiterverwertung vorbereitet. [Bundesumweltministerium, 2022]

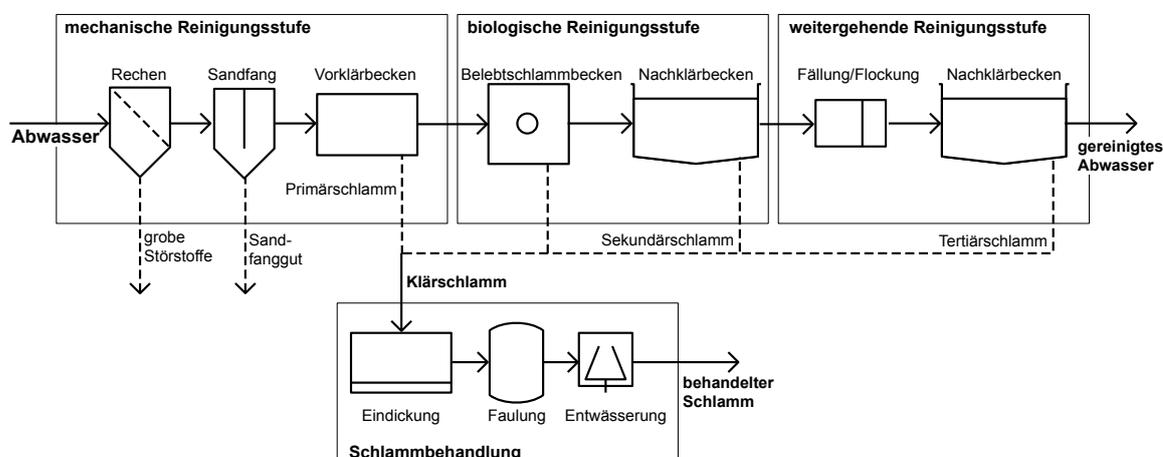


Abbildung 2.5.: Verfahrensfließbild der Abwasserbehandlung [Eigene Darstellung nach BMUV, 2022]

Die zweite Reinigungsstufe ist die biologische Abwasserreinigung. Hier werden alle biologisch abbaubaren Stoffe entfernt, indem sich durch eine geeignete Sauerstoffzufuhr Mikroorganismen stark vermehren und sich von biologisch abbaubaren Stoffen ernähren. Dies geschieht im so genannten Belebtschlammbecken. In einem Nachklärbecken sinken die von den Mikroorganismen gebildeten Kolonien zu Boden und werden als KS aus der biologischen Reinigungsstufe abgeführt. Nach der zweiten Reinigungsstufe sind ca. 90% der Schmutzstoffe aus dem Abwasser entfernt. Weiterhin befinden sich chemische Stoffe im Abwasser, die N-, P- oder K-haltig sind und durch Spül- und Putzmittel, aber auch durch Fäkalien das Abwasser belasten. Um diese aus dem Wasser zu eliminieren, durchläuft das Abwasser eine dritte Reinigungsstufe,

die weitergehende Abwasserreinigung. Hier werden dem Wasser Fällmittel hinzugegeben, die mit gelösten Stoffen schwerlösliche Verbinden eingehen und diese so zur Flockung bringen. In einem weiteren Nachklärbecken sinken diese ausgeflockten Stoffe wiederum als Schlamm zu Boden. Dieser wird erneut abgesaugt und dem KS der ersten beiden Stufen zugeführt. [Bundesumweltministerium, 2022]

Das gereinigte Wasser wird zurück in Oberflächengewässer geleitet, über welche es über Jahre hinweg wieder neues Grundwasser bildet [Berliner Wasserbetriebe, 2022a].

### 2.8.2. Klärschlammbehandlung und -verwertung

Der KS, der in den drei Reinigungsstufen einer KA entsteht, beinhaltet alle Stoffe, die aus dem Abwasser entfernt wurden. So sind hauptsächlich organische Substanzen, aber auch Arzneimittelrückstände, Schwermetalle und Pathogene enthalten. Außerdem ist stabilisierten KS 2-6 Gew.-%  $N$  und 2-55  $\frac{g}{kg}$   $P$  reich an Pflanzennährstoffen. Während die Schwermetalle durch Haushalt, Gewerbe und Niederschlägen von Straßen und Gebäude in das Abwasser gelangen, können die Pflanzennährstoffe hauptsächlich auf Fäkalien zurückgeführt werden. Durch diese gelangen ebenfalls Bakterien, Viren und andere Krankheitserreger in das Abwasser und somit in den KS. Außerdem sind Mikro- und Nanopartikel wie z. B. Mikroplastik im KS zu finden, die unter anderem durch Textilienwäsche und Kosmetik in das Abwasser gelangen können. [Umweltbundesamt, 2018]

Zu Anfang besitzt der KS einen Wassergehalt von 65-75 %. Um diesen zu verringern wird der KS eingedickt, indem der Feststoffanteil in einem Absetzbecken sedimentiert und das überschüssige Wasser an der Oberfläche abgelassen wird. Je nach Art der Verwertung muss der KS hygienisiert werden, um Pathogene zu reduzieren. Anschließend wird der KS stabilisiert, was größtenteils in Faultürmen direkt in der KA geschieht. Die Schlammstabilisierung reduziert durch Faulung einfach abbaubare Organik. Gleichzeitig wird die Geruchsbildung durch die Faulung minimiert. Um die Masse zu reduzieren und den KS auf die Weiterbehandlung vorzubereiten, wird er entwässert und getrocknet. Durch den geringeren Wasseranteil und den Massenverlust kann der KS besser transportiert werden und der Heizwert wird erhöht. Der Gehalt an Feststoffen im KS, auch als Trockenrückstand (TR) bezeichnet, muss zur Monoverbrennung bei ca. 35 % liegen, bei einer Mitverbrennung in Kohlekraftwerken genügt ein etwas geringerer Anteil. Bei anderen Verwertungsarten muss der TR teilweise höher sein. [Umweltbundesamt, 2018]

Neben der thermischen Behandlung werden in Deutschland zur Klärschlammentsorgung noch weitere Wege gegangen. So kann der KS landschaftsbaulich, stofflich (z. B. durch Kompostierung) oder direkt landwirtschaftlich verwertet werden. Die direkte Deponierung wird nicht mehr angewendet. In Brandenburg wurden 2016 74.015 Mg KS (TM) entsorgt. Ungefähr 61 % davon wurden durch thermische Behandlung entsorgt, 18 % landschaftsbaulich verwertet. Nur 2 % wurden durch sonstige stoffliche Verwertung entsorgt, die restlichen 19 % durch direkte landwirtschaftliche Verwertung. Letztere war wegen der Rückführung von Nährstoffen, wie  $N$ ,

$P$  und  $K$ , in den Nährstoffkreislauf praktisch, jedoch durch die im KS enthaltenen Schadstoffe umstritten. Durch die größerer werdenden Einschränkungen in der AbfKlärV zur Ausbringung in der Landwirtschaft werden alternative Rückgewinnungsmethoden immer relevanter. [Umweltbundesamt, 2018]

Seit Anfang der 2000er Jahre werden vor allem Methoden zur Rückgewinnung von  $P$  erforscht. Allgemein kann bei den Rückgewinnungsverfahren in drei Kategorien eingeteilt werden:  $P$  kann aus der wässrigen Phase zurückgewonnen werden (nass-chemisches Verfahren), aus dem KS oder Faulschlamm (nass-chemisches Verfahren), oder aus der KSA (thermisches Verfahren). Teilweise werden die Verfahren bereits großtechnisch durchgeführt, die meisten befinden sich allerdings noch in Versuchsstadien. Je nach Verfahren zur Rückgewinnung können von 5 bis über 90% des  $P$  zurückgewonnen werden. Durch die hohe Rückgewinnungsrate haben sich vor allem thermische Verfahren behauptet. Vorteile gegenüber dem nass-chemischen Verfahren sind zudem die vollständige Zerstörung der Schadstoffe sowie die zeitgleiche energetische Nutzung des KS. Im Vergleich zu nass-chemischen Verfahren sind thermische Verfahren allerdings mit hohen Investitionskosten und hohem Aufwand verbunden. Zu den erfolgreichsten Verfahren gehören das nass-chemische „MAP-Verfahren (Airprex)“ und die thermischen „TetraPhos-“ und „Ash Dec“-Verfahren. [Umweltbundesamt, 2018]

### Ash Dec-Verfahren

Das „Ash Dec“-Verfahren basiert auf der Aschenbehandlung mit Alkaliadditiven. Wie in Abbildung 2.6 zu sehen wird dabei die KSA mit Alkaliadditiven, wie Natrium- oder Kalium-Additiven, gemischt und in einen Drehofen gegeben. Zusätzlich muss noch ein Reduktionsmittel beigelegt werden, dieses kann z. B. getrockneter KS sein. Im Drehofen wird das Gemisch auf  $850-1000^{\circ}C$  erhitzt. Die Alkaliadditive reagieren mit dem  $P$  der KSA und bilden  $CaNaPO_4$ , eine gut pflanzenverfügbare Verbindung. Durch die Temperaturen und den Mangel an Sauerstoff werden im Ofen reduzierende Bedingungen erreicht, wodurch die Schwermetalle reduziert werden und verdampfen. Die Abluft kann gereinigt werden und nur ein kleiner Teil, in welchem die Schwermetalle verbleiben, muss entsorgt werden. Auch andere organische Schadstoffe werden bei den verwendeten Temperaturen eliminiert. Das Verfahren kann in die Monoverbrennung integriert werden, indem die KSA direkt aus der Verbrennung behandelt wird, wenn sie noch heiß ist. Dadurch können Energie und Betriebskosten gespart werden. [Herzel et al., 2018]

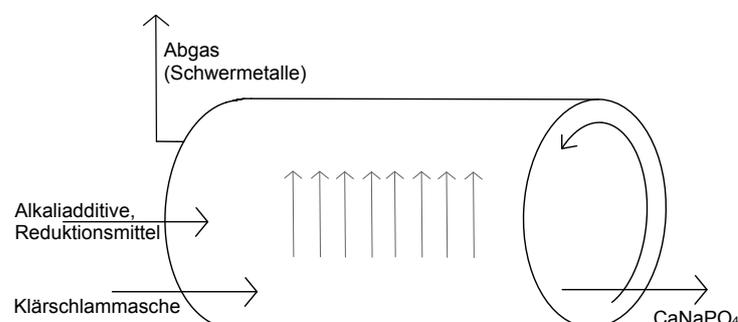


Abbildung 2.6.: Funktionsweise des „Ash Dec“-Verfahrens [Eigene Darstellung nach Herzel et al., 2018]

## 3. Material und Methoden

### 3.1. Vorgehen

Die vorliegende Bachelorarbeit wird durch eine systematische Literaturrecherche und Berechnungen auf Grundlage dieser erarbeitet. Zunächst wird durch eine Stichwortanalyse zu den Themen Trockentoiletten, Kompostierung und Recyclingdünger ein grober Überblick über die zu untersuchende Leitfrage geschaffen. Das Projekt „zirkulierBAR“ galt als erste Anlaufstelle für einen Überblick.

Mit vorhandenem Überblick werden die Punkte und Fragestellungen erarbeitet, die die Arbeit behandeln und klären soll. Außerdem werden Methoden diskutiert, mit denen die Fragestellungen zu bearbeiten sind. Für die Berechnungen werden Systemgrenzen, die FE und die Recycling Performance Indikatoren festgelegt, die untersucht werden sollen. Mit dem festgelegten Rahmen werden die Systeme der KSK und KA modelliert und gezielt Literatur gesucht, mit der die Berechnung der Nährstoffverluste, Energie- und Wasserbilanzen durchgeführt werden können. Die Ergebnisse beider Systeme werden anschließend verglichen und eine Anwendung auf aktuell vorhandene Systeme diskutiert.

### 3.2. Systemgrenzen

Systemgrenzen definieren Prozessschritte, Lebenswegabschnitte und Module, die in der Untersuchung der Systeme betrachtet werden sollen. Es werden also Grenzen festgelegt, außerhalb derer Prozesse nicht mit betrachtet werden. Die Systemgrenzen sind so festzulegen, dass nur Elementarflüsse, also die In- und Outputs der Systeme, die Grenzen überschreiten. [DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021]

Die zu untersuchenden Systeme sind zum einen die Verwertung von Fäkalien zu Recyclingdünger in einer KSK Pilotanlage auf dem Gelände von „zirkulierBAR“ in Eberswalde und zum anderen die Behandlung von Abwasser in einer konventionellen KA mit nachgeschalteter Nährstoffrückgewinnung. Damit eine Vergleichbarkeit zwischen den Systeme bestehen kann, müssen gleiche Systemgrenzen für beide Systeme gewählt werden. Da die KSK-Pilotanlage in Eberswalde (Barnim) lokalisiert ist, wird auch eine KA in dem Gebiet Barnim betrachtet und die Nährstoffrückgewinnung ebenfalls dort angenommen. Daher wird das Gebiet Barnim als Systemgrenze gewählt und möglichst lokale Daten für die Berechnungen verwendet.

Die Systemgrenzen werden außerdem so gewählt, dass Prozesse, die bei beiden Systemen identisch sind, außerhalb dieser liegen. So werden z. B. die Wege zu Konsument:innen sowie das Ausbringen der fertigen Recyclingdünger nicht betrachtet. Der Output bzw. austretende Elementarfluss ist damit in beiden System der fertig produzierte Dünger. Für die Berechnungen wird außerdem erst bei der Verarbeitung zu Dünger der Stoffströme angesetzt. Der Transport zur Anlage sowie die Abwasserreinigung in der KA werden daher nicht betrachtet. Zudem liegt der Bau und die Instandhaltung der benötigten Infrastruktur außerhalb der Systemgrenzen.

Zum Vergleich beider Systeme werden nur die ausgewählten Recycling Performance Indikatoren betrachtet (siehe Kapitel 3.4), alle anderen Pflanzennährstoffe liegen außerhalb der Grenzen.

### 3.3. Auswahl einer funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit ist ein Parameter, anhand dessen zwei Systeme oder Prozesse verglichen werden können. Sie quantifiziert die Funktionen der Systeme oder Produkte, welche nach dem Ziel der Studie definiert werden. [DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021]

Das Ziel der zu untersuchenden Systeme ist die Verwertung von sanitären Reststoffen. Für den Vergleich wird als FE die Verwertung der Ausscheidungen einer Person bzw. Einwohner:in pro Jahr definiert. Die Werte für die FE werden mittels einer Literaturrecherche festgelegt. Anhand drei unterschiedlicher Quellen (Berger et al., 2008; Thews et al., 1999; Naudascher, 2001) wird ein MW für die Fäzesmengen errechnet: Bei ausgewogener europäischer Kost geben Thews et al. durchschnittliche Fäzesmengen von 100 - 150 g mit einem MW von 125 g pro Person pro Tag an. Nach Berger et al. ist der MW Fäzes 130 g pro Person pro Tag. An der Universität Karlsruhe untersuchte Naudascher in mehreren Versuchen zur Kompostierung insgesamt 315 Fäzesproben, als MW der Menge berechnete sie 147 g. Von den drei genannten MW wird ein neuer MW berechnet, welcher 134 g pro Person pro Tag bzw.  $48,91 \frac{kg}{E \cdot a}$  Fäzes beträgt. Durch die hohe Varianz an Fäzesmengen, die durch unterschiedliche Kost zu Stande kommt, wird von einer Standardabweichung von  $14,67 \frac{kg}{E \cdot a}$ , also 30 %, ausgegangen.

Bei der Quantifizierung der Urinmenge wird analog vorgegangen. Geigy Scientific Tables, 1982 gehen von einem Durchschnitt von 1,4 l pro Person pro Tag bei männlichen Körpern und 1,1 l bei weiblichen Körpern aus. Bei einer ungefähr ausgeglichenen Geschlechterverteilung in Barnim [vgl. UrbiStat S.r.l., 2022] sind das 1,25 l pro Tag pro Person. Berger et al. legten in ihrer Studie einen MW der Urinmenge von 1,4 l pro Person pro Tag fest. An der Bauhausuniversität Weimar wurden 2009 so genannte neuartige Sanitärsysteme in einer Veröffentlichung diskutiert; hier wurde eine durchschnittliche Urinmenge von 1,37 l pro Person pro Tag angegeben [Bauhaus-Universität Weimar, 2009]. Ebenso wie bei der Fäzesmenge wird aus den drei Werten ein neuer MW errechnet, dieser beträgt 1,34 l pro Person pro Tag bzw.  $489,1 \frac{l}{E \cdot a}$ . Auch hier wird durch variierende aufgenommenen Flüssigkeitsmengen von einer Standardabweichung von 30 %, also  $244,55 \frac{l}{E \cdot a}$  ausgegangen.

Die FE ist somit die Verarbeitung von  $48,91 kg$  Fäzes und  $489,1 l$  Urin mit jeweils Standardabweichungen von 30 %.

### 3.4. Auswahl von Recycling Performance Indikatoren

Eine Übersicht über die in Fäzes und Urin enthaltenden Nährstoffe wurde in Kapitel 2.4 gegeben. In Kapitel 2.3 sind zudem die Nährstoffe genannt, die für Pflanzenwachstum benötigt werden. Ziel des Nährstoffrecyclings beider Systeme ist es, einen konventionellen, mineralischen Dünger ganz oder zumindest zum Teil ersetzen zu können. Daher werden als Indikatoren

Nährstoffe gewählt, die in konventionellen Düngern und gleichzeitig in ausreichenden Mengen in Fäkalien zu finden sind. Ein verbreiteter, konventioneller Dünger, der die Makronährstoffe abdeckend, ist der *NPK*-Dünger. *N*, *P* und *K* sind ebenfalls zu großen Mengen in Fäzes enthalten; im Urin besonders *N* (vgl. Kapitel 2.4). Da die Herstellung von *N*, *P* und *K* Umweltrelevanz hat und die Preise für mineralische Dünger marktabhängig sind, ist das Recycling auch aus ökologischer und ökonomischer Sicht wichtig. Die Systeme werden daher hinsichtlich der Recycling Performance Indikatoren *N*, *P* und *K* untersucht.

## 3.5. KSK und Urinaufbereitung von Trockentoiletteninhalten

### 3.5.1. Systemmodellierung

Für die Berechnungen der Nährstoffverluste, Wasser- und Energiebilanzen wird zunächst das System der Kompostierungsanlage modelliert. Für die Behandlung der Fäzes werden die einzelnen Systemschritte auf Grundlage der Forschungsanlage von Finizio GmbH angenommen. Für die Urinaufbereitung werden der Urin-Recyclingdünger „Aurin“ von der Schweizer Firma „Vuna GmbH“ sowie Udert et al., 2015 als Vorlage für die Modellierung verwendet. Das System ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

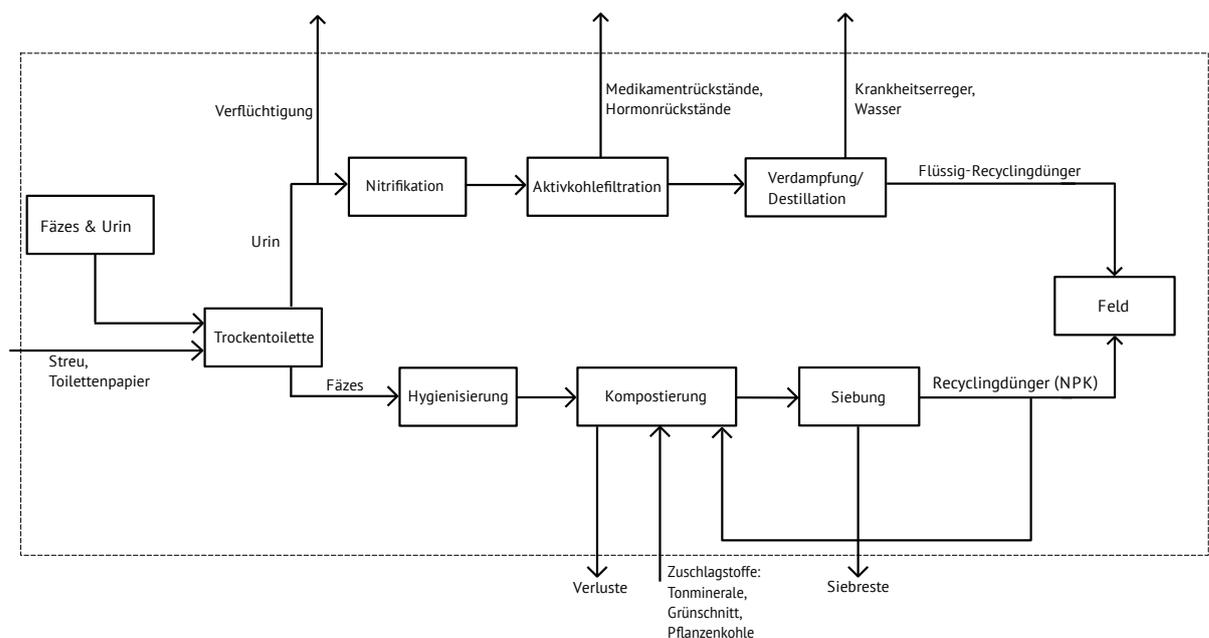


Abbildung 3.1.: Fließbild der KSK- und Urinaufbereitungsanlage

Mit der Benutzung einer Trockentoilette werden Fäzes und Urin ohne Wasser gesammelt. Dabei wird durch einen eingesetzten „PeePot“ der Urin nahezu ohne Verluste von den Fäzes getrennt und in Behältnissen gesammelt. Einmal jährlich werden Fäzes und Urin zur Pilotanlage in Eberswalde gebracht, auf der beide Reststoffe aufgearbeitet werden. Der Urin durchläuft eine Nitrifikation, Aktivkohlefiltration und Destillation (vgl. Kapitel 2.7.2) und kann als Flüssigdünger verwendet werden. Die Fäzes wird hygienisiert und mit Zuschlagstoffen zusammen als Kompostmieten ausgefahren. Die kompostierten Materialien werden gesiebt, ein Teil des gesiebten Kompostes geht für eine optimale Kompostierung zurück in den Prozess. Der Rest geht als Output aus dem Prozess und kann als *NPK*-Recyclingdünger verwendet werden.

### 3.5.2. Nährstoffrückgewinnung bei der KSK

Im folgenden Abschnitt soll die Berechnung der Nährstoffverluste bei der KSK erläutert werden. Die Berechnungen werden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel und der Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Mit dieser Methode kann der Verlauf von komplexen Prozessen berechnet werden, indem große Mengen zufällig erzeugter Zahlen die wahrscheinliche Verteilung der Ergebnisse darstellen. Für die Berechnungen der KSK-Anlage wird mit 1.000 Zufallszahlen gerechnet, die auf Grundlage eines gewählten MW und einer Standardabweichung entstehen. Außerdem wird eine Verteilung der Werte gewählt (z. B. eine Normalverteilung oder logarithmische Normalverteilung), sodass durch die Monte-Carlo-Simulation Dichteverteilungen der Prozessströme berechnet werden können. In den einzelnen Prozessschritten können außerdem Transferkoeffizienten (TC) gewählt werden, mit denen die Zufallszahlen verrechnet werden. [Nahrstedt, 2015]

Bevor die Nährstoffanteile und -verluste in den Fäzes und dem späteren Kompost berechnet werden, wird zuerst die Monte-Carlo-Simulation mit den Massenströmen, die durch die FE vorgegeben sind, durchgeführt. Es wird angenommen, dass im ersten Schritt der Kompostherstellung, der Hygienisierung, weder Massen- noch Nährstoffverluste stattfinden. Daher wird die Simulation bei der Kompostierung angesetzt. Als Prozessschritte werden das Zusammenfügen der Inputströme, die eigentliche Kompostierung und die anschließende Siebung gewählt. Abbildung 3.2 zeigt die Modellierung des Systemes mit der Monte-Carlo-Simulation.

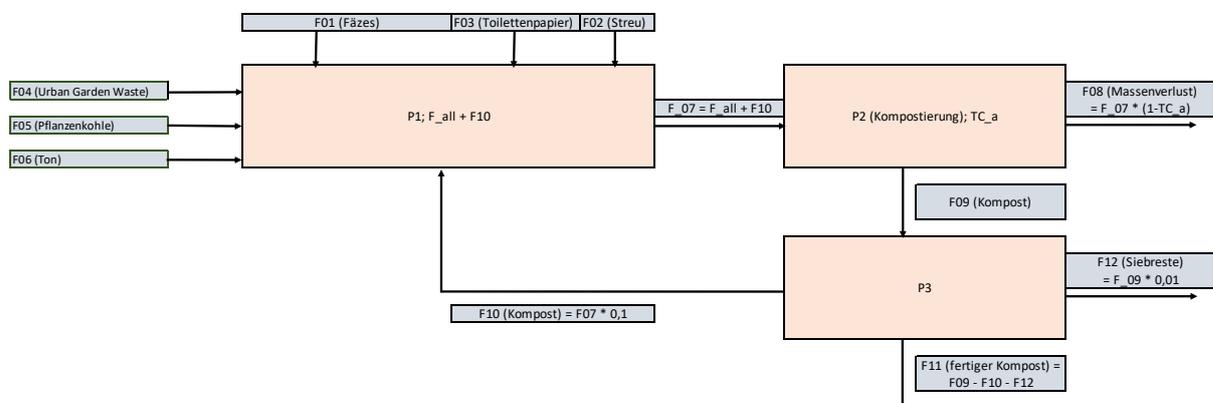


Abbildung 3.2.: Modellierung der KSK mit der Monte-Carlo-Simulation

Dabei ist der Massenstrom  $F_{01}$  die Fäzes,  $F_{02}$  und  $F_{03}$  Toilettenpapier und Toiletteneinstreu, und die Massenströme  $F_{04}$  bis  $F_{06}$  die Zuschlagstoffe, die für eine ideale Kompostierung beigemischt werden.  $F_{all}$  gibt alle Inputströme bis auf den fertigen Kompost ( $F_{10}$ ) wieder. Es gilt:

$$F_{all} = F_{01} + F_{02} + F_{03} + F_{04} + F_{05} + F_{06} \quad (3.1)$$

Im Prozess  $P_1$  findet noch kein Verlust statt, d. h. es gibt keinen TC, die Massenströme werden lediglich zu  $F_{07}$  addiert:

$$F_{07} = F_{all} + F_{10} \quad (3.2)$$

Der Massenstrom der addierten Inputs geht in den Prozess  $P_2$ , der die Kompostierung darstellt. Hier symbolisiert  $TC_a$  den TC in der Kompostierung. Die Outputs aus Prozess  $P_2$  sind der ungesiebte Kompost  $F_{09}$  und der Massenverlust  $F_{08}$ :

$$F_{08} = F_{07} \cdot (1 - TC_a) \quad (3.3)$$

$$F_{09} = F_{07} \cdot TC_a \quad (3.4)$$

Der ungesiebte Kompost wird dann im Prozess  $P_3$  gesiebt. Aus der Siebung wird ein Teil des fertigen Kompostes zurück in den Kompostierungsprozess geführt ( $F_{10}$ ). Die beiden Stoffströme  $F_{12}$  (die Siebreste, die ca. 1% des ungesiebt Kompostes  $F_{09}$  ausmachen) und  $F_{11}$  (das Endprodukt, der fertige Kompost), verlassen das System.

$$F_{10} = F_{07} \cdot 0,1 \quad (3.5)$$

$$F_{12} = F_{09} \cdot 0,01 \quad (3.6)$$

$$F_{11} = F_{09} - F_{10} - F_{12} \quad (3.7)$$

Die Mengenverhältnisse der Inputs  $F_{01}$  bis  $F_{06}$  (Zusätze für eine optimale Kompostmiete) werden auf Grundlage von Daten von „zirkulierBAR“ angenommen und auf die FE bezogen. Tabelle 3.1 zeigt die Anteile sowie die Mengen dieser Inputströme.

Tabelle 3.1.: Zusammensetzung und Mengen einer optimalen Kompostmiete

Massenstrom	Anteil am Kompost [%]	Menge [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]
Fäzes	24	48,9
Einstreu	19	39,1
Toilettenpapier	4	7,8
Urban Garden Waste	29	58,7
Pflanzkohle	5	9,8
Ton	9,5	19,6
Fertiger Kompost	9,5	19,6
<b>insgesamt</b>	<b>100</b>	<b>203,5</b>

Die Mengen aus Tabelle 3.1 werden als MW der Inputströme angenommen. Bei allen Inputströmen wird von einer Standardabweichung von 30 % ausgegangen. Für die Berechnung der Zufallszahlen mit der Monte-Carlo-Simulation wird bei allen Inputs eine Normalverteilung angenommen. Mit dieser werden für die Massenströme  $F_{01}$  bis  $F_{06}$  jeweils 1.000 Zufallszahlen berechnet. Mit Formel 3.1 wird jeweils die Summe der Zufallszahlen berechnet. Aus dem Massenstrom  $F_{all}$  wird dann mit Formel 3.9 der Massenstrom  $F_{10}$  berechnet.

$$F_{all} + F_{10} = 100\% = F_{07} \quad (3.8)$$

wobei gilt:

$$F_{10} = 0,1 \cdot F_{07} \quad (3.9)$$

Auch für  $F_{10}$  werden mit einer Normalverteilung 1.000 Zufallszahlen berechnet, sowie für  $F_{07}$  mit Formel 3.2 der MW und die Standardabweichung.

Für den TC im Kompostierungsprozess  $TC_a$  werden ebenfalls 1.000 Zufallszahlen berechnet. Es wird mit einem MW von 0,75 und einer Standardabweichung von 50 %, also 0,375, gerechnet. Als Verteilung wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Mit den Formeln 3.3 bis 3.7 werden für die restlichen Massenströme ebenfalls 1.000 Zufallswerte durch die Verteilung, MW und Standardabweichungen berechnet. Die Entwicklungen der Massenströme sind in Kapitel 4.1.1 dargestellt.

Nachdem die Massenströme berechnet sind, können die Nährstoffverluste berechnet werden. Dazu werden zunächst die Anteile von  $N$ ,  $P$  und  $K$  an den Inputs recherchiert. Tabelle 3.2 zeigt die MW der Nährstoffanteile sowie die verwendete Quelle.

Tabelle 3.2.: Nährstoffanteile der Inputs

Massenstrom	Anteil N [%]	Anteil P [%]	Anteil K [%]	Quelle
Fäzes	1,15	0,78	0,49	Geige, 1982; SNV,1995; Vinneras et al., 2006; Drachenberg, 1998; Naudascher, 2000
Einstreu	0,33	0,13	0,59	Naudascher, 2000
Toilettenpapier	0,12	0,003	0,02	Naudascher, 2000
Urban Garden Waste	0,56	0,11	1	Boldrin et al., 2008
Pflanzkohle	0	0,15	1,4	pflanzkohle24.de, 2022
Ton	0	0,04	2,74	MRG Mineralische Rohstoffmanagement GmbH, 2022

Da die Nährstoffanteile des fertigen Kompostes, der erneut in den Kompostierungsprozess eingeht ( $F_{10}$ ), erst durch das Modell berechnet werden können, werden für  $F_{10}$  zunächst Nährstoffanteile von fertigem Kompost nach Boldrin et al., 2010 angenommen. Die Berechnung werden mit diesen Werten durchgeführt und dann die Nährstoffanteile von  $F_{10}$  iterativ

an Output  $F_{11}$  angenähert, bis die Nährstoffanteile von  $F_{11}$  und  $F_{10}$  übereinstimmen. Für die Berechnungen der Nährstoffgehalte im Output müssen neben den Massenverlusten in den Prozessen  $P_2$  und  $P_3$  auch Verluste von  $N$ ,  $P$  und  $K$  betrachtet werden. Diese werden wie in Kapitel 2.7.2 beschrieben ebenfalls auf Grundlage von Boldrin et al. angenommen. Es gehen demnach 30%  $N$  verloren,  $P$  und  $K$  verzeichnen keine Verluste. Im Prozess  $P_3$ , der Siebung, werden ebenso keine Nährstoffverluste angenommen.

Für die Inputströme  $F_{01}$  bis  $F_{06}$  und  $F_{10}$  werden die 1.000 Zufallswerte der Massenströme jeweils mit den in Tabelle 3.2 angegebenen Nährstoffgehalten von  $N$ ,  $P$  und  $K$  verrechnet und je ein MW sowie die Standardabweichung gebildet. Formel 3.10 zeigt beispielhaft die Berechnung der Stickstoffmenge im Massenstrom der Fäzes, analog wird dies für alle Inputströme und Nährstoffe berechnet.  $x_N$  ist dabei der Anteil an Stickstoff an dem jeweiligen Massenstrom.

$$N_{F01} = F_{01} \cdot x_{N,01} \quad (3.10)$$

Für die Nährstoffmengen in  $F_{07}$  werden die Nährstoffmengen der Inputströme addiert, Formel 3.11 zeigt die Rechnung erneut beispielhaft für  $N$ :

$$N_{F07} = N_{all} + N_{F10} \quad (3.11)$$

wobei gilt:

$$N_{F_{all}} = N_{F01} + N_{F02} + N_{F03} + N_{F04} + N_{F05} + N_{F06} \quad (3.12)$$

Für die Nährstoffmengen in  $F_{08}$  (Massenverlust) wird die in Formel 3.2 berechnete Masse mit den Nährstoffanteilen verrechnet, bei  $N$  wird ein Verlust von 30% mit eingerechnet.  $N_{F09}$  (ungesiebter Kompost) kann danach aus  $N_{F07}$  und  $N_{F08}$  berechnet werden. Beispielhaft wird dies wieder für  $N$  gezeigt:

$$N_{F08} = F_{07} \cdot x_{N,07} \cdot 0,3 \quad (3.13)$$

$$N_{F09} = N_{F07} - N_{F08} \quad (3.14)$$

Für  $N_{F11}$  und  $N_{F12}$  wird analog zu  $N_{F08}$  vorgegangen. Da angenommen wird, dass in der Siebung keine Nährstoffverluste stattfinden, gilt:

$$x_{N,11} = x_{N,09} = x_{N,10} \quad (3.15)$$

$$x_{N,12} = 0 \quad (3.16)$$

Analog gilt dies für die Nährstoffe  $P$  und  $K$ .

Die Monte-Carlo-Simulation liefert für den Outputstrom  $F_{11}$  somit eine Dichteverteilung der Masse sowie die Mengen an  $N$ ,  $P$  und  $K$ , außerdem deren MW, Standardabweichung und ebenfalls Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.1.1 dargestellt.

### 3.5.3. Nährstoffrückgewinnung bei der Urinaufbereitung

Bei der Berechnung der Nährstoffverluste während der Urinaufbereitung wird analog zu Kapitel 3.5.2 vorgegangen. Die Angaben zu Nährstoffgehalten sowie Massen- und Nährstoffverlusten beruhen auf Udert et al., 2015 und Etter et al., 2015. Zunächst wird das System modelliert, um die Monte-Carlo-Simulation durchführen zu können. Abbildung 3.3 zeigt die Massenströme der Urinaufbereitung.

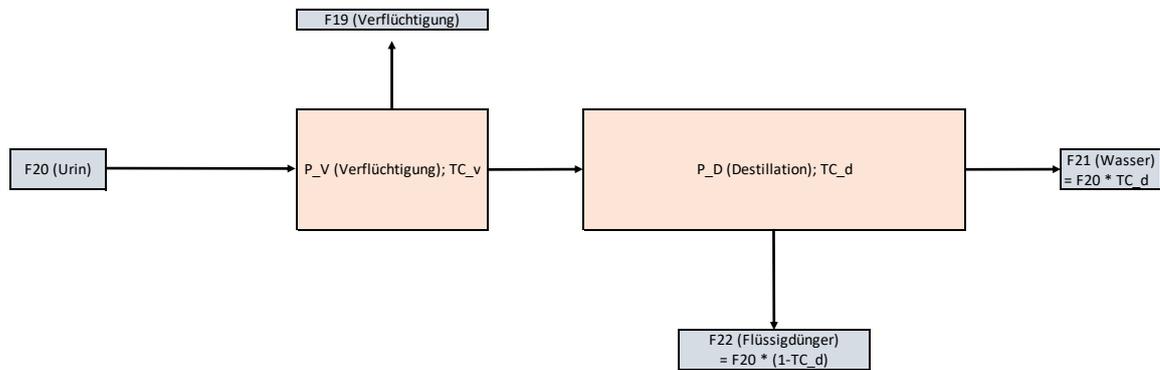


Abbildung 3.3.: Modellierung des Systems der Urinaufbereitung mit der Monte-Carlo-Simulation

Wie bei der KSK wird die Monte-Carlo-Simulation zuerst nur mit den Massenströmen durchgeführt. Dazu werden erneut 1.000 Zufallszahlen mit einer Normalverteilung für den Massenstrom des Urins ( $F_{20}$ ) erzeugt. Der MW ist die berechnete FE, also  $489,1 \frac{l}{E \cdot a}$ , als Standardabweichung wird wie auch bei der KSK 30% angenommen. Der Strom  $F_{20}$  führt in den Prozess  $P_V$  der Verflüchtigung. Da die Verflüchtigung keine Auswirkungen auf die Masse hat, bezieht sich der Transferkoeffizient  $TC_v$  in diesem Fall nur auf die Nährstoffgehalte. Der Massenstrom  $F_{20}$  führt daher auch direkt in den Prozess  $P_D$ , die Destillation. Hier findet ein Massenverlust von 95% (mit einer Standardabweichung von 2%) statt [Udert et al., 2015]. Die Outputströme sind destilliertes Wasser ( $F_{21}$ ) und der fertige Flüssigdünger ( $F_{22}$ ):

$$\begin{aligned} F_{21} &= F_{20} \cdot TC_d \\ &= F_{20} \cdot 0,95 \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} F_{22} &= F_{20} \cdot (1 - TC_d) \\ &= F_{20} \cdot 0,05 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Als Verteilung wird für  $TC_v$  ebenfalls eine logarithmische Normalverteilung gewählt. Aus der Monte-Carlo-Simulation mit Massenströmen können so die Entwicklung der Massen berechnet werden.

Als nächstes werden die Nährstoffanteile mit den Massenströmen verrechnet und erneut die Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Tabelle 3.3 zeigt die Anteile an  $N$ ,  $P$ , und  $K$  im Urin, die absoluten Mengen und die verwendeten Quellen:

Tabelle 3.3.: Nährstoffanteile und -mengen im Urin (MW)

Nährstoff	Anteil [%]	Menge [ $\frac{l}{E \cdot a}$ ]	Quelle
Stickstoff	0,8	3,9	Berger et al., 2008, Geigy Scientific Tables, 1982, SNV, 1995, Bauhaus-Universität Weimar, 2009
Phosphor	0,08	0,37	Berger et al., 2008, Welzl, 1985, SNV, 1995, Bauhaus-Universität Weimar, 2009
Kalium	0,12	0,003	Berger et al., 2008, Welzl, 1985, SNV, 1995, Bauhaus-Universität Weimar, 2009, Welzl, 1985

Wie in Kapitel 2.7.2 beschrieben, gilt für für die Destillation:

$$N_{F21} = F_{20} \cdot x_{N,20} \cdot 0,01 \quad (3.19)$$

sowie für  $P$  und  $K$ :

$$P_{F21} = K_{F21} = 0 \quad (3.20)$$

Da für die Verflüchtigung und den Verlust während der Aktivkohlefiltration keine validierten Daten vorliegen, wird für die Berechnung dieser Daten des fertigen Düngers von „Vuna GmbH“ als Grundlage genommen. Die Nährstoffanteile vom Düngemittel „Aurin“ werden mit den aus Literatur genommen Inputwerten an Nährstoffen gegenübergestellt. Die Differenz zwischen den Nährstoffanteilen des fertigen Düngers den Nährstoffanteilen vom behandelten Urin sind damit die Nährstoffverluste durch Verflüchtigung und Filtration. Formel 3.21 zeigt die Berechnung erneut beispielhaft für  $N$ , für  $P$  und  $K$  wird analog vorgegangen:

$$N_{F19} = N_{Aurin} - N_{F20} \quad (3.21)$$

Durch die Monte-Carlo-Simulation und mit Hilfe von den Nährstoffangaben des fertigen Produktes können so Nährstoffverluste sowie MW und Standardabweichung der Menge des Flüssigdüngers berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.1.1 dargestellt.

### 3.5.4. Energiebilanz

Im folgenden Kapitel soll die Berechnung der Energiebilanz für die Düngemittelherstellung aus Fäzes und Urin erläutert werden. Für die Berechnung werden folgende Annahmen getroffen (vgl. Kapitel 3.2): Zunächst wird nur der laufende Betrieb der Anlagen betrachtet. Alle Anlagen, Industrie und Materialien werden als schon existierend angenommen. Außerdem wird die Energiebilanz erst ab dem Zeitpunkt der Verwertung der Fäkalien angesetzt. Das bedeutet, dass der Transport der Fäkalien zur Kompostierungsanlage sowie der Vertrieb des fertigen Düngers nicht bilanziert wird, sondern nur die Verarbeitungsschritte der Anlage.

Bei der Kompostierungsanlage werden Daten von Finizio GmbH, 2021a verwendet. Die Angaben von Finizio zu Energieverbräuchen der Pilotanlage beziehen sich auf eine Fäzesmenge von  $30 \text{ m}^3$  Fäzes bzw.  $125 \text{ m}^3$  Kompost. Die Werte der Energieverbräuche werden daher jeweils auf die FE (MW sowie Standardabweichung) heruntergerechnet. Die Hygienisierung erfolgt mit  $80 \text{ W}$  für die Belüftung, die Fäzes befindet sich für sieben Tage im Hygienisierungscontainer. Bei dem Prozess der Kompostierung wird Energie für das Wenden benötigt, dies geschieht mit einer Wendemaschine, die einen Energieverbrauch von  $10 \text{ kW}$  besitzt. Für eine Wendung werden 60 Minuten für  $125 \text{ m}^3$  Kompost angenommen. Dies entspricht 7,6 Sekunden für den Mittelwert der FE. In den ersten sieben Tagen müssen die Mieten täglich einmal gewendet werden. Es wird angenommen, dass in den darauffolgenden drei Wochen alle zwei Tage gewendet werden muss, danach für vier Wochen alle vier Tage. Insgesamt ist die Wendemaschine daher pro FE 3,1 Minuten (MW) in Benutzung.

Bei der Siebung des fertigen Kompostes wird angenommen, dass auf den MW der FE bezogen für 5 Minuten gesiebt werden muss. Die Siebmaschine wird mit  $1,5 \text{ kW}$  betrieben. Zuletzt wird angenommen, dass der Kompost zwischen den einzelnen Verwertungsschritten mit einem Bagger bewegt wird, beispielsweise zum Ausfahren und Einsammeln der Mieten. Es wird eine Arbeitszeit von zwei Stunden pro  $125 \text{ m}^3$  Kompost gerechnet, was 0,25 Minuten pro FE (MW) entspricht. Es wird mit einem Bagger der Marke „Cat“ gerechnet, der mit Diesel betrieben wird und ca.  $7,9 \frac{\text{l}}{\text{h}}$  verbraucht [Bauverlag BV GmbH, 2013], was  $0,033 \text{ l}$  pro FE (MW) entspricht. Über den Heizwert von Diesel ( $9,8 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}$  [LUMITOS AG, 2022]) werden Energieäquivalente berechnet.

Im Aufbereitungsprozess des Urins wird Energie für die Nitrifikation sowie die Destillation benötigt. Nach Etter et al., 2015 benötigt die Nitrifikation von einem Liter Urin  $50 \text{ Wh}$ , die Destillation läuft mit  $80 \text{ Wh}$  pro Liter Urin. Beide Energieangaben werden wieder auf den MW und die Standardabweichung der FE skaliert. Für die Aktivkohlefiltration wird mit keinem zusätzlichen Energieverbrauch gerechnet. Der gesamte Energieverbrauch der KSK-Anlage und der Urinaufbereitung ist in Kapitel 4.1.4 dargestellt.

### 3.5.5. Wasserbilanz

Bei der Wasserbilanz für die Benutzung einer Trockentoilette sowie die Verwertung der Reststoffe wird nur das Wasser betrachtet, das für die Düngemittelherstellung benötigt wird. Wasser,

welches zur Reinigung der Trockentoilette verwendet wird, wird nicht mit bilanziert, da dies bei einer konventionellen Wassertoilette ungefähr identisch ist. Das gleiche gilt für anfallendes Wasser für Transport oder den Vertrieb des fertigen Produktes.

Bei der Kompostherstellung aus Fäzes muss das Kompostmaterial während des Kompostierungsvorganges bewässert werden. Die Menge an benötigtem Wasser dafür wird aus Angaben von „zirkulierBAR“ zur Pilotanlage übernommen. [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022b]

Bei der Urinaufbereitung wird ebenfalls benötigtes Wasser für Reinigung, Transport und Vertrieb nicht mit betrachtet. Bei dem Prozess der Nitrifikation und Filtration wird kein Wasser benötigt. Bei der Destillation verlassen 93-97 % der Flüssigkeit das System (vgl. Kapitel 3.5.1), das als Wasser mit Trinkwasserqualität gutgeschrieben wird. [Etter et al., 2015]

## 3.6. Konventionelle Kläranlagen

### 3.6.1. Systemmodellierung

Von denen in Kapitel 2.1 aufgezählten KA im Landkreis Barnim eignet sich die KA in Eberswalde durch ihre Lage am besten für den Vergleich mit der ebenfalls in Eberswalde lokalisierten KSK Pilotanlage. Daher wird diese für die Systemmodellierung und Berechnungen hinzugezogen. Da im Gebiet Barnim keine KA eine nachgeschaltete Nährstoffrückgewinnung besitzt (vgl. MLUK, 2021) und das Gebiet der Nährstoffrückgewinnung durch die Gesetzgebung erst in den letzten Jahren Aufschwung erhielt, wird die Nährstoffrückgewinnung durch vorhandene Literatur aus anderen Regionen hergeleitet und auf das Gebiet Barnim übertragen. Im folgenden wird angenommen, dass die Monoverbrennung des KS und der Prozess der Nährstoffrückgewinnung aus der KSA direkt im Anschluss an die Abwasserreinigung der KA in Eberswalde durchgeführt wird.

Auch wenn es, wie in Kapitel 2.8 erläutert, unterschiedliche Ansatzpunkte zur Nährstoffrückgewinnung gibt, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Rückgewinnung aus der KSA mittels thermischen Verfahren betrachtet, da diese die höchste  $P$ -Rückgewinnungsrate aufweisen. Als Grundlage wird das „Ash Dec“-Verfahren angenommen, das im Bereich der Nährstoffrückgewinnung ausreichend erforscht ist und bereits in Pilotanlagen getestet wurde. [Klein, 2015]

Außerdem wird sich nur auf eine Rückgewinnung von  $P$  beschränkt, da die Rückgewinnung von  $N$  und  $K$  nach Stand der Technik noch nicht im wirtschaftlichen Maße umsetzbar ist und  $P$  die kritischste Ressource ist [Umweltbundesamt, 2018]. Um auf das Endprodukt eines  $NPK$ -Düngers zu kommen, werden in diesem Szenario die Nährstoffe  $N$  und  $K$  weiterhin synthetisch hergestellt und mit dem wiedergewonnenen  $P$  zu einem  $NPK$ -Dünger verarbeitet. Wie bei der Pilotanlage für die KSK und Urinaufbereitung wird auch bei der konventionellen KA das System zunächst modelliert. Abbildung 3.4 zeigt die Prozessschritte der angenommenen KA mit nachgeschalteter  $P$ -Rückgewinnung.

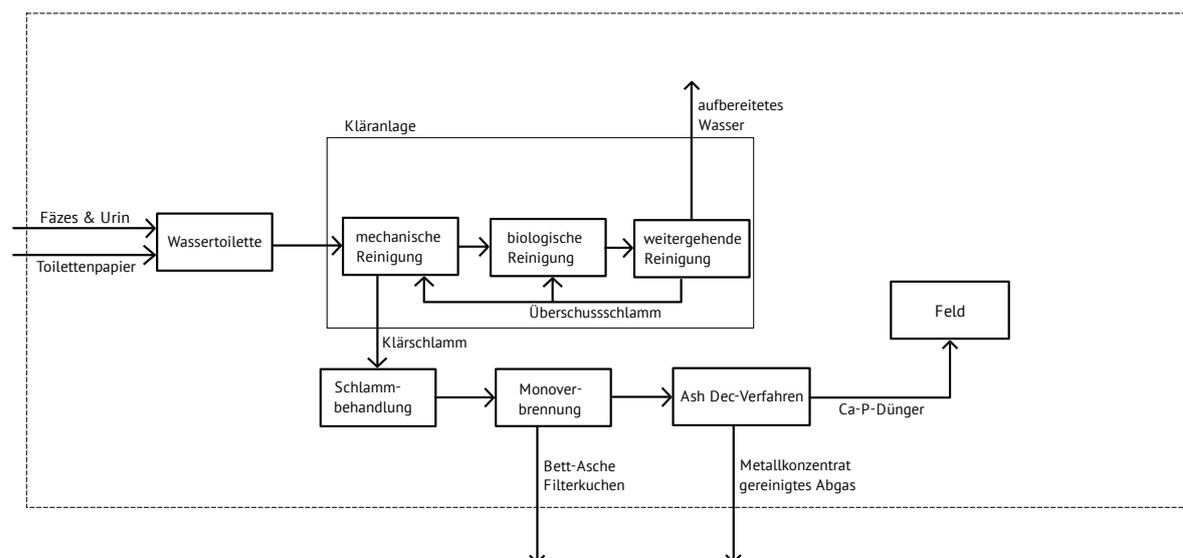


Abbildung 3.4.: Fließbild der konventionellen Kläranlage mit Phosphorrückgewinnung

Fäzes und Urin gelangen zusammen mit Toilettenpapier in eine konventionelle Wassertoilette und in das Abwassersystem, das in die KA in Eberswalde führt. Hier finden zunächst die Stufen der mechanischen und biologischen Reinigung statt und anschließend eine weitergehende Reinigung. Der anfallende Schlamm wird behandelt und verbrannt (vgl. Kapitel 2.8). Dabei entstehen als Outputströme Filterkuchen und Bettasche. Die KSA wird anschließend mittels „Ash Dec“-Verfahren behandelt, um  $P$  zurückzugewinnen. Als Output entsteht ein phosphorreiches Granulat, das mit  $N$  und  $K$  angereichert werden kann. [BAFU, 2009]

### 3.6.2. Nährstoffrückgewinnung aus KSA

Im folgendem Abschnitt werden die Berechnungen der  $P$ -Verluste in der Düngemittelherstellung mittels des „Ash Dec“-Verfahrens aus KSA erläutert. Da der Output einen mineralischen Dünger ersetzen soll, werden bei der Berechnung keine Massenströme betrachtet, sondern ausschließlich eine  $P$ -Bilanz aufgestellt. Die Daten der  $P$ -Verluste für die KA und KSA werden aus einer Materialflussanalyse für  $P$  von Egle et al., 2016 entnommen. Diese gehen von einer jährlichen  $P$ -Menge von 66.000  $kg$  aus. Für die Berechnungen der  $P$ -Verluste in Anteilen berechnet wird diese Menge auf 100 % gesetzt.

Wie auch bei der Behandlung in der KSK wird bei der konventionellen KA mit einer Standardabweichung der  $P$ -Mengen von 30 % gerechnet. Für den  $P$ -Verlust während des „Ash Dec“-Verfahrens werden Daten aus BAFU, 2009 entnommen. Abbildung 3.5 zeigt die errechnete  $P$ -Bilanz nach Anteilen.

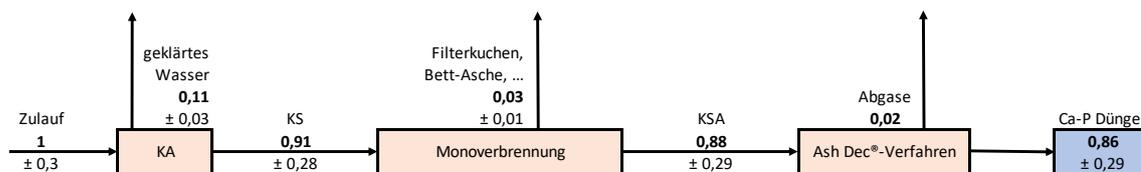


Abbildung 3.5.: Phosphorbilanz nach Anteilen bei der Düngemittelherstellung

Bereits in der Klärung des Abwasser verbleiben ca. 10 % des  $P$  im geklärten Wasser und gelangen wieder in die Hydrosphäre. Die restlichen 90 % sind im KS enthalten, bei der Verbrennung geht ein geringer Teil verloren. Während des „Ash Dec“-Verfahrens können 98 % des in der KSA enthaltenen  $P$  zurückgewonnen werden, der Rest wird über Abgase ausgetragen. Insgesamt können bis zu 90 % des  $P$  wiedergewonnen werden. [Herzel et al., 2018]

Die aufgestellte  $P$ -Bilanz nach Anteilen wird abschließend mit der  $P$ -Menge in Fäzes, Urin und Toilettenpapier verrechnet, die pro FE verwertet werden kann:

Tabelle 3.4.: Phosphormengen pro funktionelle Einheit

Massenstrom	Phosphormenge (MW) [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]
Fäzes	0,38
Urin	0,37
Toilettenpapier	0,0
<b>insgesamt</b>	<b>0,75</b>

Um die beiden betrachteten Systeme vergleichen zu können, soll der Output an Nährstoffen gleich sein. Da bei der Behandlung der KS nur  $P$  zurückgewonnen wird, werden  $N$  und  $K$  synthetisch hergestellt und im richtigen Verhältnis beigemischt. Die Ergebnisse der Düngemittelherstellung aus der KSA sind in Kapitel 4.2.1 dargestellt.

### 3.6.3. Energieverbrauch Düngemittelherstellung aus KSA

Für die Berechnung der benötigten Energie für die Düngemittelherstellung aus KSA werden die Schritte der Monoverbrennung des KS zur KSA, sowie die  $P$ -Rückgewinnung mittels „Ash Dec“-Verfahren betrachtet. Für die Nährstoffe  $N$  und  $K$  wird der Energieverbrauch der synthetischen Düngerherstellung berechnet.

Für den Energieverbrauch des „Ash Dec“-Verfahrens werden Daten von Reinhardt, 2014 verwendet. Hier wird von einem Energieverbrauch von 320 - 600  $kWh$  pro  $Mg$  KSA ausgegangen, je nachdem ob das Verfahren der Rückgewinnung in die Monoverbrennung mit integriert ist. Nach Herzel et al., 2018 befinden sich 9,37 %  $P$  in der KSA. Mit dieser Angabe und den errechneten zurückgewonnen  $P$ -Werten aus Kapitel 3.6.2 wird zunächst die zu behandelnde Menge an KSA pro FE berechnet und aus dieser der Energieverbrauch auf die FE bezogen.

Wie bei der Fäzesaufbereitung werden die Energieverbräuche für den MW und die Standardabweichung der FE berechnet.

Beim  $N$  wird das Haber-Bosch-Verfahren als Grundlage für die  $N$ -Düngemittelherstellung angenommen. Nach Deutscher Bundestag, 2018 werden bei der Ammoniak-Herstellung mit dem Haber-Bosch-Verfahren pro  $Mg$  acht  $MWh$  Energie verbraucht, wenn der Wasserstoff mit Methan erzeugt wird. Auf Grundlage dieser Angabe wird die Energie pro  $kg$   $N$  berechnet und auf die FE skaliert. Der Energieaufwand für Kaliumoxid wird dem Industrieverband Agrar e.V., 2019 entnommen und auf die Elementarform  $K$  sowie die FE heruntergerechnet. Bei  $N$  und  $K$  werden neben den MW auch mit den Standardabweichungen der Mengen die benötigte Energie berechnet. Da der Energieverbrauch der synthetischen Herstellung mit fortschreitender Technik sinkt [Industrieverband Agrar e.V., 2019], werden für  $N$  und  $K$  möglichst aktuelle Daten verwendet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.2.2 dargestellt.

#### 3.6.4. Wasserverbrauch der Düngemittelherstellung aus KSA

Bei der Berechnung des Wasserverbrauches der Düngemittelherstellung aus KSA wird der Wasserverbrauch einer konventionellen Spültoilette betrachtet. Wie bei der Trockentoilette wird ebenfalls das benötigte Wasser zur Reinigung der Toilette, sowie Transport und der Vertrieb nicht mitbetrachtet. Ebenso wird potentiell benötigtes Wasser für die Herstellung von synthetischem  $N$ - und  $P$ - Düngern (wie beispielsweise für die Elektrolyse von Wasserstoff) nicht mitbetrachtet. Für den Wasserverbrauch einer Spültoilette werden Daten von Berliner Wasserbetriebe, 2022b verwendet.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Trockentoiletten

#### 4.1.1. Nährstoffrückgewinnung durch KSK

Abbildung 4.1 zeigt die Entwicklung der Massen während der KSK. Die Verteilung der Ergebnisse sowie vollständige Datentabellen sind im Anhang zu finden (Abbildungen A.1 - A.3, sowie Tabelle A.1).

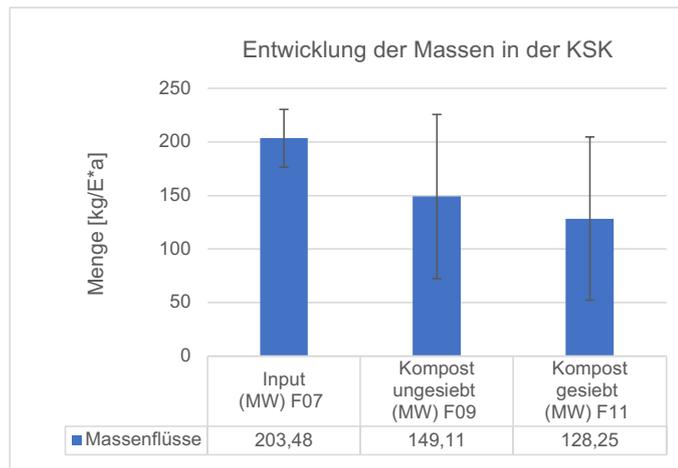


Abbildung 4.1.: Entwicklung der Massen in der KSK

Es sind die MW und Standardabweichungen der drei Massenflüsse des Inputs, des ungesiebten Kompostes und des gesiebten Kompostes dargestellt. Als Output der Kompostierung bleibt eine Masse von  $149,11 \frac{kg}{E \cdot a}$  mit einer Standardabweichung von  $76,83 \frac{kg}{E \cdot a}$  erhalten. Nach der Siebung bleibt noch eine Masse von  $128,25 \frac{kg}{E \cdot a}$  mit einer Standardabweichung von  $76,28 \frac{kg}{E \cdot a}$  erhalten. Das bedeutet, dass ein Massenverlust von  $75,23 kg$  bzw. 37% während des Prozesses der Kompostherstellung stattfindet. Die Entwicklung der Nährstoffmengen sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Im Anhang sind die Standardabweichungen der Mengen (Tabelle A.1) sowie die Verteilung der Ergebnisse (Abbildung A.4 - A.6) zu finden.

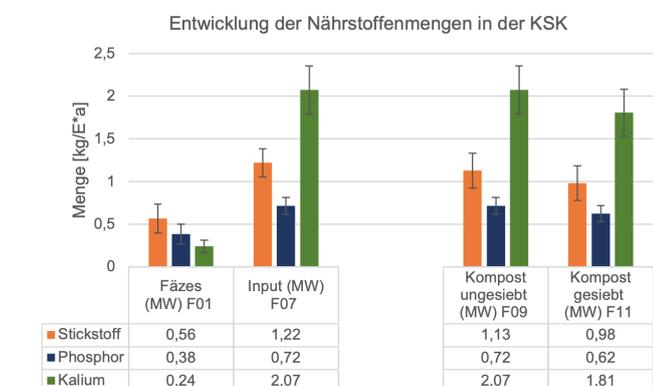


Abbildung 4.2.: Entwicklung der Nährstoffmengen in der KSK

Werden die Entwicklungen vom Input ( $F07$ ) zum ungesieberten Kompost ( $F09$ ) und gesieberten Kompost ( $F11$ ) betrachtet, ist ein ein Nährstoffverlust von allen drei Nährstoffen zu erkennen. Bei  $N$  findet während der Kompostierung ein Verlust von  $0,09 \text{ kg}$  oder  $8\%$  statt, bei  $P$  und  $K$  kein Verlust. Durch die Rückführung von einem Teil des gesieberten Kompostes entsteht als Output ein Kompost mit  $0,98 \text{ kg N}$ ,  $0,62 \text{ kg P}$  und  $1,81 \text{ kg K}$ .

Wie Abbildung 4.3 zu entnehmen, entspricht das einem Nährstoffanteil von ca.  $0,8\%$   $N$ ,  $0,5\%$   $P$ , sowie  $1,4\%$   $K$ . Vom Input ( $F07$ ) zum fertigen Kompost ( $F11$ ) zeichnet sich damit ein Zuwachs aller Nährstoffanteile ab. Werden die Nährstoffanteile in den Fäzes ( $F01$ ) mit denen im Input ( $F07$ ) verglichen, zeichnet sich bei  $N$  und  $K$  eine Abnahme ab, bei  $P$  ein Zuwachs.

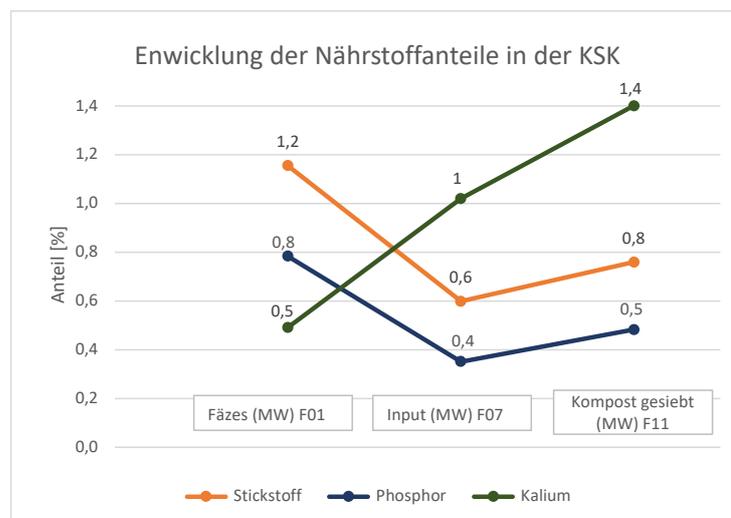


Abbildung 4.3.: Entwicklung der Nährstoffanteile in der KSK

Werden die anderen Nährstoffgehalte auf den  $P$ -Gehalt bezogen, können die Nährstoffverhältnisse des  $NPK$ -Düngers als  $1,58 - 1 - 2,92$  geschrieben werden. Wie durch den Nährstoffanstieg von den Fäzes  $F01$  zum Input  $F07$  zu erkennen, sind Anteile der Nährstoffe auch auf die Zuschlagstoffe zurückzuführen. Die Zusammensetzung des Kompostes ist Tabelle 3.1 zu entnehmen. Auch im fertigen Kompost  $F11$  sind Anteile der Nährstoffe durch die Zuschlagstoffe bedingt. Die Verteilungen von  $N$ ,  $P$  und  $K$  im fertigen Kompost sind in Abbildungen 4.4 - 4.6 dargestellt.

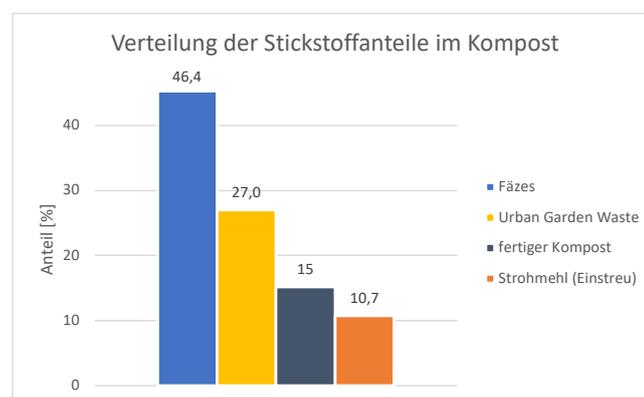


Abbildung 4.4.: Stickstoffanteile nach ihrer Herkunft

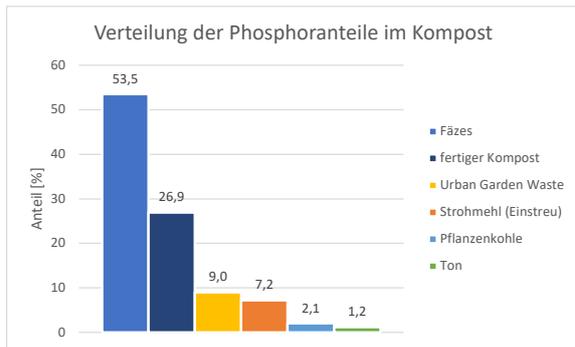


Abbildung 4.5.: Phosphoranteile nach ihrer Herkunft

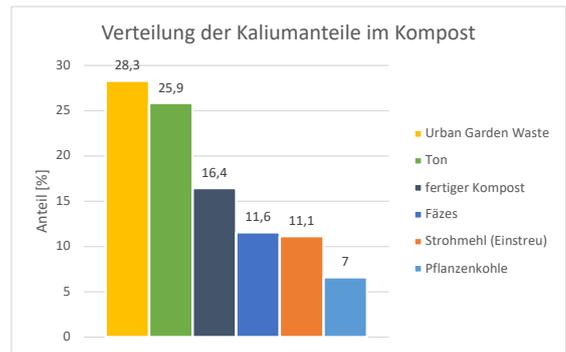


Abbildung 4.6.: Kaliumanteile nach ihrer Herkunft

### 4.1.2. Nährstoffrückgewinnung der Urinaufbereitung

Abbildung 4.7 zeigt die Mengen an Nährstoffen, die pro FE bei der Urinaufbereitung zurückgewonnen werden können. Bei *N* findet ein Nährstoffverlust von 2,89 kg (MW) pro FE statt. Bei *P* hingegen können 0,27 kg (MW) nicht zurückgewonnen werden, sowie 0,47 kg (MW) *K*. Als Output entsteht im Mittel ein Flüssigdünger mit 1,02 kg N, 0,1 kg P und 0,44 kg K. In Tabelle A.2 im Anhang sind alle Werte des Prozesses zusammengefasst, in Abbildungen A.7 - A.10 die Verteilung der Ergebnisse.

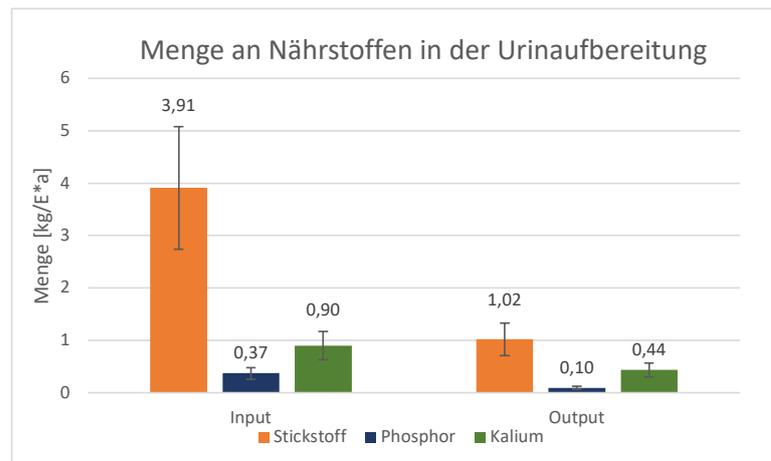


Abbildung 4.7.: Nährstoffmengen während der Urinaufbereitung

Trotz der Nährstoffverluste findet ein Anstieg der Nährstoffkonzentrationen im Endprodukt im Vergleich zum Urin statt. Wie in Abbildung 4.8 zu sehen entsteht ein Urindünger mit 4,2% *N*, 1,8% *P* und 0,4% *K*.

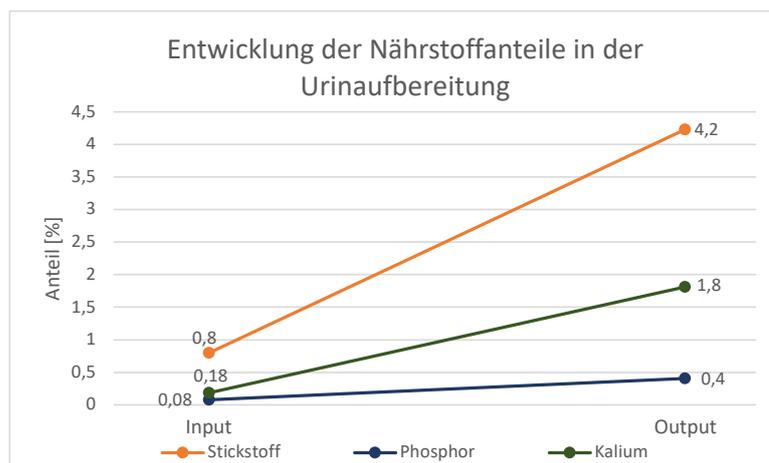


Abbildung 4.8.: Nährstoffanteile während der Urinaufbereitung

#### 4.1.3. Zurückgewonnene Nährstoffe durch Behandlung der Fäkalien

Werden die Outputs der Fäzesaufbereitung durch KSK und Urinaufbereitung gemeinsam betrachtet, entstehen ein fester *NPK*-Kompostdünger sowie ein Flüssigdünger, der eine besonders hohe Konzentration an *N* enthält. Die zurückgewonnen Nährstoffmengen (MW sowie Standardabweichung) der beiden Outputs sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1.: Zurückgewonnene Nährstoffmengen der Fäkalienbehandlung

	$N \left[ \frac{kg}{E \cdot a} \right]$		$P \left[ \frac{kg}{E \cdot a} \right]$		$K \left[ \frac{kg}{E \cdot a} \right]$	
	MW	St.Ab.	MW	St.Ab.	MW	St.Ab.
<b>Fäzesaufbereitung</b>	0,98	0,20	0,62	0,09	1,81	0,28
<b>Urinaufbereitung</b>	1,02	0,31	0,10	0,03	0,44	0,13
<b>insgesamt</b>	<b>2</b>	<b>0,51</b>	<b>0,72</b>	<b>0,12</b>	<b>2,25</b>	<b>0,41</b>

In Tabelle 4.2 sind die Mengen an Nährstoffen dargestellt, die in Brandenburg bzw. Barnim zurückgewonnen werden können, wenn die Einwohner:innenzahl mit den zurückgewonnenen Mengen pro FE verrechnet wird.

Tabelle 4.2.: Zurückgewonnene Nährstoffmengen der Fäkalienbehandlung in Barnim und Brandenburg

	$N \left[ \frac{Mg}{a} \right]$		$P \left[ \frac{Mg}{a} \right]$		$K \left[ \frac{Mg}{a} \right]$	
	MW	St.Ab.	MW	St.Ab.	MW	St.Ab.
<b>Barnim (187.343 E)</b>	375,32	95,82	134,85	23,77	420,29	77,8
<b>Brandenburg (2.537.868 E)</b>	5.084	1.298	1.827	322	5.693	1.054

#### 4.1.4. Energiebilanz der KSK und Urinaufbereitung

Auf die FE bezogen benötigt die Pilotanlage zur Düngemittelherstellung aus Fäzes Energie von 0,99 *kWh*. Für die Urinaufbereitung werden 63,58 *kWh* benötigt. Abbildungen 4.9 und 4.10 zeigen die MW sowie Standardabweichungen der Energieverbräuche der Prozessschritte.

Insgesamt werden für die Düngemittelherstellung aus Fäzes und Urin also im Mittel  $64,58 \text{ kWh}$  benötigt. Tabelle 4.3 fasst den Energieverbrauch der Pilotanlage in Eberswalde mit einer KSK der Fäzes und Urinaufbereitung zusammen. Eine Tabelle mit den Standardabweichungen und MW aller Prozesse ist im Anhang in Tabelle A.3 zu finden.

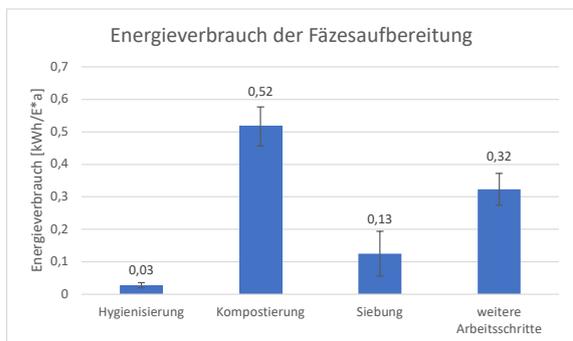


Abbildung 4.9.: Energieverbrauch der Fäzesaufbereitung

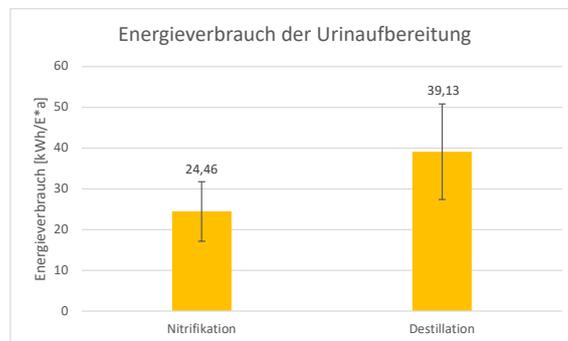


Abbildung 4.10.: Energieverbrauch der Urinaufbereitung

Tabelle 4.3.: Energiebilanz der KSK und Urinaufbereitung

Prozessschritt	Energieverbrauch [kWh]	(MW)	Standardabweichung [kWh]
<b>Fäzesaufbereitung</b>	0,99		0,19
<b>Urinaufbereitung</b>	63,6		19,1
<b>insgesamt</b>	<b>64,6</b>		<b>19,3</b>

#### 4.1.5. Wasserverbrauch der KSK und Urinaufbereitung

Tabelle 4.4 gibt den Wasserverbrauch der Düngemittelherstellung aus Fäkalien wieder. Bei der Kompostierung der Fäzes werden pro FE im Mittel  $39,13 \text{ l}$  Wasser benötigt. Dagegen können durch die Destillation in der Urinaufbereitung pro FE im Mittel  $474,43 \text{ l}$  gewonnen werden. Insgesamt ergibt sich also ein negativer Wasserverbrauch von  $453,23 \text{ l}$  (MW), was bedeutet, dass die Düngemittelherstellung aus Trockentoiletteninhalten ohne Wasserverbrauch auskommt und aus dem Urin Wasser zurückgewonnen werden kann.

Tabelle 4.4.: Wasserverbrauch der KSK und Urinaufbereitung

Prozessschritt	Wasserverbrauch [ $\frac{\text{l}}{\text{E}\cdot\text{a}}$ ]	(MW)	Standardabweichung [ $\frac{\text{l}}{\text{E}\cdot\text{a}}$ ]
<b>Kompostierung</b>	39,13		6,43
<b>Urinaufbereitung</b>	-474,43		-142,33
<b>insgesamt</b>	<b>-453,23</b>		<b>-135,9</b>

## 4.2. Koventionellen Kläranlagen

### 4.2.1. Nährstoffrückgewinnung aus KSA

Abbildung 4.11 zeigt die Menge an  $P$ , die pro FE in die KA kommt und mit dem „Ash Dec“-Verfahren zurückgewonnen werden kann:

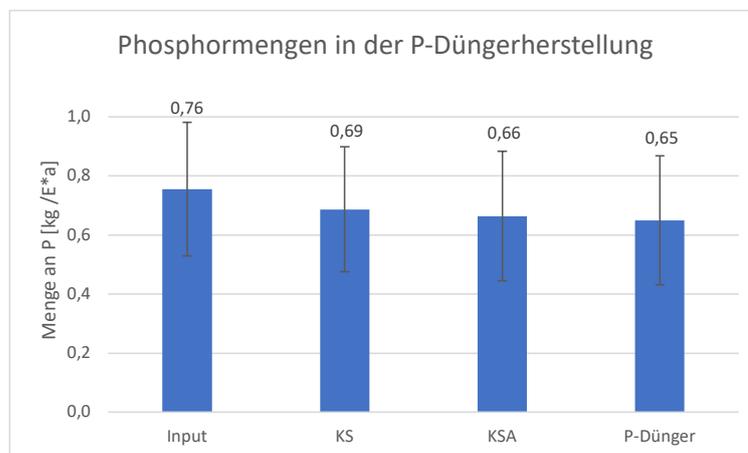


Abbildung 4.11.: Menge an  $P$  während der Rückgewinnung

Pro FE gelangen im Mittel  $0,76 \text{ kg } P$  durch Fäkalien mit dem Abwasser in die kommunale KA. Im KS sind noch  $0,69 \text{ kg } P$  enthalten, in der KSA  $0,66 \text{ kg } P$ . Nach der KSA-Behandlung durch das „Ash Dec“-Verfahren verlassen  $0,65 \text{ kg } P$  das System. Um einen zur gleichwertiges Produkt zum Dünger aus Kompost und Urin zu erhalten (vgl. Tabelle 4.1), müssen daher  $1,81 \text{ kg } N$  und  $2,28 \text{ kg } K$  synthetisch hergestellt werden. Tabelle A.4 im Anhang zeigt die MW sowie Standardabweichungen der  $P$ -Mengen.

### 4.2.2. Energiebilanz

Der Energieverbrauch setzt sich aus der benötigten Energie für das „Ash Dec“-Verfahren sowie die synthetische Herstellung von  $N$  und  $K$  zusammen. Abbildung 4.12 zeigt die benötigte Energie für die  $P$ -Rückgewinnung mit dem „Ash Dec“-Verfahren pro FE, die genauen Werte sind in Tabelle A.5 im Anhang zu finden.

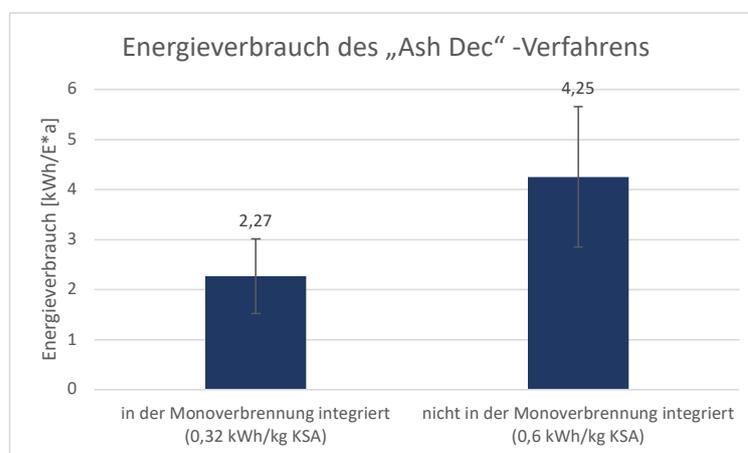


Abbildung 4.12.: Energieverbrauch der  $P$ -Rückgewinnung pro FE

Je nachdem, ob das „Ash Dec“-Verfahren in die Monoverbrennung integriert ist, werden im Mittel  $2,27 \text{ kWh}$  bis  $4,25 \text{ kWh}$  benötigt. Die Standardabweichungen für die Menge an zurückgewonnenem  $P$  mit einbezogen, berechnet sich eine benötigte Energiemenge zwischen  $1,52$  und  $5,66 \text{ kWh}$  pro FE.

Der Energieverbrauch für die synthetische Herstellung von  $N$  und  $K$  ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Für  $N$  werden im Mittel  $11,9 \text{ kWh}$  und für  $K$   $1,57 \text{ kWh}$  benötigt, wobei der Energieverbrauch ebenfalls mit der Standardabweichung der Menge von  $N$  und  $K$  sinkt bzw. steigt. In Tabelle A.5 im Anhang sind die genauen Werte dargestellt.

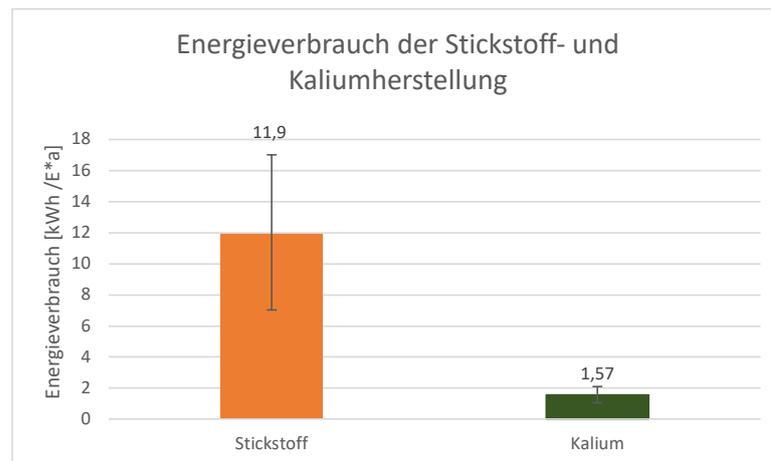


Abbildung 4.13.: Energieverbrauch der  $N$ - und  $K$ -Herstellung pro FE

Insgesamt werden für die Düngemittelherstellung aus zurückgewonnenem  $P$  und synthetischem  $N$  und  $K$  mit gleichen Mengenverhältnissen zum Dünger aus Trockentoiletteninhalten also zwischen  $9,6$  und  $24,77 \text{ kWh}$  benötigt, wobei dafür knapp die Hälfte für die synthetische Stickstoffdüngemittelherstellung verbraucht wird. Für den Vergleich mit dem Dünger aus Trockentoiletteninhalten wird im Folgenden angenommen, dass das „Ash Dec“-Verfahren in die Monoverbrennung integriert und somit der Energieverbrauch der  $P$ -Rückgewinnung  $2,27 \text{ kWh}$  pro FE beträgt. Der MW des Gesamtenergieverbrauches ist damit  $15,74 \text{ kWh}$  pro FE mit einer Abweichung von ca.  $6,2 \text{ kWh}$ .

#### 4.2.3. Wasserverbrauch der Düngemittelherstellung aus KSA

Bei einem Wasserverbrauch von  $110 \text{ l}$  pro Person pro Tag, von welchen  $31 \%$  für die Toiletten-spülung verwendet werden, werden pro FE  $12.446 \text{ l}$  bzw.  $12,45 \text{ m}^3$  Wasser benutzt.

## 5. Diskussion

### 5.1. Vergleich beider Methoden

#### 5.1.1. Nährstoffrecycling

In Abbildung 5.1 sind die Nährstoffrecyclingraten der beiden untersuchten Systeme gegenüber gestellt.

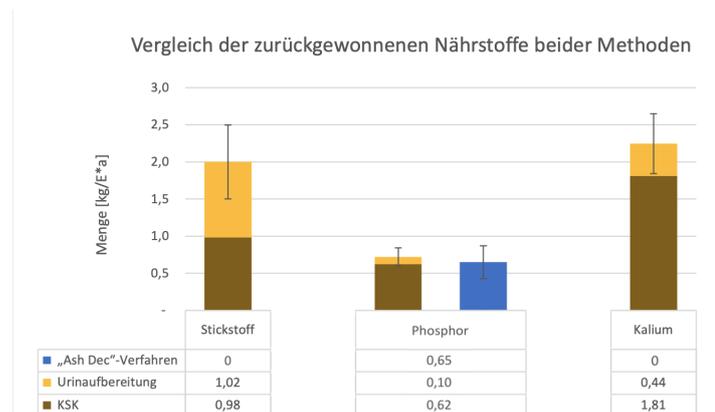


Abbildung 5.1.: Zurückgewonnene Nährstoffe bei der trockenen Fäkalienaufbereitung und dem „Ash Dec“-Verfahren

Da durch das „Ash Dec“-Verfahren nur  $P$  zurückgewonnen wird, schneidet die Rückgewinnung aus KSA im Vergleich zur Behandlung der trocken gesammelten Fäkalien deutlich schlechter ab. Auch beim  $P$  werden durch die Behandlung von KSA mit  $0,65 \frac{kg}{E \cdot a}$  (MW),  $0,7 \frac{kg}{E \cdot a}$  weniger gewonnen als bei der Behandlung durch KSK und Urinaufbereitung. Allerdings sind große Anteile der Nährstoffe im Kompost auf die Zuschlagstoffe zurückzuführen und nicht auf die Nährstoffe in der Fäzes. Werden nur die Nährstoffe betrachtet, die direkt aus der Fäzes und dem Urin zurückgewonnen werden, und mit der Rückgewinnungsrate des „Ash Dec“-Verfahrens gegenübergestellt, ergeben sich die in Abbildung 5.2 dargestellten Mengen.

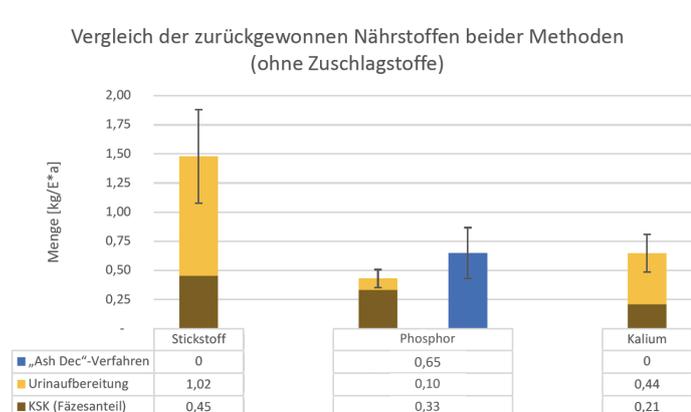


Abbildung 5.2.: Zurückgewonnene Nährstoffe bei der Fäkalienaufbereitung (ohne Zuschlagstoffe) und dem „Ash Dec“-Verfahren

Die zurückgewonnenen Mengen an  $N$ ,  $P$  und  $K$  verringern sich, wenn nur der Anteil betrachtet wird, der aus Fäzes und Urin kommt. Bei der KSK werden im Mittel  $0,45 \frac{kg}{E \cdot a}$   $N$  mit einer Standardabweichung von  $0,09 \frac{kg}{E \cdot a}$  zurückgewonnen. Beim  $P$  werden aus der Fäzes  $0,33 \frac{kg}{E \cdot a}$  (MW, Standardabweichung  $0,05 \frac{kg}{E \cdot a}$ ) zurückgewonnen, beim  $K$   $0,21 \frac{kg}{E \cdot a}$  (MW, Standardabweichung  $0,03 \frac{kg}{E \cdot a}$ ). Gerade die Menge vom zurückgewonnenen  $K$  verringert sich deutlich, wenn nur die Fäzes in der KSK betrachtet wird. Hier kommen nur ungefähr 11 % des  $K$  aus der Fäzes (vgl. Abbildung 4.6). Beim  $N$  und  $P$  sind ungefähr die Hälfte der zurückgewonnenen Mengen auf die Fäzes zurückzuführen. Zusammen mit dem aufbereiteten Urin können aus trocken gesammelten Fäkalien also  $0,43 \frac{kg}{E \cdot a}$   $P$  (MW) mit einer Standardabweichung von  $0,08 \frac{kg}{E \cdot a}$  zurückgewonnen werden. Das sind im Mittel  $0,25 \frac{kg}{E \cdot a}$   $P$  weniger als beim „Ash Dec“-Verfahren, wobei bei diesem auch die Standardabweichung mit  $0,22 \frac{kg}{E \cdot a}$  höher ausfällt. Wird also nur  $P$  betrachtet, ist das Potential der zurückzugewinnenden Nährstoffe bei der Benutzung von Wassertoiletten und Behandlung der KSA höher als bei der Aufbereitung von trocken gesammelten Fäkalien. Allerdings müssten nach heutigem Stand der Technik die Nährstoffe  $N$  und  $K$  für Düngemittel weiterhin synthetisch hergestellt werden. Bei der Behandlung der trocken gesammelten Fäkalien können diese auch zurückgewonnen werden.

### 5.1.2. Energiebilanz

Abbildung 5.3 stellt die Energieverbräuche der untersuchten Systeme gegenüber:

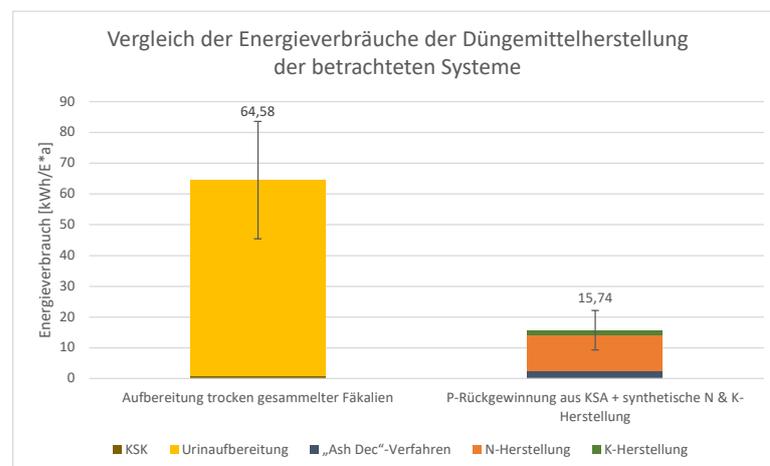


Abbildung 5.3.: Energieverbräuche der untersuchten Systeme

Der Energieverbrauch zur Düngemittelherstellung durch KSK und Urinaufbereitung ist erkennbar höher als der durch  $P$ -Rückgewinnung mittels „Ash Dec“-Verfahren und die synthetische Düngemittelherstellung von  $N$  und  $K$ . Mit einem MW von  $64,58 \frac{kWh}{E \cdot a}$  und einer Standardabweichung von  $19,1 \frac{kWh}{E \cdot a}$  ist der Energieverbrauch mehr als viermal so hoch wie der Verbrauch der  $P$ -Rückgewinnung aus KSA und synthetische Herstellung von  $N$  und  $K$  (mit einem MW von  $15,74 \frac{kWh}{E \cdot a}$  und einer Standardabweichung von  $6,41 \frac{kWh}{E \cdot a}$ ). Wie in Abbildung 5.3 allerdings auch deutlich erkennbar, macht die Urinaufbereitung 98 % des Energiebedarfs des Systemes aus. Das liegt an den hohen Energieverbräuchen der Destillation und Nitrifikation (vgl. Kapitel 3.5.4). Die Kompostierung hingegen ist mit nicht einmal  $1 kWh$  pro FE im Vergleich sehr energiesparend.

### 5.1.3. Wasserbilanz

Die Trockentoilette und damit die Sammlung der Fäkalien kommt bis auf die Reinigung ohne Wasser aus, im Vergleich dazu werden die Fäkalien bei einer Wassertoilette zusammen mit täglich mit 34 l Trinkwasser zusammen in die Kanalisation gespült. Zwar wird das Wasser wieder aufbereitet, doch zur Düngemittelherstellung aus Fäkalien wird bei einer Wassertoilette und der Behandlung der KSA der Umweg über die KA gegangen und so pro FE 12,45 m<sup>3</sup> Wasser verbraucht. Da gleichzeitig bei der Urinaufbereitung pro FE 474,43 l (MW; vgl. Tabelle 4.4) Trinkwasser aus der Destillation gewonnen werden können, schneidet die Aufbereitung der trocken gesammelten Fäkalien hinsichtlich des Wasserverbrauches wesentlich besser ab als die Wassertoilette.

## 5.2. Vergleich der Ergebnisse mit vorhandener Literatur

Wegen der gesetzlichen Lage gibt es nur eine kleine Menge an Literaturwerten zu Düngemitteln aus Fäkalien. Zur Einordnung sollen die Ergebnisse mit den Literaturwerten, die in Kapitel 2.6.1 vorgestellt wurden, verglichen werden.

Bei der KSK entsteht ein Dünger unter ähnlichen Aufbereitungsmethoden wie bei dem in Kapitel 2.6.1 vorgestellten Projekt „BioFAVOR II“. Tabelle 5.1 zeigt die Nährstoffgehalte der Endprodukte im Vergleich, wobei die Angaben von „BioFAVOR II“ in Elementarform ungerechnet wurden.

Tabelle 5.1.: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit BioFAVOR II

Nährstoff	Berechnete Nährstoffgehalte [%]	Nährstoffgehalte von BioFAVOR II [%TM]
<i>N</i>	0,8	2,8
<i>P</i>	0,6	2,1
<i>K</i>	1,4	2,2

Zu erkennen ist, dass die Nährstoffgehalte des berechneten Outputs deutlich unter den Werten von „BioFAVOR II“ liegt. Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese die Nährstoffe pro TM angeben. Wie hoch der Wassergehalt im Kompost des in dieser Arbeit untersuchten Systems ist, ist unklar. Deshalb ist der direkt Vergleich schwierig, da keine Nährstoffgehalte pro kg TM berechnet wurden. Gründe für die Abweichung könnten die verwendeten Zuschlagstoffe sowie deren Nährstoffgehalte sein. Während im untersuchten System mehrere Zuschlagstoffe angenommen wurden (vgl. Kapitel 3.5.2), wurde sich beim Projekt „BioFAVOR II“ nur auf Biokohle aus Grünschnitten beschränkt. Ebenso könnten unterschiedliche Kompostierungsbedingungen für die Abweichungen der Ergebnisse verantwortlich sein.

Bei der Urinaufbereitung wurden für die Berechnungen bereits Angaben des fertigen Düngers „Aurin“ verwendet, weshalb hier kein Vergleich mit diesem gezogen werden kann. Ebenso wie bei der Düngemittelherstellung aus KSA, bei der Angaben von dem „Ash Dec“-Verfahren zum *P*-Gehalt verwendet wurden.

### 5.3. Bewertung der Ergebnisse

Die Untersuchung beider Systeme zeigt jeweils Vor- und Nachteile auf. Hinsichtlich der Rückgewinnung von Nährstoffen wird bei den trocken gesammelten und aufbereiteten Fäkalien nicht der Umweg über das Abwassersystem gegangen. Wird der gesamte Kompost betrachtet, der durch die Fäzes hergestellt werden kann, so entsteht pro FE auch ein Dünger, der größere Mengen an Nährstoffen enthält, als über die Behandlung von KSA. Allerdings können die Fäzes nicht ohne Zuschlagstoffe kompostiert werden, sondern kann nur anderem Kompost beigefügt werden. Um die Nährstoffe  $N$ ,  $P$  und  $K$  abzudecken, müssten mit der Behandlung der trocken gesammelten Fäkalien im Gegensatz zur Rückgewinnung aus KSA keine Nährstoffe synthetisch hergestellt werden.

Besonders aus dem Urin kann ein stickstoffreicher Flüssigdünger hergestellt werden. Da dies in der Schweiz von der Firma „Vuna GmbH“ bereits durchgeführt und auf den Markt gebracht wurde, ist auch die Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit eines Urindüngers belegt. Allerdings wird bei der Urinaufbereitung vergleichsweise viel Energie benötigt. Nach Abbildung 5.3 ist die Urinaufbereitung wesentlich energieintensiver als die synthetische Herstellung von  $N$  mit dem Haber-Bosch-Verfahren. Allerdings wird bei der Urinaufbereitung der  $N$ -Kreislauf deutlich verkürzt und es entstehen bis auf Wasser keine zusätzlichen Nebenprodukte oder Emissionen.

Beim System der Rückgewinnung aus KSA wird  $N$  im Abwasser weiterhin eliminiert und muss nach jetziger Gesetzeslage nicht aus dem KS wiedergewonnen werden (vgl. Kapitel 2.5), das gleiche gilt auch für  $K$ . Zeitgleich wird die direkte bodenbezogene Verwertung von KS immer weiter eingeschränkt, sodass die Nährstoffe  $N$  und  $K$  der Nutzung entzogen werden. Dies könnte mit der trockenen Sammlung umgangen werden. Die weitergehende Reinigungsstufe, in der Nährstoffe wie  $N$ ,  $P$  und  $K$  eliminiert werden, ist zudem noch nicht in allen KA vorhanden und besonders in vielen Kleinkläranlagen (wie in Barnim in den KA unter 2.000 EW) kein Standard (vgl. Kapitel 2.1). Fällt die weitergehende Reinigungsstufe weg, findet keine Eliminierung von Nährstoffen statt, was zu einer Gewässerbelastung mit  $N$ ,  $P$  und  $K$  führt. Bei der Sammlung von Fäzes und Urin abseits vom Abwassersystem wird die Nährstoffeintrag im Abwasser sehr stark reduziert, was dieses Problem lösen könnte.

Auch die Wasserbilanz spricht für die Aufbereitung der trocken gesammelten Fäkalien. Hier muss einzig der Kompost bewässert werden, gleichzeitig kann ein Großteil der Flüssigkeit im Urin zurückgewonnen werden. Bei der Verwendung einer Wassertoilette und der Rückgewinnung von  $P$  aus KSA werden im Gegensatz dazu große Mengen an Trinkwasser verschmutzt, deren Aufbereitung ebenfalls Energie kostet. Diese wurde zwar in der Energiebilanz nicht berücksichtigt, spricht aber ebenfalls für die trockene Sammlung von Fäkalien.

Für die Benutzung der Wassertoilette und der Nährstoffrückgewinnung aus KSA sprechen die bereits vorhandenen Systeme. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben besitzen über 90 % der Bevölkerung in Barnim einen Anschluss an die Kanalisation und somit an eine KA. Die Umrüstung auf Trockentoiletten sowie die Sammlung der Fäkalien würde einen logistischen und finanziellen

Aufwand bedeuten. Zudem kann beispielsweise das „Ash Dec“-Verfahren in die Monoverbrennung integriert werden und die Installation würde keine Änderung der Systeme zur Folge haben. Auch  $N$  und  $K$  könnten durch weiterführende Forschung aus KS zurückgewonnen werden und müssten nicht mehr im gleichen Maße wie heute hergestellt werden. Tabelle 5.2 fasst die Vor- und Nachteile der beiden untersuchten Systeme zusammen.

Tabelle 5.2.: Vor- und Nachteile der untersuchten Systeme

	Vorteile	Nachteile
<b>Aufbereitung trocken gesammelter Fäkalien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nährstoffrückgewinnung von <math>N</math>, <math>P</math>, <math>K</math></li> <li>• Kompostierung ist energieeffizient</li> <li>• kaum Wasserverbrauch, zeitgleich Gewinnung von neuem Trinkwasser</li> <li>• keine Nährstoffeinträge in Gewässer durch Abwasser</li> <li>• Abwasser generell sauberer, spart daher Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompostierung nur mit Zuschlagstoffen möglich</li> <li>• Urinaufbereitung energieintensiv</li> <li>• Infrastruktur noch nicht vorhanden</li> </ul>
<b><math>P</math>-Rückgewinnung aus KSA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kann in Monoverbrennung integriert werden</li> <li>• Infrastruktur schon vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Rückgewinnung von <math>N</math>, <math>K</math></li> <li>• <math>N</math>, <math>K</math> gehen aus KS verloren</li> <li>• hoher Wasserverbrauch</li> <li>• dritte Reinigungsstufe für Rückgewinnung notwendig</li> </ul>

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Vorteile bei der Aufbereitung der trocken gesammelten Fäkalien überwiegen. Trotzdem müssen auch die einzelnen Vor- und Nachteile gewichtet werden. Das schon vorhandene Abwassersystem und der Anschluss von Wassertoiletten vieler Haushalte an dieses ist technisch ausgereift und gesellschaftlich akzeptiert. Trotz der aufgezählten Nachteile ist eine Umstellung auf ein System mit Trockentoiletten mit viel Aufwand verbunden. Die Möglichkeiten einer solchen Umsetzung werden in Kapitel 5.5 diskutiert.

## 5.4. Bewertung des Vorgehens

Die Ergebnisse der Berechnungen von Nährstoffverlusten, Energie- und Wasserbilanzen sind von vielen Faktoren abhängig, welche im Folgenden diskutiert werden sollen.

### 5.4.1. Einfluss der Systemmodellierung auf die Ergebnisse

#### KSK und Urinaufbereitung

Generell wurde die Modellierung mit der Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, um eine Verteilung der Ergebnisse zu erhalten. Die Berechnungen sind mit 1.000 Zufallswerten durchgeführt worden. Zwar liefert diese Anzahl an Werten bereits ein recht genaues Ergebnis, allerdings werden die Ergebnisse genauer, je mehr Werte verwendet werden. Die Verwendung von nur 1.000 Werten kann also für kleine Ungenauigkeiten der Ergebnisse sorgen.

Bei allen Inputs wurde eine Standardabweichung von 30 % angenommen, bei den TC 50 %. Aufgrund des Praxisbezugs der Systeme bzw. durch die fehlende Validierung einiger Daten könnte hier die Wahl von noch höheren Standardabweichungen ratsam sein. Dies hätte den Einfluss, dass auch die Ergebnisse breiter gefächert wären.

Die Daten für die ideale Zusammensetzung eines Kompostes entspringen keiner wissenschaftlichen Quelle, sondern wurden nach Praxiswerten der Pilotanlage angenommen. Der Fäzesanteil am Kompost wird im Kompostierungsprozess auf der Pilotanlage nach wie vor variiert und die Ergebnisse des Kompostes untersucht, weswegen nicht sicher von einem Anteil von ca. 25 % ausgegangen werden kann. Bei aktuelleren Versuchen wurde der Fäzesanteil reduziert, was sich auch auf die Ergebnisse auswirken würde. Je nachdem, wie die Verteilung der Anteile variiert wird, verändern sich auch die Nährstoffmengen im fertigen Kompost. Wird der Anteil an Fäzes reduziert, so erhöht sich zwar die Menge an absolut produziertem Kompost, da pro FE mehr Kompost produziert wird, allerdings werden auch mehr Zuschlagstoffe benötigt und der Anteil an zurückgewonnenen Nährstoffen der Fäzes pro FE Kompost verringert sich.

Bei der Siebung wurden keine Nährstoffverluste angenommen. Werden bei der Siebung Teile der Zuschlagstoffe aus dem Kompost gesiebt, die nicht richtig zerkleinert wurden, findet möglicherweise auch ein Nährstoffverlust während der Siebung statt.

Bei der Urinaufbereitung waren keine Daten der Nährstoffverluste von Aktivkohlefiltration und Verflüchtigung vorhanden. Die Verluste wurden durch den Vergleich vom Urin und dem fertigen Dünger von „Vuna GmbH“ berechnet. Durch die fehlenden Angaben fehlt eine Validierung der Berechnungen.

#### P-Rückgewinnung aus KSA

Bei der Systemmodellierung der *P*-Rückgewinnung wurde das „Ash Dec“-Verfahren angenommen, welches an die Monoverbrennung des KS gebunden ist. Andere Rückgewinnungsmethoden, bei denen *P* aus dem Abwasserstrom oder dem KS direkt zurückgewonnen wird (vgl.

Kapitel 2.8.2), würden Nährstoffmengen sowie Energieverbräuche des Systemes beeinflussen. Da von keiner Anlage, in der das „Ash Dec“-Verfahren angewendet wird, Daten zur Rückgewinnung von  $P$  im Vergleich zum Abwasserstrom vorliegen, wurden für die Bilanz vom Abwasserstrom zur Monoverbrennung Daten von Egle et al., 2016 verwendet und diese mit Angaben über die Rückgewinnungsrate des „Ash Dec“-Verfahrens kombiniert. Durch dieses Zusammentragen verschiedener Daten können die Verluste in der Realität anders ausfallen.

Zudem wurde die Rückgewinnung von  $N$  und  $K$  wegen des niedrigen technischen Fortschritts in der Systemmodellierung nicht betrachtet. Würden vorhandene Verfahren zur  $N$ - oder  $K$ -Rückgewinnung weiterentwickelt und mit der  $P$ -Rückgewinnung kombiniert werden, so könnten aus der KSA alle untersuchten Nährstoffe zurückgewonnen werden.

#### 5.4.2. Einfluss der Systemgrenzen auf die Ergebnisse

Im Rahmen der Arbeit wurden Systemgrenzen festgelegt, welche die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen. Es wurden alle Prozesse abgeschnitten, die vor der Düngemittelherstellung und nach dem fertig produzierten Düngemittel liegen. So wurde der Transport der trocken gesammelten Fäkalien zu der Aufbereitungsanlage nicht mit betrachtet; bei der  $P$ -Rückgewinnung aus KSA wurde die Aufbereitung des Abwassers sowie die Schlammbehandlung und -verbrennung ebenfalls abgeschnitten. Dadurch werden große Anteile der Energieverbräuche nicht mit betrachtet. Zudem wurde der Bau sowie die Instandhaltung der Infrastruktur abgeschnitten, was auch Einfluss auf die Energie- und Wasserbilanzen nimmt. Würden die Systemgrenzen weiter gewählt werden, würden vor allem die Ergebnisse der Energiebilanzen vermutlich anders ausfallen.

Zudem wurden die Systeme nur auf die Wiedergewinnung der ausgewählten Performance Indikatoren -  $N$ ,  $P$  und  $K$  - untersucht. In Fäkalien sind neben diesen Makronährstoffen noch viele andere Nährstoffe, die Pflanzen zum Wachstum benötigen (vgl. Kapitel 2.4). Diese befinden sich somit auch im Recyclingdünger aus trocken gesammelten Fäkalien, können nach aktuellem Stand der Technik allerdings nicht aus Abwasser wiedergewonnen werden. Würden noch andere Recycling Performance Indikatoren untersucht werden, würde dies die Ergebnisse vermutlich zu Gunsten des Düngers aus trocken gesammelten Fäkalien verändern.

#### 5.4.3. Einfluss der Wahl der funktionellen Einheit

Ein großer Faktor spielt die Wahl der FE, also die Mengen an anfallenden Fäkalien. Als durchschnittlich anfallende Menge an Fäzes wurde von 134 g pro Tag ausgegangen. Dieser Wert wurde aus drei Literaturangaben berechnet, welche sich aus europäische Kost beziehen. Die Menge an Fäzes ist direkt abhängig von der Ernährung so steigt die Menge an Fäzes beispielsweise bei ballaststoffreicher (z. B. veganer/vegetarischer) Ernährung an (vgl. Kapitel 2.4). Bei sich verändernden Ernährungsgewohnheiten würde sich auch die Menge an Fäzes verändern, und daher auch die FE. Auch die Menge an Urin ist abhängig von Trink- und Lebensgewohnheiten, weswegen sie in anderen Gebieten oder auch in Zukunft von der gewählten abweichen kann.

#### 5.4.4. Einfluss von Literaturwerten auf die Nährstoffzusammensetzung

Die Nährstoffanteile der Fäkalien und Zuschlagstoffe bei der Kompostierung sind Faktoren, die die Ergebnisse bedeutend verändern können. Die Daten der Nährstoffanteile der Fäkalien und Zuschlagstoffe wurden verschiedenen Literaturquellen entnommen. Bei einigen wurden bereits während der Literaturrecherche große Abweichungen der Nährstoffanteile festgestellt, was auf unterschiedliche Bedingungen bei der Probennahme oder auf äußerliche Bedingungen zurückzuführen sein kann. Bei der Fäzes und dem Urin waren die Bereiche an Nährstoffmengen in unterschiedlicher Literatur teilweise sehr groß (vgl. Kapitel 2.4). Die Standardabweichungen der Ergebnisse könnten daher noch höher ausfallen als die berechneten.

Beim Zuschlagstoff „Urban Garden Waste“ sind die Nährstoffanteile zum einen davon abhängig, aus welchen Materialien dieser zusammengesetzt ist, da es keine Norm für die Zusammensetzung gibt. Zum anderen verändern sich die Nährstoffanteile auch jahreszeitenabhängig, da unterschiedliche Materialien in den Jahreszeiten anfallen. Während im Herbst viel Laub anfällt, kann im Frühjahr viel Grünschnitt verwendet werden. Für die Auswahl der Nährstoffanteile wurden im Rahmen der Recherche verschiedene Quellen verglichen und eine verwendet, deren Werte sich im Mittel befanden. Gerade der Anteil an  $K$  im Urban Garden Waste war laut anderen Quellen wesentlich höher. Bei einem Anteil von fast 30 % am Kompost können also variierende Nährstoffanteile (wie z. B. ein höherer Kaliumanteil) die Ergebnisse verändern. Auch bei den anderen Zuschlagsstoffen können variierende Nährstoffzusammensetzungen die Ergebnisse beeinflussen.

#### 5.4.5. Betrachtung der Berechnung von Wasser- und Energiebilanzen

Bei der Berechnung der Energieverbräuche der KSK und Urinaufbereitung wurden jeweils Angaben der Firmen verwendet. Bei der KSK wurden die Energieangaben der einzelnen Verarbeitungsschritte auf die FE runtergerechnet, weshalb die benötigte Energie sehr gering ausfällt. Dabei ist anzumerken, dass die Maschinen - wie der Hygienisierungscontainer oder die Siebmaschine - weitaus größere Mengen verarbeiten. Würde nur die Menge der FE auf der Pilotanlage verwertet werden, wären die Energieverbräuche dementsprechend deutlich höher. Die Energieverbräuche sind daher nur theoretisch möglich, da die Pilotanlage in der Praxis für ein Hundertfaches der FE ausgelegt ist. Zudem wurden bei einigen Schritten, wie das Ausfahren der Mieten oder die Dauer des Mietenwendens, die benötigten Zeiten pro FE geschätzt. In Realität könnte die Dauer daher abweichen und den Energieverbrauch beeinflussen.

Bei der Urinaufbereitung wurden Angaben der Firma „Vuna GmbH“ verwendet. Die benötigte Energie ist besonders im Vergleich zur KSK sehr hoch, was allerdings auch an den großen Mengen an aufzubereitendem Urin liegen kann. Bei der Urinaufbereitung wurde das Wasser, welches bei der Destillation gewonnen werden kann, als Gutschrift angenommen. Wie das gewonnene Wasser weiterverwendet wird, wurde nicht betrachtet. Daher wäre es auch eine Möglichkeit, die Gutschrift für den Vergleich zur Düngemittelherstellung aus KSA nicht in Betracht zu ziehen.

Bei der *P*-Rückgewinnung aus KSA wurde für den Vergleich mit den trocken gesammelten Fäkalien beim Energieverbrauch des „Ash Dec“-Verfahrens angenommen, dass dies mit der Monoverbrennung kombiniert wird und daher deutlich weniger Energie verbraucht. Ob eine solche Kombination in jeder Monoverbrennungsanlage durchführbar ist, wurde dabei außer acht gelassen. Wäre es nicht möglich, das „Ash Dec“-Verfahren mit heißer Asche aus der Monoverbrennung durchzuführen, würde der Energieverbrauch des Verfahrens deutlich steigen (siehe Abbildung 4.2.2). Für *N* und *K* wurde die synthetische Herstellung betrachtet. Gerade bei der Herstellung von *N*-Düngern mit dem Haber-Bosch-Verfahren gibt es verschieden energieintensive Vorgehen. Werden andere Vorgehen zur Synthese verwendet, kann der Energieverbrauch daher von den Ergebnissen abweichen. Zudem wird die Herstellung synthetischer Düngemittel mit fortschreitender Technik auch weniger energieintensiv, weshalb der Energieverbrauch langfristig sinken würden.

Bei der Berechnung des Wasserverbrauches der Düngemittelherstellung aus KSA wurde die synthetische Herstellung von *N* und *K* nicht mit betrachtet. Zudem werden geringe Mengen an Prozesswasser im „Ash Dec“-Verfahren benötigt, die ebenfalls nicht mit betrachtet wurden. Würden diese mit bilanziert werden, fiel der Wasserverbrauch des Systemes höher aus. Außerdem ist zu diskutieren, ob das verwendete Wasser für die Toilettenspülung bei Düngemittelherstellung zu betrachten ist, da die Systemgrenzen bei der Behandlung zu Düngemitteln festgelegt wurden. Das Wasser wird zudem in den KA wieder aufbereitet. Für die Frage, wie sinnvoll die Sammlung der Fäkalien in Wasser ist, wurde der Wasserbedarf der Toilette dennoch bilanziert.

## 5.5. Umsetzbarkeit eines flächendeckenden Einsatzes von Trockentoiletten und der Fäkalienaufbereitung zu Dünger

### 5.5.1. Ökologische Bewertung

Im Rahmen der Untersuchung der Aufbereitung trocken gesammelter Fäkalien ist deutlich geworden, dass das System gegenüber der klassischen Wassertoilette mit Nährstoffrückgewinnung über den KS viele Vorteile besitzt. So kann aus der Fäzes zusammen mit Zuschlagstoffen ein Kompostdünger entstehen, der als organischer Dünger verkauft werden könnte. Nach Laboruntersuchungen ist dieser sicher und hygienisch unbedenklich, sodass keine Schadstoffe in den Boden und damit zurück in den Nährstoffkreislauf gelangen. Aus Urin kann ein ebenfalls hygienisch unbedenklicher Flüssigdünger hergestellt werden, der die Pflanzen hauptsächlich mit *N* versorgen kann. Würden in Brandenburg alle Fäkalien trocken gesammelt und nach dem untersuchten System aufbereitet werden, könnten knapp 5.000 *Mg N*, 1.800 *Mg P* und 5.600 *Mg K* (vgl. Tabelle 4.2) zurückgewonnen und als Dünger verwendet werden. Werden diese Zahlen mit den Mengen an Handelsdünger verglichen, die in Brandenburg jährlich abgesetzt werden (76.734,9 *Mg N*, 7.848,4 *Mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>* und 13.723,7 *Mg K<sub>2</sub>O*, entspricht 3.425 *Mg P* bzw. 11.393,4 *Mg K* - siehe Kapitel 2.3, kann festgestellt werden, dass nicht unbedeutende Teile der Handelsdünger durch die Recyclingdünger ersetzt werden könnten. Beim *N* könnten ca. 6,6 % der abgesetzten Handelsdünger ersetzt werden, beim *P* sogar 53,3 %. Beim *K* könn-

ten fast 50 % ersetzt werden. Gerade bei  $P$  und  $K$  wäre die Aufbereitung der Fäkalien daher ökologisch relevant, weil deutlich weniger fossile Lagerstätten der Nährstoffe abgebaut werden müssten.

Die Nutzung von Trockentoiletten sowie die Aufbereitung der Fäkalien sind recht einfach umzusetzen. Die Pilotanlage in Eberswalde zeigt, dass die Kompostierung mit wenig Energie auskommt. Die Urinaufbereitung ist zwar energieintensiver, aber durch die kleinere Nährstoffbelastung im Abwasser durch die getrennte Sammlung der Fäkalien könnte die Aufbereitung des Abwassers weniger energieintensiv werden. Mit heutigem Stand der Technik ist die synthetische Herstellung der Düngemittel weniger energieintensiv als die Rückgewinnung der gleichen Nährstoffmengen durch Urinaufbereitung (vgl. Abbildung 5.3). Hier ist allerdings nicht zu vergessen, dass bei der synthetischen Herstellung endliche Ressourcen verbraucht werden und Emissionen entstehen, währenddessen die Nährstoffe eliminiert werden, die sich in den Fäkalien befinden. In Anbetracht dessen, dass Treibhausgase die Klimaerwärmung vorantreiben und Nährstoffreserven fortschreitend knapper werden, sollte dies bei der Bewertung eine große Rolle spielen.

### 5.5.2. Gesetzliche Möglichkeiten

Ob ein Dünger aus trocken gesammelten Fäkalien in Deutschland auf den Markt gebracht werden könnte, ist abhängig von der gesetzlichen Lage. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben fallen Fäkalien unter das Abwasserrecht und sind in keiner Verordnung bzw. keinem Gesetz über Düngemittel erwähnt. Die im KrWG definierten Hierarchien der Abfallbehandlung legen fest, dass die Beseitigung von Abfällen an unterster Stelle steht, an zweitletzter Stelle die sonstige Verwertung. Würden Fäkalien unter das KrWG fallen, wie es z. B. auch KS tut, müsste die Hierarchie auch bei Fäkalien angewendet werden. Nach jetzigem Stand werden diese im Abwasser hauptsächlich energetisch oder sonstig verwendet oder beseitigt. Eine  $P$ -Rückgewinnung aus KSA könnte als Recycling der Fäkalien gelten. Bei der trockenen Sammlung und Aufbereitung könnten Fäkalien vollständig recycelt werden, und damit die Abfallhierarchie besser erfüllt werden. Zudem heißt es in der Europäischen Düngemittelverordnung, dass Recyclingdünger einfacheren Marktzugang erhalten sollten, um die Kreislaufwirtschaft zu fördern (vgl. Kapitel 2.5). Ein Dünger aus recycelten Fäkalien müsste nach diese Bestimmung ebenfalls Marktzugang erhalten, wenn er als Düngemittel zugelassen werden würde. In der DüMV sind in Tabelle 7 Anlage 2 alle Stoffe gelistet, die als Düngemittel auf den Markt gebracht werden können. Fäkalien könnten hier integriert und so als Düngemittel zugelassen werden. Außerdem müssten auch in der Europäischen Düngemittelverordnung, dem DüngG und der DüV Fäkalien als zugelassene Dünger eingepflegt werden, solange die in den Gesetzen und Verordnungen definierten Grenzwerte an Schadstoffen erfüllt sind.

Nach der DüMV muss ein organischer  $NPK$ -Dünger mindestens 1 %  $N$ , 0,3 %  $P_2O_5$  oder 0,5 %  $K_2O$  enthalten (vgl. Kapitel 2.5). Werden die Oxidformen in die Elementarformen umgerechnet, sind das 0,13 %  $P$  und 0,42 %  $K$ . Der Kompost, der aus dem untersuchten System als Output entsteht, beinhaltet 0,8 %  $N$ , 0,5 %  $P$  und 1,4 %  $K$  und könnte damit nach der DüMV

als organischer NPK-Dünger zugelassen werden. Der Urindünger liegt mit 4,2% *N*, 1,8% *P* und 0,4% *K* auch deutlich über diesen Mindestgehalten und könnte auch als Stickstoffdünger auf den Markt gebracht werden.

Nach der Europäischen Düngemittelverordnung würden die Mindestgehalte an Nährstoffen (2,5% *N*, 2%  $P_2O_5$  oder 2%  $K_2O$ , entspricht 0,87% *P* und 1,66% *K*) vom Kompostdünger nicht erfüllt werden. Der Urindünger hält die Mindestgehalte der Europäischen Düngemittelverordnung für flüssige organische Düngemittel (2% *N*, 1%  $P_2O_5$  oder 2%  $K_2O$ , bzw. 0,44% *P* und 1,66% *K*) allerdings ein.

Als Vorreiter und Positivbeispiel ist der Urindünger „Aurin“ in der Schweiz zu betrachten, bei dem die Zulassung auf nationaler und teilweise internationaler Ebene erfolgreich war. Eine solche Zulassung für einen Urindünger oder Kompost aus Fäzes könnte auch in Deutschland erfolgreich sein. Mit der DIN SPEC 91421:2020, mit welcher die Qualitätssicherung von Kompost aus Fäkalien standardisiert werden könnte, ist der erste Schritt einer Zulassung bereits getan. Die Änderungen der genannten Regulationen müssen allerdings auf politischem Wege herbeigeführt werden, bevor es lohnenswert wird, die Aufbereitung der Fäkalien großtechnisch umzusetzen. Die technischen, ökonomischen sowie hygienischen Voraussetzungen sind, wie in dieser Arbeit erörtert, bereits vorhanden.

### 5.5.3. Infrastrukturelle Möglichkeiten

Falls die gesetzlichen Voraussetzungen vorhanden wären, ist bei einer möglichen flächendeckenden Umsetzung zu diskutieren, ob und wie dies infrastrukturell möglich ist. Wie bereits in Kapitel 5.3 dargestellt, ist der hohe Anschluss an die Kanalisation in Barnim, aber auch in ganz Deutschland, ein Faktor, der gegen die flächendeckende Umrüstung auf Trockentoiletten spricht. Langfristig gesehen würde die Umrüstung vermutlich, trotz der höheren Energieverbräuche, Energie und Kosten sparen, da die Nährstoffbelastungen im Abwasser sinken. Zudem würde durch den kleineren Bedarf an mineralischen Düngemitteln die Umwelt deutlich geschont werden. Könnten 50% des *P*- und *K*-Bedarfs, sowie 6% des *N*-Bedarfs der Handelsdünger eingespart werden, könnte zum einen mit den Nährstoffressourcen sorgsamer umgegangen werden, zum anderen könnte dies auch eine Möglichkeit sein, mit einer steigenden Bevölkerungszahl und damit erhöhten Bedarf an Dünger für Nahrungsmittel besser zurecht zu kommen.

Zeitgleich werden allerdings auch die technischen Möglichkeiten besser, aus Abwasser oder KS die Nährstoffe zurückzugewinnen und als Dünger zu verwenden. Hier könnte vorhandene Infrastruktur weiterverwendet und ausgebaut werden, indem Rückgewinnungsmethoden in den KA integriert werden. Auch legislativ scheint diese Option mehr gefördert zu werden, weshalb sich die Umsetzung einer flächendeckenden Umrüstung auf Trockentoiletten schwierig gestalten wird.

Eine realistischere Option könnte die Umrüstung auf Trockentoiletten von Haushalten sein, die nicht an eine zentrale KA bzw. die Kanalisation angeschlossen sind. In Barnim sind das knapp 10 % (vgl. Kapitel 2.1), vor allem sind die knapp 9 % relevant, die das Abwasser über Sammelgruben entsorgen. Die Abholung des Abwassers aus Sammelgruben und der Transport zu kommunalen KA benötigt im gleichem Maße Logistik und Infrastruktur wie die Abholung von trocken gesammelten Fäkalien benötigen würde. Das anfallende Abwasser aus dem restlichen Haushalt wäre weniger belastet und auch mengenmäßig weniger, sodass die Gruben seltener geleert werden müssten. Auch bei den 1 % der Bevölkerung Barnims, deren Abwasser über dezentrale KA gereinigt wird, könnte eine Umrüstung auf Trockentoiletten relevant sein. Wie in Kapitel 5.3 diskutiert, fehlt bei Kleinkläranlagen oft die weitergehende Reinigungsstufe. Eine trockene Sammlung von Fäkalien wäre hier umwelttechnisch besonders sinnvoll.

Eine weitere Möglichkeit wäre nur die getrennte Erfassung des Urins. Durch einen „PeePot“ könnte auch in Wassertoiletten der Urin vom Abwasserstrom getrennt werden und entweder direkt an der Toilette gesammelt werden oder durch eigene Leitungen abtransportiert werden. Die Nährstoffe im Urin machen vor allem bei  $N$  und  $K$  große Teile der zurückgewonnenen Nährstoffe im untersuchten System aus. Besonders im Vergleich zu den zurückgewonnenen Nährstoffen aus der Fäzes im Kompost (vgl. 5.2) wird die Relevanz der Urinaufbereitung deutlich. Die Urinseparation ist deutlich einfacher in das aktuell vorhandene System zu integrieren, weshalb dies ein Weg wäre, bei dem große Teile der Nährstoffe zurückgewonnen werden könnten und trotzdem keine große Umgestaltung der Infrastruktur und Logistik notwendig wäre. Dass dieses System umsetzbar und erfolgreich ist, zeigen verschiedene Projekte von „Vuna GmbH“, die die Urinseparation in einigen Städten bereits umsetzten. So wird in dem Stadtteil „Saint-Vincent de Paul“ in Paris der Urin vom Abwasserstrom abgetrennt und im Quartier direkt dezentral zum Urindünger „Aurin“ aufbereitet. [Vuna GmbH, 2022b]

Die Betrachtung der infrastrukturellen Möglichkeiten weist darauf hin, dass die flächendeckende Umrüstung auf Trockentoiletten möglich und ökologisch langfristig lohnenswert wäre. Die Umsetzung ist dennoch unrealistisch, da bereits vorhandene Infrastruktur ersetzt werden müsste, was hinsichtlich der absehbaren Trends zur Nährstoffrückgewinnung aus KS unwahrscheinlich ist. Alternative Systeme, die eine Mischung aus dem generell angewandten System und der trockenen Sammlung bieten (wie die Urinseparation und -aufbereitung), sind realistischer und wären ebenfalls ertragreich.

#### 5.5.4. Ausblick auf zukünftige Forschung

Um die Bewertung und Umsetzung der untersuchten Systeme zu konkretisieren, sind noch weitere Betrachtungen nötig. Da eine Aufstellung von Kosten während der Düngemittelherstellung im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurde, lässt sich mit den Ergebnissen keine Einschätzung dazu geben, welches System ökonomisch sinnvoller wäre. Die ökonomische Untersuchung und Gegenüberstellung beider Systeme könnte auch zur Einschätzung darüber helfen, wie umsetzbar das System der trockenen Sammlung von Fäkalien ist. Ebenso könnte eine Analyse zur infrastrukturellen und logistischen Situation dabei helfen, indem Möglichkeiten der

Abholung sowie mögliche Orte für Verwertungsanlagen untersucht werden. Um den Einfluss der Fäkalien auf das Abwasser besser einschätzen zu können müsste untersucht werden, wie sich Energie- und Wasserbilanz sowie die Kosten der Abwasseraufbereitung verändern würden, wenn die Fäkalien trocken gesammelt werden würden. Daraus könnte abgeleitet werden, in welchen Fällen die getrennte Erfassung von Fäkalien ökonomisch sinnvoll wären.

Auch der direkte Vergleich der Pflanzenverfügbarkeit wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Für die direkte Gegenüberstellung von Dünger aus trocken gesammelten Fäkalien sowie *P*-Dünger aus KSA sollten beide unter gleichen Bedingungen in Feldversuchen getestet werden.

In dieser Arbeit wurden die Systeme der trockenen Sammlung und Aufbereitung von Fäkalien sowie die Rückgewinnung aus KSA untersucht. Für eine umfassende Einschätzung wäre es sinnvoll, eine Ökobilanz der Systeme zu erstellen, in welcher die Systemgrenzen weiter gefasst und mehr Aspekte bilanziert werden. Würden die beiden Systeme auch auf ökonomische Faktoren untersucht werden und alle Prozesse und Faktoren von den gesammelten Fäkalien bis zum fertigen Dünger Teil der Bilanz sein, könnte die Forschungsfrage noch konkreter untersucht werden.

## 6. Fazit

In vorliegender Arbeit wurden die Recycling Performances von Nährstoffen in sanitären Kreisläufen untersucht. Die berechneten Rückgewinnungsraten in den untersuchten Systemen zeigen, dass durch die Rückgewinnung der Nährstoffe in Fäkalien Teile der synthetischen Dünger, die in Brandenburg verwendet werden, ersetzt werden könnten. Dabei hat sich das System der trockenen Sammlung und Aufbereitung von Fäkalien als besonders effizient herausgestellt. Bei dieser können große Teile der Nährstoffe zu Dünger recycelt werden, der hygienisch unbedenklich ist. Zwar werden für die Kompostierung von Fäzes weitere Zuschlagstoffe benötigt, diese tragen allerdings auch weitere Nährstoffe in den Dünger ein. Besonders Urin kann mit wenig logistischem Aufwand zu einem stickstoffreichen Flüssigdünger aufbereitet werden. Bei diesem Prozess kann nebenbei noch Wasser mit Trinkwasserqualität gewonnen werden. Zeitgleich können durch die trockene Sammlung große Mengen an Wasser eingespart werden sowie die Nährstoffbelastung in Gewässern durch Abwasser vermieden werden.

Auch die  $P$ -Rückgewinnung aus KSA mit dem „Ash Dec“-Verfahren ist bei den Recyclingraten sehr effizient. Ein großer Vorteil ist hier das schon etablierte Abwasser- und Aufbereitungssystem, in das die Rückgewinnungsmethoden integriert werden könnten. Nach jetzigem Stand der Technik sind allerdings die Rückgewinnung von  $N$  und  $K$  noch nicht wirtschaftlich, sodass durch das System weiterhin große Mengen an Nährstoffen nicht zurückgewonnen werden können. Das bedeutet, dass weiterhin  $N$  und  $K$  synthetisch hergestellt werden müssten, um die Menge an benötigtem Dünger zu erreichen.

Obwohl die Kompostierung von Fäzes sehr wenig Energie benötigt, muss für das gesamte System der Nährstoffrückgewinnung mehr Energie aufgewendet werden, als für die  $P$ -Rückgewinnung aus KSA und synthetische Herstellung von  $N$  und  $K$ . Da in diesem Vergleich allerdings nicht die benötigte Energie zur Aufbereitung des Abwassers mit einbezogen ist, könnte die trockene Sammlung insgesamt betrachtet trotzdem Energie einsparen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die trockene Sammlung und Aufbereitung von Fäkalien ein Konzept ist, welches die Problematiken der Wasserknappheit und der benötigten Düngemittel zum Teil lösen kann. Die Nährstoffe, welche nach aktuellem System eher einer linearen Wirtschaft entsprechen, könnten mit der Benutzung von Trockentoiletten und der Aufbereitung der Fäkalien zurück zu einer Kreislaufwirtschaft führen. Für die Umsetzung des Konzeptes ist allerdings nach jetzigem Stand vor allem noch eine rechtliche Grundlage nötig. Bevor Fäkalien nicht in das Düngerecht mit aufgenommen werden, können Düngemittel aus ihnen trotz ihrer Effizienz nicht vermarktet werden. Bei der Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser bzw. KS ist hier eine weitaus besserer Grundlage gegeben, da diese gesetzlich gefördert werden soll.

Neben den rechtlichen Hürden sind außerdem die infrastrukturellen Herausforderungen zu nennen, denen ein flächendeckendes System von trockener Fäkaliensammlung und -aufberei-

tung gegenübersteht. Durch das vorhandene Abwassersystem ist eine flächendeckende Umrüstung unrealistisch und mit viel Aufwand verbunden. Um die Vorzüge des Systemes dennoch zeitnah nutzen zu können, sind Konzepte möglich, die aus einer Kombination von Wassertoiletten und getrennter bzw. trockener Sammlung bestehen. Trockentoiletten könnten überall da eingesetzt werden, wo kein Anschluss an das Kanalisationssystem besteht. So könnten neben abgelegenen Orten auch öffentliche Toiletten die Fäkalien trocken sammeln und kompostieren, außerdem könnten Großveranstaltungen mit Trockentoiletten ausgestattet werden. Zudem könnte in Wassertoiletten eine Urinseparation eingebaut werden, wodurch die Fäzes zwar noch im Abwassersystem behandelt werden würde, der Urin aber dezentral zu Recyclingdünger verarbeitet werden könnte. Neben der einfachen Umsetzung ist hier auch die rechtliche Zulassung realistischer, da Dünger aus Urin schon in einigen europäischen Ländern zugelassen wurde.

Abschließend kann daher gesagt werden, dass in dem System der trockenen Sammlung und Aufbereitung von Fäkalien viel Potential steckt, die Umsetzung allerdings aufgrund von rechtlichen Hürden und der Umgestaltung der Infrastruktur in naher Zukunft unrealistisch ist. Für eine besserer Einschätzung sollten außerdem noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die die Systeme ganzheitlicher und konkreter untersuchen.

## Anmerkung

Beim erneuten Überprüfen der Berechnungen am Ende der Bearbeitungszeit ist mir aufgefallen, dass bei der Monte-Carlo-Simulation der Fäzesaufbereitung ein Fehler begangen wurde, der Einfluss auf die Ergebnisse hat. Bei den Nährstoffverlustberechnungen in der Kompostierung wurde von einem TC beim Massenverlust von 0,75 ausgegangen, hingegen wurde von einem Stickstoffverlust von 30 %, also einem TC von 0,3 ausgegangen. Wie richtig in Formel 3.13 angegeben, müsste die Menge an  $N$  im Inputstrom  $F07$  mit dem Verlust von 30 % verrechnet werden:

$$\begin{aligned} N_{Verlust} &= N_{Inputs} \cdot 0,3 \\ &= F07 \cdot x_{N,F07} \cdot 0,3 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Anstatt die beiden Systeme getrennt zu berechnen (also Massenverlust und Nährstoffverlust), wie in obiger Formel angegeben, wurde der Stickstoffverlust fälschlicherweise mit dem Massenverlust verrechnet:

$$\begin{aligned} N_{Verlust} &= N_{F08} = Massenverlust \cdot N_{Inputs} \cdot 0,3 \\ &= F08 \cdot x_{N,F07} \cdot 0,3 \end{aligned} \quad (6.2)$$

Es wurde also der Verlust von  $N$  nur auf den Teil bezogen, der von der Masse verloren geht. Wird die Formel richtig gestellt, verändern sich die Ergebnisse der  $N$ -Mengen im fertigen Kompost. Statt 0,98  $kg N$  pro FE, können nur 0,74  $kg N$  pro FE zurückgewonnen werden. Diese Veränderung zieht sich durch die Ergebnisse und den Vergleich beider Methoden. Neben den abweichenden zurückgewonnenen Mengen an  $N$  pro FE verändern sich auch die zurückzugewinnenden Mengen in Barnim und Brandenburg. Außerdem verändert sich der Energiebedarf der synthetischen Düngemittelherstellung, da weniger  $N$  hergestellt werden muss, um ein gleiches Nährstoffverhältnis wie bei der Düngemittelherstellung aus trocken gesammelten Fäkalien zu erhalten.

Aufgrund dessen, dass der Fehler erst entdeckt wurde, nachdem große Teile der Arbeit fertig waren und vor allem die Auswertung der Ergebnisse schon vorgenommen wurde, wurde sich in Absprache mit den betreuenden Personen dazu entschieden, den Fehler nicht auszubessern. Daher sei hier angemerkt, dass sich die Auswertung und der Vergleich der Systeme hinsichtlich der  $N$ -Mengen verändern würde. Tabelle A.6 im Anhang zeigt die  $N$ -Mengen und -anteile in der KSK, wenn der Fehler behoben wird. Die korrigierten Werte für die  $N$ -Rückgewinnung auf Barnim und Brandenburg bezogen ist in Tabelle A.8 dargestellt. Die Änderungen des Energieverbrauch der synthetischen  $N$ -Herstellung stellt Tabelle A.7 dar.

Zusätzlich wurde der Fehler in den Rohdaten in Microsoft Excel behoben. Diese sind der Abschlussarbeit beigelegt, sodass weitere Berechnungen mit der Simulation ohne Fehler durchgeführt werden können.

# Literaturverzeichnis

- [AbfKlärV, 2017] AbfKlärV: *Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost*. Version 2017. 2017.
- [BAFU, 2009] BAFU: *Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwassereinigung. Eine Bestandsaufnahme*. Bern, 2009. 198 S.
- [Bauhaus-Universität Weimar, 2009] Bauhaus-Universität Weimar: "Neuartige Sanitärsysteme. Begriffe, Stoffströme, Behandlung von Schwarz-, Braun-, Gelb-, Grau- und Regenwasser, Stoffliche Nutzung". Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt. Weimar, 2009. 302 S. [www.uni-weimar.de/Bauing/wbbau].
- [Bauverlag BV GmbH, 2013] Bauverlag BV GmbH: *THIS - Tiefbau Hochbau Ingenieurbau Strassenbau - Ausgabe 06/2013*. 2013. [https://www.this-magazin.de/ausgaben/tis\_2013-06\_1780940.html] (besucht am 18. 11. 2022).
- [Berger et al., 2008] Berger, Wolfgang, Claudia Lorenz-Ladener und Werner Philipp: *Komposttoiletten. Sanitärtechnik ohne Wasser*. deutsch. Unter Mitarb. von Werner Bidlingmaier et al. 1. Stufen bei Freiburg: Ökobuch, 2008. ISBN: 978-3-936896-16-9.
- [Berliner Wasserbetriebe, 2022a] Berliner Wasserbetriebe: *Wasserkreislauf*. 2022. [https://www.bwb.de/de/wasserkreislauf.php] (besucht am 29. 11. 2022).
- [Berliner Wasserbetriebe, 2022b] Berliner Wasserbetriebe: *Wasserwissen*. 2022. [https://www.bwb.de/de/wasserwissen.php] (besucht am 17. 06. 2022).
- [Boldrin et al., 2010] Boldrin, Alessio, Ina Körner Thomas H. Christensen und Uta Krogmann: *Composting: Mass Balances and Product Quality*. 2010, S. 569–582. 14 S. DOI: 10.1002/9780470666883.ch36.
- [Bundesamt für Gesundheit, 2022] Bundesamt für Gesundheit: *Produktregister Chemikalien. Aurin*. 2022. [https://www.gate.bag.admin.ch/rpc/ui/products/636998-04/summary?searchTerm=aurin&sortBy=cpid&sortDirection=asc&lch=1621496269150&searchArea=CPID,PRIMARYNAME,CLASSIFICATION\_NUMBER] (besucht am 12. 12. 2022).
- [Bundesumweltministerium, 2022] Bundesumweltministerium: *Kurzinfo Abwasser - Kläranlage*. Copyright: Internetseite des Bundesumweltministeriums - BMUV. 2022. [https://www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/binnengewasser/abwasser/klaeranlage-kurzinfo] (besucht am 29. 06. 2022).
- [Deutscher Bundestag, 2018] Deutscher Bundestag: *Energieverbrauch bei der Produktion von mineralischem Stickstoffdünger*. WD 8 - 3000 - 088/18. 2018. 12 S.
- [DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg.: *DIN EN ISO 14040*. 2021.
- [DüMV, 2012] DüMV: *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln*. Version 02.10.2019. 12. Mai 2012.
- [DüngG, 2022] DüngG: *Düngegesetz*. DüngG. Version 2021. 4. Dez. 2022. [https://www.gesetze-im-internet.de/d\_ngg/index.html#BJNR005400009BJNE000202124] (besucht am 04. 12. 2022).
- [DüV, 2022] DüV: *Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis*

- beim Düngen. Version 2021. 4. Dez. 2022. [[https://www.gesetze-im-internet.de/d\\_v\\_2017/BJNR130510017.html](https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/BJNR130510017.html)] (besucht am 04. 12. 2022).
- [Egle et al., 2016] Egle, L., Krampe J. Rechberger H. und M. Zessner: *Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies*. eng. Bd. 571. Journal Article. 2016, S. 522–542. 21 S. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.019. eprint: 27453138.
- [Etter et al., 2015] Etter, B., K.M. Udert und T. Gounden: *Valorisation of Urine Nutrients - VUNA Final Report. Promoting Sanitation & Nutrient Recovery through Urine Separation*. Dübendorf, Switzerland, 2015. 40 S. [[https://www.researchgate.net/publication/282849102\\_VUNA\\_Valorisation\\_of\\_Urine\\_Nutrients\\_-\\_Final\\_Project\\_Report](https://www.researchgate.net/publication/282849102_VUNA_Valorisation_of_Urine_Nutrients_-_Final_Project_Report)].
- [Finizio GmbH, 2021a] Finizio GmbH: *Einzigartige Pilotanlage zur Verwertung von Inhalten aus Trockentoiletten*. Hrsg. von Florian Augustin. 2021. [<https://finizio.de/pilotanlage>] (besucht am 31. 07. 2022).
- [Finizio GmbH, 2021b] Finizio GmbH: *Produktberatung. Finde deine Trockentoilette*. Hrsg. von Florian Augustin. 2021. [<https://finizio.de/produktberatung/>] (besucht am 19. 12. 2022).
- [Geigy Scientific Tables, 1982] Geigy Scientific Tables: *Volume 1: Unit of Measurement, Body Fluids, Composition of the Body, Nutrition*. Basel, Schweiz, 1982.
- [Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, 2021] Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH: *Forschungsbericht des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) zum Vorhaben BioFAVOR II - Entwicklung und Evaluierung einer mobilen Demonstrationsanlage für die dezentrale Verwertung menschlicher Fäkalien*. 2021. 68 S. [<https://www.ufz.de/index.php?de=44331>].
- [Herzel et al., 2018] Herzel, H., S. Kugler T. Schaafand und A. Christian: "Herstellung neuer Düngemittelausgangsstoffe durch thermochemische Behandlung von Klärschlammmaschen". In: *Verwertung von Klärschlamm*. 2018, S. 495–511. ISBN: 978-3-944310-43-5.
- [Industrieverband Agrar e.V., 2019] Industrieverband Agrar e.V.: *Kalium - Baustein für eine nachhaltige Ertragsbildung*. Frankfurt am Main, 2019. 44 S.
- [Klein, 2015] Klein, Daniel: *Bewertung der Stickstoff- und Phosphorrückgewinnung im Gesamtsystem aus Abwasserreinigung und Landwirtschaft*. de. Unter Mitarb. von Universitätsbibliothek Braunschweig. Institut für Siedlungswasserwirtschaft, 2015. 226 S. DOI: 10.24355/DBBS.084-202103230746-0.
- [KrWG, 2012] KrWG: *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen*. KrWG. Version 10.08.2021. 2012.
- [LANUV, 2022] LANUV: *Mineralische Dünger*. Copyright: IT.NRW. 2022. [<https://www.lanuv.nrw.de/verbraucherschutz/marktueberwachung/duengemittel/mineralische-duenger>] (besucht am 01. 12. 2022).
- [LUMITOS AG, 2022] LUMITOS AG: *Kraftstoff*. chemie.de. 2022. [<https://www.chemie.de/lexikon/Kraftstoff.html>] (besucht am 18. 11. 2022).
- [MLUK, 2021] MLUK: "Kommunale Abwasserbeseitigung im Land Brandenburg - Lagebericht 2021". In: (2021).

- [MLUK, 2022a] MLUK: *Düngemittel*. Agrarbericht MLUK. 2022. [<https://agrarbericht.brandenburg.de/abo/de/start/ressourcensicherung/duengemittel/#>] (besucht am 12. 12. 2022).
- [MLUK, 2022b] MLUK: *Seen in Brandenburg und ihre Wasserstandsproblematik*. 2022. [<https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/umwelt/wasser/wassermengenbewirtschaftung/wasserstaende-brandenburger-seen/>] (besucht am 29. 11. 2022).
- [Nahrstedt, 2015] Nahrstedt, Harald: *Die Monte-Carlo-Methode. Beispiele unter Excel VBA*. ger. essentials. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. 45 S. ISBN: 3658101482.
- [Naturschutzbund Deutschland e.V., 2022] Naturschutzbund Deutschland e.V.: *Die Phosphor-Krise*. 2022. [<https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/landnutzung/landwirtschaft/umweltschutz/23828.html>] (besucht am 01. 12. 2022).
- [Naudascher, 2001] Naudascher, Imke: *Kompostierung menschlicher Ausscheidungen durch Verwendung biologischer Trockentoiletten. Mit besonderer Berücksichtigung des Kleingartenbereichs*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2000. ger. Bd. 100. Schriftenreihe des ISWW Karlsruhe. Karlsruhe: Institut für Siedlungswasserwirtschaft Universität Karlsruhe (TH), 2001. 222 S. ISBN: 3-9807000-3-8.
- [Ökodorf Sieben Linden, 2022] Ökodorf Sieben Linden, *Kompost-Toiletten - Ökodorf Sieben Linden*. 2022. [<https://siebenlinden.org/de/oekodorf/oekologie/kompost-toiletten/>] (besucht am 19. 12. 2022).
- [Reinhardt, 2014] Reinhardt, Tobias: "Interkommunales Pilotprojekt zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen in Baden-Württemberg". Universität Stuttgart, 2014. 77 S.
- [SNV, 1995] SNV: *Vad innehåller avlopp från hushåll? (Was enthält häusliches Abwasser?) - Bericht 4425 des schwedischen Umweltamtes*. 1995.
- [Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, 2022] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: *Darmbakterien*. 2022. [<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/darmbakterien/2862>] (besucht am 01. 12. 2022).
- [Statistisches Bundesamt, 2022] Statistisches Bundesamt: *Bevölkerung nach Nationalität und Bundesländern*. 2022. [<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/bevoelkerung-nichtdeutsch-laender.html>] (besucht am 12. 12. 2022).
- [Stentiford et al., 2010] Stentiford, Edward und Marco de Bertoldi: "Composting: Process". In: *Solid Waste Technology & Management*. Hrsg. von Thomas H. Christensen. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010, S. 513–532. ISBN: 9780470666883. DOI: 10.1002/9780470666883.ch34.
- [Sundermann et al., 2021] Sundermann, G., M. Reinhardt A. Krause C. Hirschhausen F. Nadler F. Häfner I.. Henze J. Hildebrandt R. Götzenberger T. Otto und U. Hildebrandt: *Die Zukunft is(s)t nachhaltig, regional und zirkulär*. 2021. 14 S.
- [Thews et al., 1999] Thews, G, E Mutschler und P Vaupel: *Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart, 1999.
- [Udert et al., 2015] Udert, K. M. und M. Wächter: "Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation". In: Bd. 46. 2015, S. 453–464. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.020.

- [Umweltbundesamt, 2018] Umweltbundesamt: *Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. 2018. 104 S.
- [Umweltbundesamt, 2022] Umweltbundesamt: *Düngemittel*. 2022. [<https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/duengemittel#rechtliche-regelungen>] (besucht am 01. 12. 2022).
- [UrbiStat S.r.l, 2022] UrbiStat S.r.l: *Demographische Statistiken Provinz von BARNIM, LANDKREIS, Bevölkerungsdichte, Bevölkerung, Durchschnittsalter, Familien, Ausländer*. 2022. [<https://ugeo.urbistat.com/AdminStat/de/de/demografia/dati-sintesi/barnim%2c-landkreis/12060/3>] (besucht am 18. 05. 2022).
- [Verordnung (EU), 2019] Verordnung (EU), 2019/1009: *Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003*. 6. Mai 2019.
- [Vuna GmbH, 2022a] Vuna GmbH: *Aurin Recycling-Dünger*. 2022. [<https://vuna.ch/aurin/>] (besucht am 23. 08. 2022).
- [Vuna GmbH, 2022b] Vuna GmbH: "Referenzen. Projektbeispiele". In: (2022). [<https://vuna.ch/home/portfolio/>].
- [Welzl, 1985] Welzl, E.: *Biochemie der Ernährung*. Jena, Stuttgart: G. Fischer Verlag, 1985.
- [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022a] zirkulierBAR - REGION.innovativ: *FAQ*. 2022. [<https://zirkulierbar.de/presse/faq/>] (besucht am 21. 12. 2022).
- [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022b] zirkulierBAR - REGION.innovativ: *Stoffstrom-Fließbild der geplante Forschungsanlage zur Herstellung von qualitätsgesicherten Recyclingdüngern [t/Jahr]*. 2022.
- [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022c] zirkulierBAR - REGION.innovativ: *Technische Voraussetzungen*. 2022. [<https://zirkulierbar.de/das-projekt/technische-voraussetzungen/>] (besucht am 21. 12. 2022).
- [zirkulierBAR - REGION.innovativ, 2022d] zirkulierBAR - REGION.innovativ: *ZirkulierBAR - REGION.innovativ*. 2022. [<https://zirkulierbar.de/>] (besucht am 25. 10. 2022).
- [Zweckverband für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung Eberswalde, 2022] Zweckverband für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung Eberswalde: *Trinkwasser - Übersichtskarte*. [<https://www.zwa-eberswalde.de/der-zwa/trinkwasserversorgung/trinkwasser-ansichtskarte%5C>] (besucht am 21. 12. 2022).

# A. Anhang

## A.1. KSK und Urinaufbereitung

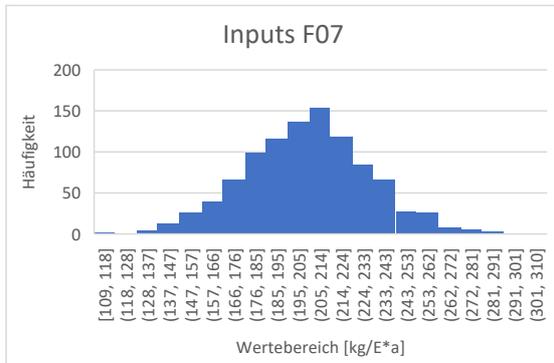


Abbildung A.1.: Verteilung der Inputmengen

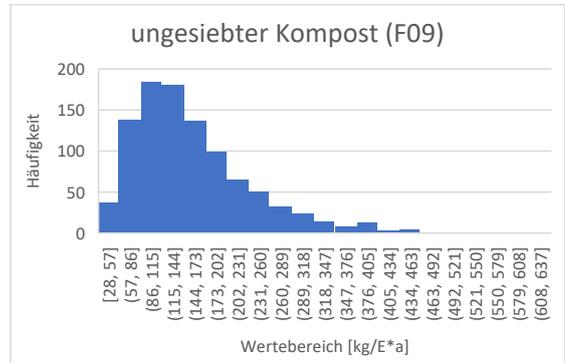


Abbildung A.2.: Verteilung der Mengen des ungesiebten Kompostes

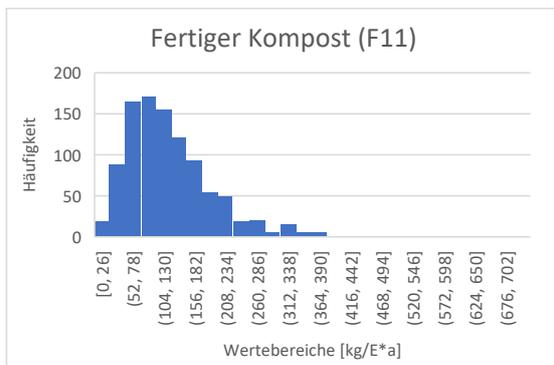


Abbildung A.3.: Verteilung des fertigen Kompostes

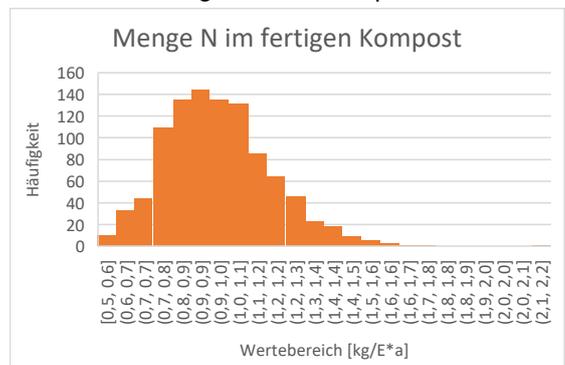


Abbildung A.4.: Verteilung der N-Mengen im Kompost

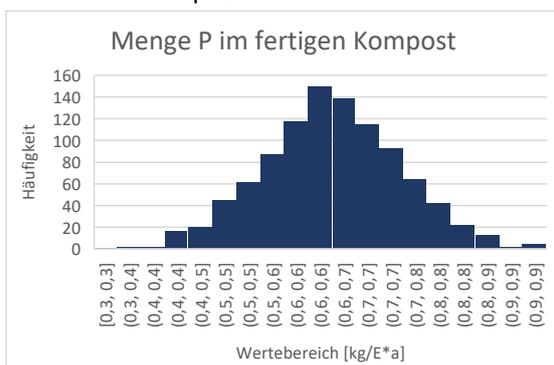


Abbildung A.5.: Verteilung der P-Mengen im Kompost

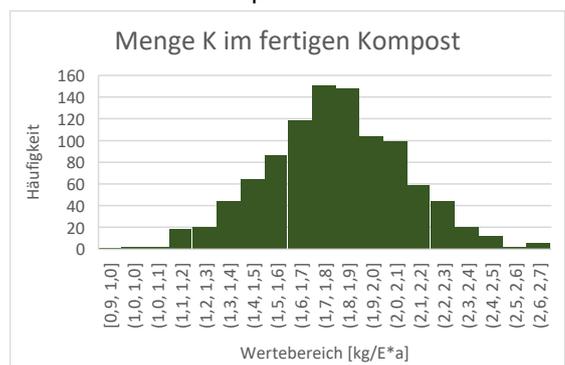


Abbildung A.6.: Verteilung der K-Mengen im Kompost

Tabelle A.1.: Entwicklung der Prozessströme in der KSK (leichte Abweichungen durch die Monte-Carlo-Simulation)

	Fäzes F01	Input F07	Kompost unge- siebt F09	Kompost ge- siebt F11
Menge [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	48,91	203,48	153,35	132,29
Standardabweichung [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	14,67	27,74	84,72	83,89
N [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,56	1,22	1,13	0,98
Standardabweichung [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,17	0,17	0,21	0,20
Stickstoffanteil [%]	1,15	0,60	0,73	0,74
P [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,38	0,72	0,72	0,62
Standardabweichung [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,11	0,10	0,10	0,09
Phosphoranteil [%]	0,78	0,35	0,47	0,47
K [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,24	2,07	2,07	1,81
Standardabweichung [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,07	0,28	0,28	0,27
Kaliumanteil [%]	0,49	1,02	1,35	1,37

Tabelle A.2.: Entwicklung der Prozessströme in der Urinaufbereitung

	Input F20	Output F22
Menge [ $\frac{l}{E \cdot a}$ ]	489,1	23,99
Standardabweichung [ $\frac{l}{E \cdot a}$ ]	146,73	12,24
N [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	3,91	1,02
Standardabweichung [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	1,17	0,31
Anteil an der Gesamtmenge [%]	0,8	4,2
P [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,3723	0,1
Standardabweichung [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,11	0,03
Anteil an der Gesamtmenge [%]	0,08	0,4
K [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,9	0,44
Standardabweichung [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,27	0,13
Anteil an der Gesamtmenge [%]	0,18	1,82

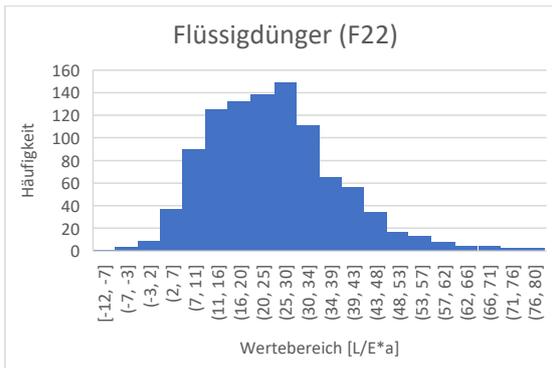


Abbildung A.7.: Verteilung der Urindünger-mengen

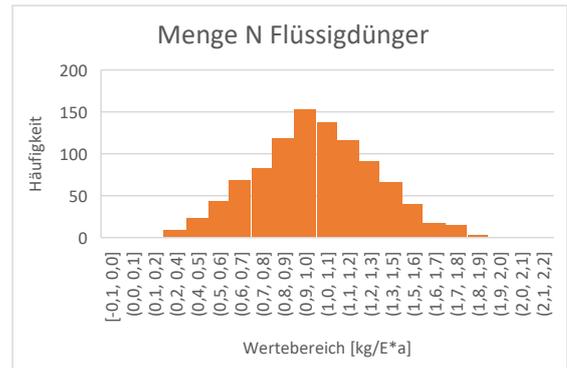


Abbildung A.8.: Verteilung der N-Mengen im Urindünger

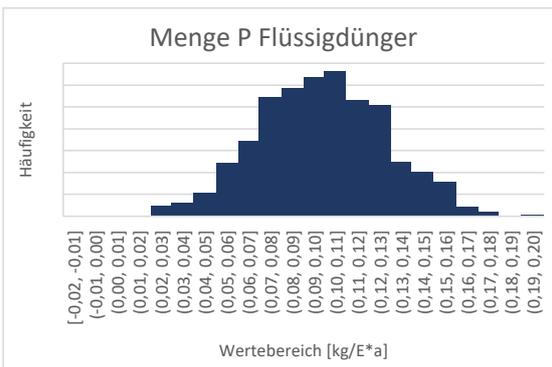


Abbildung A.9.: Verteilung der P-Mengen im Urindünger

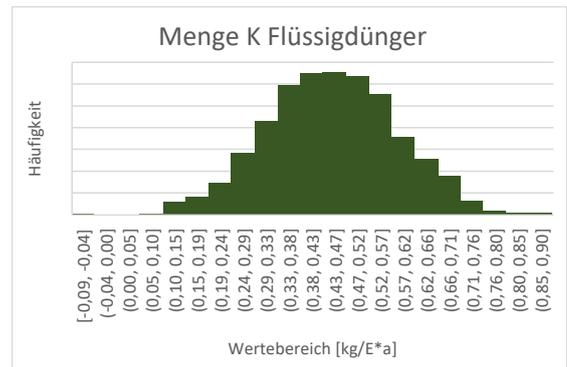


Abbildung A.10.: Verteilung der K-Mengen im Urindünger

Tabelle A.3.: Aufgeschlüsselter Energieverbrauch der KSK und Urinaufbereitung

Prozessschritt	Energieverbrauch (MW) [kWh]	Standardabweichung [kWh]
Hygienisierung	0,03	0,008
Kompostierung	0,52	0,06
Siebung	0,13	0,07
weitere Arbeitsschritte	0,32	0,05
<b>Fäzesaufbereitung insgesamt</b>	<b>0,99</b>	<b>0,19</b>
Nitrifikation	24,46	7,34
Destillation	39,13	11,74
<b>Urinaufbereitung insgesamt</b>	<b>63,6</b>	<b>19,1</b>
<b>insgesamt</b>	<b>64,6</b>	<b>19,3</b>

## A.2. Düngemittelherstellung aus KSA

Tabelle A.4.: P-Mengen in den Prozessströmen der Düngemittelherstellung

	Input	KS	KSA	Ca-P-Dünger
MW [ $\frac{kgP}{E \cdot a}$ ]	0,76	0,69	0,66	0,65
Standardabweichung [ $\frac{kgP}{E \cdot a}$ ]	0,23	0,21	0,22	0,22

Tabelle A.5.: Aufgeschlüsselter Energieverbrauch des „Ash Dec“-Verfahrens sowie der synthetischen N- und K-Herstellung

Nährstoff	MW [ $\frac{kWh}{E \cdot a}$ ]	Standardabweichung [ $\frac{kWh}{E \cdot a}$ ]
N	11,9	5
P	2,27	0,75
K	1,57	0,52
Insgesamt	15,74	6,2

## A.3. Veränderte Ergebnisse durch Behebung des Rechenfehlers

Tabelle A.6.: Prozessströme in der KSK mit behobenem Fehler

	Fäzes F01	Input F07	Kompost unge- siebt F09	Kompost ge- siebt F11
N [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,56	1,22	0,85	0,74
Standardabweichung [ $\frac{kg}{E \cdot a}$ ]	0,17	0,17	0,12	0,11
Stickstoffanteil [%]	1,15	0,60	0,58	0,59

Tabelle A.7.: Energieverbrauch der synthetischen N-Herstellung mit behobenem Fehler

Nährstoff	MW [ $\frac{kWh}{E \cdot a}$ ]	Standardabweichung [ $\frac{kWh}{E \cdot a}$ ]
N	10,61	4,48
Insgesamt	14,35	5,76

Tabelle A.8.: Zurückgewonnene N-Nährstoffmengen der Fäkalienbehandlung mit behobenem Fehler

	MW	N [ $\frac{Mg}{a}$ ] Standardabweichung.
<b>Barnim (187.343 E)</b>	329,79	80,88
<b>Brandenburg (2.537.868 E)</b>	4.468	1.096