

**Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung  
Technische Universität Kaiserslautern**



# **Entwicklung und Erprobung eines autarken Ressourcenrückgewinnungs- und Abwasserentsorgungssystems für den ländlichen Raum**

**Kurztitel: Projekt Reinighof**

Abschlussbericht des Projekts AZ 34165/01,  
gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



**Technische Universität Kaiserslautern**

**FG Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung**

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

Jingsi Xiao, M.Sc.



**Dr. Bruch & Partner - Geowissenschaftler & Ingenieure**

Dr. Ingo Bruch

Ulrike Alewell



**Europäische Pioniersiedlung e.V. (Reinighof)**

Thomas Kölsch



**OtterWasser GmbH**

Dipl. Ing. Andrea. Albold



Kaiserslautern, im Mai 2021



**Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung  
Technische Universität Kaiserslautern**



# **Entwicklung und Erprobung eines autarken Ressourcenrückgewinnungs- und Abwasserentsorgungssystems für den ländlichen Raum**

**Kurztitel: Projekt Reinighof**

Abschlussbericht des Projekts AZ 34165/01,  
gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



**Technische Universität Kaiserslautern**

**FG Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung**

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

Jingsi Xiao, M.Sc.



**Dr. Bruch & Partner - Geowissenschaftler & Ingenieure**

Dr. Ingo Bruch

Ulrike Alewell

**Dr. Bruch & Partner**

Geowissenschaftler & Ingenieure

**Europäische Pioniersiedlung e.V. (Reinighof)**

Thomas Kölsch



**OtterWasser GmbH**

Dipl. Ing. Andrea. Albold



Kaiserslautern, im Mai 2021



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



|   |  |                   |                 |   |                  |
|---|--|-------------------|-----------------|---|------------------|
| <b>Az</b>   | <b>34165/01-23</b>   | <b>Referat</b>    | <b>23</b>       | <b>Fördersumme</b>  | <b>124.961 €</b> |
| <b>Antragstitel</b>   | <b>Entwicklung und Erprobung eines autarken Ressourcenrückgewinnungs- und Abwasserentsorgungssystems für den ländlichen Raum</b>                                 |                   |                 |   |                  |
| <b>Stichworte</b>   | Abwasser, Ressource, Stoffkreislauf, Verfahren   |                   |                 |   |                  |
| Laufzeit  | Projektbeginn  | Projektende       | Projektphase(n) |   |                  |
| <b>33 Monate</b>  | <b>21.03.2018</b>  | <b>31.12.2020</b> | <b>1</b>        |   |                  |
| <b>Bewilligungsempfänger</b>  | TU Kaiserslautern<br>Fachgebiet Ressourceneffiziente<br>Abwasserbehandlung<br>Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz<br>Paul-Ehrlich-Straße 14<br>67663 Kaiserslautern |                   |                 | Tel   | 0631/205-2944    |
|   |  |                   |                 | Fax   | 0631/205-3905    |
|   |  |                   |                 | Projektleitung<br>Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz                              |                  |
|   |  |                   |                 | Bearbeiter<br>Jingsi Xiao M.Sc.<br>Jan Zahoransky M.Sc.<br>Sica Liesegang M.Sc. |                  |
| <b>Kooperationspartner</b>  | Europäische Pioniersiedlung e.V., Bruchweiler-Bärenbach<br>Dr. Bruch & Partner - Geowissenschaftler & Ingenieure, Schmalfelderhof<br>OtterWasser GmbH, Lübeck    |                   |                 |   |                  |
| <b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>   |  |                   |                 |   |                  |
| <p>Von der zentralen Infrastruktur abgeschnittene Siedlungen stehen vor besonderen Herausforderungen bei der Entsorgung Ihrer Abwässer. Gleichzeitig enthalten häusliche Abwässer wichtige Ressourcen wie Stickstoff und Phosphor, die als Dünger aufbereitet und im Gartenbau genutzt werden können. Ziel des Projektes war es, ein autarkes Abwasserentsorgungs- und Ressourcenrückgewinnungssystem zu entwickeln und umzusetzen, bei dem durch den Einsatz von Trockentrenntoiletten auf einem Aussiedlerhof nicht nur die örtlichen Trinkwasserressourcen geschont, sondern auch die Abwasserteilströme gezielt aufbereitet und die enthaltenen Phosphorressourcen rückgewonnen werden können.</p>  |  |                   |                 |   |                  |
| <b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>   |  |                   |                 |   |                  |
| <p>Angepasst an die besondere Situation auf dem Reinighof (eigene Trinkwasserquelle und Stromversorgung, fehlendes Gewässer zur Einleitung behandelten Abwassers) wurde zunächst das Konzept eines autarken und ressourcenorientierten Abwasserentsorgungssystems entwickelt und darauf aufbauend die einzelnen Verfahrensschritte geplant und umgesetzt. Die Stoffströme Fäzes, Urin und Grauwasser werden getrennt gesammelt und unterschiedlich aufbereitet. Fäzes werden über eine Kompostierung in isolierten Schnellkompostern mit anschließender offener Nachkompostierung zu Kompost umgesetzt. Aus Urin wird nach Zwischenspeicherung der Großteil des Phosphors und Anteile des Stickstoffs mittels Zugabe von Magnesiumoxid als pflanzenverfügbares Düngemittel Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) gefällt. Der verbleibende stickstoffhaltige Urinüberstand wird in einem vertikalen mit zeolithhaltigem Lavasand gefüllten Spezialbodenfilter (SBF) nitrifiziert und anschließend einer Pflanzenkläranlage zur Grauwasseraufbereitung mit nachgeschaltetem Verdunstungsteich zugeführt. Mittels regelmäßiger Beprobungen und Analyse der unterschiedlichen Stoffströme wurden die Prozesse überwacht und verbessert. Im Rahmen von zusätzlichen Laborversuchen wurden geeignete Betriebsparameter ermittelt und das Prozessverständnis verbessert. Aus den in den beiden Maßstäben gewonnenen Prozessdaten wurden Optimierungsstrategien entwickelt, im Betrieb der Anlage umgesetzt sowie Dimensionierungswerte abgeleitet. Über verschiedene Wege wurde Öffentlichkeitsarbeit bis hin zur Erstellung von zwei im Internet abrufbaren Filmen betrieben, um die Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Projekt weiter zu geben.</p> |  |                   |                 |   |                  |
| <small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a></small>   |  |                   |                 |   |                  |

## **Ergebnisse und Diskussion**

Aus den Untersuchungen zur Fäzeskompostierung konnten Betriebsstrategien abgeleitet werden, bei denen für die Hygienisierung erforderliche Temperaturen erreicht werden. Dafür werden die Schnellkomposter mit einem Mischungsverhältnis (Volumen) Fäzes: Sägespäne: Heu von ungefähr 1: 0,5: 0,5 befüllt und nach ca. 6 Wochen Betrieb in einem Nachkomposter für mindestens 1 Jahr gelagert.

Basierend auf intensiven Labor- und vor-Ort-Untersuchungen wurde für die Urinlagerung eine Aufenthaltszeit von mindestens 21 Tagen als erforderlich ermittelt, um den pH- Wert sicher auf einen für die anschließende MAP-Fällung notwendigen Wert von über 8 zu heben. Für einen Betrieb des Fällungsreaktors ohne regelmäßige Analyse der P-Konzentration im Urin wurde folgende Strategie entwickelt: a) Befüllen des MAP-Reaktors mit 160 L Urin b) 100 g MgO (Werthe-Metall, CAS-Nr.: 1309-48-4) in 1 L Wasser suspendieren und die Suspension zügig in den MAP-Reaktor geben c) Nach 1,5 h Rührzeit mit Rührerdrehzahl von 78 rpm und 16-24 h Sedimentationszeit ablassen des Überstandes und Sammlung des ausgefällten MAP in einem Filtersack mit anschließender Lufttrocknung. Mit diesen einfachen Arbeitsschritten können sicher über 90%, meist sogar über 99% des Phosphors aus dem Urin als MAP zurückgewonnen werden.

Die regelmäßige Untersuchung des Ablaufs des Spezialbodenfilters zur Behandlung des ammoniumhaltigen Überstandes zeigte, dass nach der MAP-Rückgewinnung die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen nach einer Einfahrphase mittels Nitrifikation von über 3000 mg/L auf einige 100 mg/L reduziert wurden. Damit wurde die Eignung von Bodenfiltern zur stabilen Nitrifikation hochbelasteter Stoffströme belegt und eine spezifische Fläche von 0,25 bis 0,5  $\text{m}^2/\text{E}$  zur Bemessung eines solchen Filters abgeleitet. Bei weiterer Mitbehandlung im Grauwasserbodenfilter lagen die Ablaufkonzentrationen unter 1 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Auch bezüglich CSB und Phosphor wies der Grauwasserbodenfilter selbst bei niedrigen Wintertemperaturen eine sehr hohe Reinigungsleistung auf. Darüber hinaus wurden Arzneimittelrückstände und die Keimbelastung in den verschiedenen Behandlungsschritten weitergehend reduziert.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Idee, das Konzept und die eingesetzten Technologien des innovativen Behandlungskonzeptes wurden Besuchern von Seminaren und Campingplatz am Reinighof mit Demonstration und Erläuterung des Sanitärsystems vorgestellt und durch Exkursionen und Dokumentationsfilme sowie in Lehrveranstaltungen und Fachveröffentlichungen verbreitet. Dadurch wird mittelfristig die Umsetzung solcher Systeme im ländlichen Raum für Einzelanwesen, Hütten etc. befördert werden.

## **Fazit**

Das vorliegende Projekt hat gezeigt, dass die Umsetzung eines autarken, ressourcenorientierten Abwasserentsorgungskonzeptes mit Gewinnung eines wertvollen Mineraldüngers im ländlichen Raum auch unter schwierigen Randbedingungen, wie fehlendem Vorfluter und nur begrenzter Verfügbarkeit von Strom, möglich ist. Entsprechend ihrer jeweiligen Belastung und ihres Ressourcenpotenzials können Fäzes zu Kompost umgesetzt und aus Urin in einem einfach zu betreibenden Reaktor der Dünger MAP (Struvit) erzeugt werden. Die Forschungsergebnisse verdeutlichen, dass der stark ammoniumbelastete Überstand aus dem Fällungsreaktor in einem mit zeolithhaltigem Lavasand befüllten Bodenfilter selbst bei niedrigen Temperaturen im Winter weitgehend nitrifiziert wird, so dass eine anschließende Behandlung gemeinsam mit dem Grauwasser in einem weiteren Bodenfilter zu sehr niedrigen Ablaufwerten bezüglich Ammonium, CSB und Phosphor führt. Das System ist einfach zu betreiben, allerdings können weitere Forschungen dazu beitragen, die noch erforderlichen Arbeitsschritte teilweise zu automatisieren und dadurch für die Nutzer zu vereinfachen. Eine Rückgewinnung des Stickstoffs könnte die Ressourceneffizienz noch verbessern.

Insgesamt ermöglicht dieses ressourcenorientierte abflusslose Abwassersystem eine effiziente Nährstoffrückgewinnung insbesondere von Phosphor, weist eine hervorragende Reinigungsleistung auf und ist ohne zentrales Abwasserentsorgungssystem als Back-up von Laien betreibbar.

# Inhaltverzeichnis

|  |      |
|--|------|
| <b>Projektkennblatt</b> .....  | I    |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....   | V    |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....   | VII  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....   | VIII |
| <b>Zusammenfassung</b> .....   | IX   |
| <b>1. Einleitung</b> .....   | 1    |
| 1.1 Ausgangssituation.....   | 1    |
| 1.2 Zielsetzung.....   | 3    |
| 1.3 Arbeitsprogramm.....   | 3    |
| <b>2. Konzeption, Planung und Auslegung der Verfahrensschritte und der Versuchsanlagen</b> ..... | 5    |
| 2.1 Gesamtkonzept und Bemessungsgrundlagen.....  | 5    |
| 2.2 Planung und Bau der Trockentrenntoiletten.....   | 6    |
| 2.3 Vorversuche zur Urinbehandlung zur Ermittlung von Bemessungswerten.....                      | 7    |
| 2.3.1 Vorversuche zur Urinlagerung.....  | 7    |
| 2.3.2 MAP-Fällungsversuche unter an den ländlichen Raum angepassten Randbedingungen.....         | 7    |
| 2.3.3 Versuche zur Ermittlung der Eignung von Filtermaterialien zur Präzipitat-Abtrennung.....   | 8    |
| 2.4 Planung und Bau des Lagertanks und des MAP-Reaktors zur Urinbehandlung.....                  | 9    |
| 2.4.1 Bemessung.....   | 9    |
| 2.4.2 Planung und Bau des Forschungshauses (Lagertank und MAP-Reaktor).....                      | 9    |
| 2.5 Planung und Bau des Spezialbodenfilters.....   | 11   |
| 2.5.1 Bemessung des Spezialbodenfilters.....   | 11   |
| 2.5.2 Aufbau des Spezialbodenfilters.....  | 11   |
| 2.6 Planung und Installation der Fäzesbehandlung.....  | 12   |
| 2.6.1 Bemessung.....   | 13   |
| 2.6.2 Installation der Fäzeskompostierung.....   | 13   |
| <b>3. Betrieb, Anpassung und Bewertung der Einzelverfahren</b> .....                             | 14   |
| 3.1 Betrieb der Trenntrockentoiletten zur Minimierung von Geruchsemissionen.....                 | 14   |
| 3.2 Betrieb des MAP-Reaktors.....  | 14   |
| 3.2.1 Übersicht.....   | 14   |
| 3.2.2 Einfahrphase: 16.11.2018 – 12.02.2019.....   | 15   |
| 3.2.3 Betriebsversuche und begleitende Laborversuche:.....                                       | 16   |
| 3.2.4 Begleitende Laborversuche.....   | 20   |
| 3.2.5 Schlussfolgerung und betriebliche Aspekte.....   | 23   |
| 3.3 Betrieb und Bewertung des Spezialbodenfilters.....   | 24   |
| 3.3.1 Betrieb des Spezialbodenfilters.....   | 24   |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3.2 Probenahme und Messwerte .....  | 24        |
| 3.3.3 Auswertung der Messdaten .....  | 24        |
| 3.3.4 Beaufschlagte Fracht .....  | 29        |
| 3.3.5 Schlussfolgerung und betriebliche Aspekte .....                             | 29        |
| 3.4 Betrieb und Bewertung der Fäzeskompostierung.....                             | 31        |
| 3.4.1 Betrieb der Fäzeskompostierung .....  | 31        |
| 3.4.2. Einfahrphase der Fäzeskompostierung .....                                  | 31        |
| 3.5.2 Betrieb der Kompostierung nach Anpassung der Befüllungsstrategie .....      | 32        |
| 3.4.3 Temperaturentwicklung in den Schnellkompostern .....                        | 34        |
| 3.4.4 Schlussfolgerung und betriebliche Aspekt .....                              | 36        |
| 3.5 Betrieb des Gesamtsystems .....   | 36        |
| 4. Bewertung des Gesamtbehandlungskonzeptes.....                                  | 37        |
| 4.1 Reinigungsleistung.....   | 37        |
| 4.1.1 Ablauf des Gesamtsystems.....   | 37        |
| 4.2 Qualität der Produkte.....  | 38        |
| 4.2.1 Ergebnisse der mikrobiologischen Analyse .....                              | 38        |
| 4.2.2 Ergebnisse von organischen Mikroverunreinigungen .....                      | 39        |
| 4.3 Kostenzusammenstellung .....  | 40        |
| 4.4 Bemessungsvorschläge für zukünftige Planungen .....                           | 40        |
| 4.5 Bewertung des Betriebs und Akzeptanz des Systems durch die BewohnerInnen..... | 41        |
| 4.4.1 Nutzung der Trockentrenntoiletten .....                                     | 41        |
| 4.4.2 Entleerung Fäzes und Kompostierung.....                                     | 41        |
| 4.4.3 Nutzung des Kompostes .....   | 42        |
| 4.4.4 Betrieb der MAP – Fällung.....  | 42        |
| 4.4.5 Anwendung MAP .....   | 42        |
| 4.4.6 Daten und Feedback zur Nutzung Seminarraum, Campingplatz, Bewohner .....    | 42        |
| 4.5 Modellcharakter .....   | 43        |
| 5. Öffentlichkeitsarbeit und Publikationen .....                                  | 44        |
| <b>6. Fazit .....</b>   | <b>46</b> |
| <b>Literaturangaben .....</b>   | <b>48</b> |
| <b>Anhang .....</b>   | <b>50</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Gesamtkonzept der Abwasserbehandlung am Reinighof mit den im Rahmen des Projektes umgesetzten Komponenten innerhalb des rot gestrichelten Rahmens.....  | 5  |
| Abbildung 2: Prinzipiendarstellung der eingesetzten Trockentrenntoilette (TTC Holz Modell von Holzapfel+Konsorten), entnommen von der Website holzapfel-konsorten [17].....  | 6  |
| Abbildung 3: Links 3a. pH-Verlauf während der Lagerung von Urin bei einmaliger Zugabe am Tag 0; Rechts 3b. pH-Wert von gemischtem Urin bei unterschiedlichem Volumenverhältnis von frischem/gelagertem Urin.....   | 7  |
| Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Vorversuche zur Eignung von Filtermaterialien zur Feststoffabtrennung .....  | 8  |
| Abbildung 5: Schnitt durch das Forschungshaus (links) und Bild des MAP-Reaktors (rechts) mit Füllstandsanzeige (Plexiglasrohr am Reaktor angebracht) und angeschlossener Filtersack in der Filtrationseinheit unterhalb des Reaktors.....  | 10 |
| Abbildung 6: Schnitt durch den Spezialbodenfilter.....   | 12 |
| Abbildung 7: Spezialbodenfilter mit Unterteilung der Filteroberfläche in 16 Quadrate .....   | 12 |
| Abbildung 8: Gehalte an Phosphat-Phosphor (im Labor gemessen) im Überstand und im Präzipitat nach der MAP Fällung sowie P-Fällungsgrad bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen während der Einfahrphase. In der Tabelle sind die jeweiligen Betriebseinstellungen angegeben (Bezug berechnete $\beta$ -Werte auf Basis der Laborwerte) ..... | 16 |
| Abbildung 9: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichen MgO-Zugabestrategien, von technischem MgO, Mg: P=2,0 und Rührerdrehzahl 78 rpm .....  | 18 |
| Abbildung 10: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichem molarem Verhältnis von Mg:P ( $\beta$ -Wert), mit schneller Zugabe vom technischem MgO in Suspension und einer Rührerdrehzahl von 78 rpm .....   | 18 |
| Abbildung 11: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichen Rührerdrehzahlen, mit schneller Zugabe vom technischem MgO in Suspension und Mg:P=1,3.....   | 19 |
| Abbildung 12: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichen MgO-Typen mittels schneller Zugabe der Suspension und einem Mg: P-Verhältnis von 2, sowie einer, Rührerdrehzahl von 78 rpm.....  | 19 |
| Abbildung 13: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichem molarem Verhältnis Mg:P ( $\beta$ -Wert), mit schneller Zugabe vom Amazon MgO in Suspension und einer Rührerdrehzahl von 78 rpm.....   | 20 |
| Abbildung 14: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlicher Mg-Quelle und Zugabestrategie (Rührerdrehzahl=120 rpm, $\beta$ =1,3) [26].....   | 21 |
| Abbildung 15: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichen $\beta$ -Werten (MgCl <sub>2</sub> -Lösung und technisches MgO Suspension, jeweils mit Rührerdrehzahl=120 rpm) [26]  | 22 |
| Abbildung 16: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlicher Rührerdrehzahl (technisches MgO in Suspension, $\beta$ =1,3) [26] .....  | 22 |
| Abbildung 17: pH-Wert im Ablauf des SBF und der Grauwasser-PKA .....   | 25 |
| Abbildung 18: Redoxpotential im SBFs .....   | 25 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 19: NH <sub>4</sub> -N-Konzentrationen im Zu- und Ablauf des SBF und der Grauwasser-PKA.....                                     | 26 |
| Abbildung 20: NO <sub>3</sub> -N-Konzentrationen im Ablauf des SBF bei der direkten und der späten<br>Probenahme .....                     | 27 |
| Abbildung 21: NH <sub>4</sub> -N- und NO <sub>3</sub> -N-Konzentrationen bei der Probenahme „spät nach Beschickung“ ...                    | 27 |
| Abbildung 22: N <sub>ges</sub> -Konzentrationen im Zulauf sowie im Ablauf des SBFs und der PKA.....  | 28 |
| Abbildung 23: P <sub>ges</sub> -Konzentrationen im Zulauf sowie im Ablauf des SBFs und der PKA .....                                       | 28 |
| Abbildung 24: N <sub>ges</sub> -Frachten pro Beschickung und berechnete Tagesfrachten .....  | 29 |
| Abbildung 25: Temperaturentwicklung in den Schnellkompostern von der ersten bis zur dritten<br>Befüllcharge während der Einfahrphase ..... | 32 |
| Abbildung 26: Schema der Befüllung und Umschichtung der Fäzeskompostierung. ....   | 33 |
| Abbildung 27: Temperaturentwicklung im Schnellkomposter 2 nach der Anpassung, z.B. 30.04.2019-<br>15.06.2019 .....                         | 35 |
| Abbildung 28: N-Konzentrationen im Urinüberstand und Ablauf des SBFs vom 12.09.2020 bis<br>19.11.2020 .....                                | 37 |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Feststoffrückhalt in dem ausgewählten Filtertuch und Faltenfilterpapier im Labor .....   | 9  |
| Tabelle 2: Bemessung von Lagertank und MAP-Reaktor .....  | 9  |
| Tabelle 3: Bemessung des Spezialbodenfilters – Rechnerische mittlere tägliche N-Fracht .....  | 11 |
| Tabelle 4: Bemessung der Fäzeskompostierung .....   | 13 |
| Tabelle 5: Probennahme während des untersuchten Betriebszeitraumes.....   | 15 |
| Tabelle 6: Zusammensetzung von Urin im Urintank während der Versuchsphase vom 16.11.2018 bis 21.01.2020 .....   | 15 |
| Tabelle 7: Betriebsbedingungen im MAP-Reaktor während der Fällungsversuche.....   | 17 |
| Tabelle 8: Randbedingungen der begleitenden Laborversuche [26] .....  | 21 |
| Tabelle 9: P-Konzentrationen im Urin und daraus abgeleitetes Mg:P-Verhältnis bei verschiedenen MgO-Dosierungen.....   | 23 |
| Tabelle 10: Übersicht über die Dauer von Temperaturen über 50°C und die Verweilzeit in den Schnellkompostern von 24 Chargen nach der Einfahrphase (Chargen 1 bis 3 hier nicht dargestellt)..... | 35 |
| Tabelle 11: PO <sub>4</sub> -P-Konzentrationen [mg/L] in Urin vor und nach der MAP-Fällung beim standardisierten Betrieb durch die BewohnerInnen des Reinighofs.....                            | 36 |
| Tabelle 12: N- und P-Konzentration im Ablauf der Grauwasser-PKA und im Verdunstungsteich .....  | 38 |
| Tabelle 13: Keimzahl der untersuchten Proben in KBE/mL (flüssige Probe) bzw. KBE/g Feuchtmasse  | 39 |
| Tabelle 14: Stromverbrauch des Gesamtsystems .....  | 40 |

## Abkürzungsverzeichnis

| <b>Begriff</b> | <b>Einheit</b>      | <b>Beschreibung</b>  |
|----------------|---------------------|--|
| AbwV           |                     | Abwasserverordnung   |
| AFS            | [mg/L]              | Abfiltrierbare Stoffe (über Membran mit 0,45 µm)   |
| β-Wert         | [-]                 | Molverhältnis Mg:P   |
| BET            | [m <sup>2</sup> /g] | Brunauer–Emmett–Teller, spezifische Oberfläche   |
| BioAbfV        |                     | Bioabfallverordnung  |
| DBU            |                     | Deutsche Bundesstiftung Umwelt   |
| KBE            |                     | Koloniebildende Einheit  |
| GW             |                     | Grauwasser   |
| EcoSanRes      |                     | Ecological Sanitation Research Programme   |
| LF             | [mS/cm]             | Leitfähigkeit  |
| MAP            |                     | Magnesium-ammonium-Phosphat, MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub> *6H <sub>2</sub> O, Struvit |
| MgO            |                     | Magnesiumoxid  |
| NASS           |                     | Ressourcenorientierte Sanitärsysteme   |
| Nges           | [mg/L]              | Gesamtstickstoff   |
| Pges           | [mg/L]              | Gesamtphosphor   |
| PKA            |                     | Pflanzenkläranlage   |
| SBF            |                     | Spezialbodenfilter   |
| tech.          |                     | Technisch  |
| TTT            |                     | Trockentrenntoiletten  |

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde ein autarkes, dezentrales Abwasserreinigungs- und Ressourcenrückgewinnungskonzept für den ländlichen Raum entwickelt, umgesetzt und erprobt. Ziel war es, mittels Trennung und gezielter Aufbereitung der auf Haushaltsebene anfallenden Abwasserteilströme, ein abflussloses System zu entwickeln, Trinkwasser einzusparen, Nährstoffe zurückzugewinnen, organischen Kohlenstoff zu nutzen und Technologien einzusetzen, die auch von Nicht-Fachleuten und bei begrenzter Verfügbarkeit von Strom sicher betrieben werden können.

Basierend auf den Bedingungen des Studienobjekts „Reinighof“ (Trinkwasserbezug aus einer eigenen Quelle, Eigenstromversorgung mittels Photovoltaikanlage, fehlender Anschluss an ein Abwasserentsorgungssystem und fehlendes Gewässer) wurde in einer ersten Phase das Behandlungskonzept geplant und anschließend die erforderlichen Sanitärinstallationen und Behandlungsanlagen dimensioniert und aufgebaut. Der Trinkwasserverbrauch wird durch den Einsatz von Trockentrenntoiletten reduziert. Basierend auf vor-Ort- und Laboruntersuchungen wurde der Betrieb der für die Fäzes-Behandlung entwickelten Kompostierungsanlage (geschlossenes Schnellkompostersystem mit anschließender Nachkompostierung) modifiziert: Befüllung der Schnellkomposter im Mischungsverhältnis (Volumen) Fäzes: Sägespäne: Heu von ungefähr 1: 0,5: 0,5. Damit konnte eine für die Keimreduzierung ausreichende Temperaturentwicklung erreicht und die Zahl an Fäkalkeimen um etwa 3 log-Stufen (99,9 %) auf ca.  $10^5$  KBE/g Feuchtmasse reduziert werden.

Zur Rückgewinnung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) aus Urin wurde ein einfach zu bedienendes System entwickelt und Betriebsstrategien (Einfluss des Magnesiumoxidtyps, der Zugabestrategie und -menge, der Rührgeschwindigkeit sowie der Reaktionszeit) basierend auf Laboruntersuchungen und vor-Ort-Messungen abgeleitet und daraus eine Standardanleitung erarbeitet. Aus Vorversuchen im Labor wurde die erforderliche Zeit für die Urinlagerung zur anschließenden MAP-Fällung mit mindestens 21 Tagen zur Bemessung des Urinspeichers festgelegt. Mit Hilfe der Standardanleitung kann der Reaktor einfach auch ohne erforderliche Analysen zum P-Gehalt im Urin betrieben werden, wobei stets über 90%, meist über 99% des Phosphors aus Urin als MAP zurückgewonnen wurde. Zur weiteren Behandlung des stickstoffhaltigen Urinüberstands wurde ein neuartiger Spezialbodenfilter (SBF) mit zeolithhaltigem Lavasand-Filtermaterial installiert und betrieben, wodurch die hohen Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Überstand nach der MAP-Fällung von über 3000 mg/L erheblich auf einige hundert mg/L reduziert wurden. Damit war eine Mitbehandlung des Ablaufs SBF im vorhandenen Grauwasserbodenfilter (PKA) mit anschließendem Verdunstungsteich möglich. Die Konzentrationen an Ammoniumstickstoff und Pges lagen im Ablauf der PKA stets unter 1 mg/L. Arzneimittelrückstände und Keimbelastung wurden in den Behandlungsstufen erheblich verringert. Im MAP waren organische Spurenschadstoffe nicht mehr nachweisbar.

Basierend auf den wissenschaftlichen Untersuchungen, ist es im Projekt gelungen, ein ressourceneffizientes dezentrales Abwasserreinigungssystem zu entwickeln und erfolgreich umzusetzen, ohne eine zentrale Infrastruktur als Back-up zu haben. Die Akzeptanz ist bei BewohnerInnen und BesucherInnen auf dem Reinighof hoch. Informationen zu diesem innovativen Behandlungskonzept wurden und werden durch vielfältige Veranstaltungen auf dem Reinighof, durch Filme, einen Projektflyer sowie in Lehrveranstaltungen und Fachveröffentlichungen verbreitet.

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt wurde in Zusammenarbeit mit den Partnern Europäische Pioniersiedlung e.V., Dr. Bruch & Partner, Otterwasser GmbH und der Technischen Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung, durchgeführt.

# 1. Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Starre zentrale Entwässerungssysteme, die Veränderung der Siedlungsstruktur, die Verknappung und der nicht nachhaltige Abbau von Rohstoffen und damit einhergehende steigende Rohstoffpreise erfordern angepasste, flexiblere Abwasserinfrastrukturen. Bereits in den 90er Jahren gab es erste Überlegungen zu ressourcenorientierten Sanitärsystemen (NASS), die Lösungen zu den genannten Problemen liefern können. Grundgedanke ist, dass mittels Stoffstromtrennung auf Haushaltsebene die Abwasserteilströme entsprechend ihrer Eigenschaften angepasst behandelt bzw. Wasser und Inhaltsstoffe wiederverwendet werden. Die Behandlung des nur gering mit Nährstoffen belasteten Grauwassers kann dabei mit geringerem Aufwand und einfacheren Technologien durchgeführt werden, als bei konventionellem Schmutzwasser. Andererseits liegen durch die getrennte Erfassung von Urin und Faeces oder Schwarzwasser die Nährstoffe in deutlich höherer Konzentration bei geringerem Volumenstrom vor, wodurch Möglichkeiten zum Recycling von Nährstoffen deutlich verbessert werden. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an Verfahren entwickelt, um Teilströme des häuslichen Abwassers getrennt zu erfassen und zu behandeln. Es mangelt jedoch weiterhin an langfristigen, praxisnahen Erfahrungswerten und der Schließung der gesamten Verfahrenskette, vor allem dann, wenn keine Abwasserinfrastrukturen als Backup für die Ableitung von Reststoffen oder Teilströmen vorhanden sind.

In einigen der im folgenden aufgeführten Pilotprojekte wurden zwar einzelne Verfahren erprobt, allerdings werden oft nur Teilaspekte der Behandlung betrachtet, oder es fallen weiterhin Volumenströme an, die zentral abgeleitet und auf zentralen Kläranlagen mitbehandelt werden.

Im Projekt SANIRESCH wurde im GIZ-Hauptgebäude das zu diesem Zeitpunkt größte ressourcenorientierte Sanitärsystem Deutschlands umgesetzt [1]. Das entwickelte Konzept sieht eine getrennte Erfassung und vollautomatisierte Behandlung von Grau-, Braun- und Gelbwasser vor, bei der die behandelten Teilströme jedoch letztlich in die Kanalisation eingeleitet wurden. Nach Projektende sind die Trenntoiletten im GIZ-Gebäude aufgrund fehlender Nutzerakzeptanz zurückgebaut worden.

STEINMETZ und PITTMANN haben in einem von der DBU geförderten Projekt auf dem Kirchentag 2015 in Stuttgart die Kompostierung von Faeces aus wasserlos betriebenen Trockentoiletten untersucht [2]. Die Faeces wurden mit Zuschlagstoffen gesammelt, wobei der Urin drainiert und in die Kanalisation geleitet wurde. Bei der Kompostierung der Faeces zeigte sich, dass durch die offene Miete und die geringe zu kompostierender Menge keine zufriedenstellende Hygienisierung erzielt werden konnte. Um dies zuverlässig zu erreichen, bedarf es, vor allem zur dezentralen Kompostierung von Faeces, anderer Methoden mit kleineren Oberflächen/Volumenverhältnis als offene Mieten dies aufweisen und längerer Kompostierdauern bzw. intensiveren Kompostierungsvorgängen.

Weitere Beispiele für dezentrale Abwasserkonzepte sind die Göppinger Hütte und der Emscherquellhof. Der separierte Urin wird dabei nicht auf dem Gelände behandelt. Dieser wird gesammelt und abtransportiert [3]. Für eine möglichst weitgehende Rückgewinnung der Ressourcen bei einer Stoffstromtrennung, wurde in mehreren Projekten die Phosphor-Rückgewinnung aus Urin untersucht. Im Projekt Lamberts-mühle wurde z.B. der Urin gesammelt, gelagert und nach Verdünnung mit Dünger direkt in der Landwirtschaft verwendet [4]. Problematisch bei einem solchen Ansatz sind insbesondere Arzneimittelrückstände, die vorrangig im Urin zu finden sind und somit in die Umwelt gelangen können. Eine andere Möglichkeit als die Verwendung gelagerten Urins mit dem Vorteil der Trennung der Nährstoffe von sonstigen Urininhaltstoffen ist die Rückgewinnung von Phosphor (und anteilig Stickstoff) als Struvit (Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)). Die MAP-Fällung ist ein bereits vielfach untersuchtes Verfahren (z.B. Stuttgarter Verfahren, Gifhorner Verfahren, AirPrex®,

REM-NUT®, PRISA). Diese Verfahren sind jedoch für eine zentrale Behandlung auf kommunalen Kläranlagen entwickelt worden und sind technisch aufwändig. Reaktoren für die Urinbehandlung in der ländlichen dezentralen Abwasserentsorgung erfordern jedoch einen kleineren Maßstab und sind aufgrund der dann anteilig hohen Investitionskosten nicht für einen automatischen Betrieb geeignet [5]. Daher muss eine Lösung gefunden werden, um einen stabilen, aber einfachen Prozess zu etablieren, der auch von Nicht-Fachleuten sicher und ohne großen Mess- und Steuerungsaufwand durchgeführt werden kann.

Mit einer MAP-Fällung aus Trübwasser oder Urin, kann Phosphor fast vollständig zurückgewonnen werden, es verbleibt jedoch immer noch ein großer Anteil an Stickstoff im Überstand, der weiter behandelt werden muss. Im Projekt SANIRESCH wurde eine dezentrale MAP-Fällung mit Urin als Edukt umgesetzt. Allerdings wurde der stickstoffreiche Überstand in die Kanalisation geleitet [1]. Im Projektbericht von VUNA wird darauf hingewiesen, dass eine Nachbehandlung des Überstands nach einer MAP-Fällung nötig ist, dies wurde aber nicht weiter untersucht [6]. ZANDEE et al. [7] haben im Projekt STUN einen einfachen Scheibentauchkörper entwickelt mit dem der stickstoffreiche Überstand durch den Anammox-Prozess zu elementarem Stickstoff umgewandelt werden kann. Problematisch dabei können im dezentralen Einsatz und bei Verwendung von Urin als Substrat zu geringen Temperaturen sein. Bei Temperaturen von 12 – 15 °C besteht die Gefahr einer Nitritakkumulation, so dass der Prozess instabil wird [8, 9]. Bei dezentralen Anlagen für wenige Bewohner, wo nur kleine Volumenströme behandelt werden, kann in kalten Regionen bzw. Jahreszeiten keine zuverlässige Reinigung erzielt werden. ANTONINI et al. [10, 11] untersuchten in Vietnam zwei verschiedene Verfahren zur dezentralen Nährstoffrückgewinnung aus Urin. Ein Ansatz zielte darauf ab, den Phosphor in einem ersten Schritt durch eine MAP-Fällung und den Stickstoff in einem zweiten Schritt durch Ammoniumstrippung und Absorption zurückzugewinnen [11]. Bei der Stripptung und Absorption wurde der stickstoffreiche Überstand aus der MAP-Fällung auf 40 °C erhitzt und der pH-Wert auf 10 angehoben. Der behandelte Urin wurde in eine Stripperkolonne geleitet, um das Ammonium in die Gasphase zu überführen. Die ammoniumreiche Gasphase wurde in einer Absorptionskolonne mit Schwefelsäure in Kontakt gebracht. Das Endprodukt Ammoniumsulfat kann als Flüssigdünger verwendet werden. Durch diesen Ansatz konnte zwar der Stickstoff weitgehend aus dem Überstand absorbiert werden, allerdings ist eine entsprechende Stromversorgung zur Rezirkulation in der Stripper- bzw. Absorptionskolonne notwendig. Ebenso müssen zusätzliche ätzende und wassergefährdende Chemikalien (NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) zur Verfügung stehen. Im zweiten Ansatz von ANTONINI et al. wurde die solare Evaporation als ein technisch einfacheres Verfahren getestet [10]. Dabei wurde der Urin in einen Destillierapparat geleitet und das Wasser nach ca. 3-4 Wochen vollständig evaporiert. Der Rückstand enthält alle Nährstoffe, die im Urin enthalten sind und kann als Dünger verwendet werden. Vorteile dabei sind, dass dieses Verfahren mit geringen Materialkosten und wenig Arbeitseinsatz umgesetzt werden kann. Zusätzlich ist keine Energieversorgung nötig. Dies setzt jedoch eine ausreichende Sonnenstrahlung voraus. In Deutschland ist nicht zu erwarten, dass in den kalten Jahreszeiten ausreichend Sonnenenergie zur Verfügung steht. Des Weiteren werden bei diesem Ansatz Nährstoffe nicht von Schadstoffen wie Arzneimittelrückständen getrennt.

Somit stehen für den Urin noch keine technisch ausgereiften Systeme zur Nährstoffrückgewinnung und Reststoffbehandlung zur Verfügung, die serienmäßig für den dezentralen Bereich einsetzbar und z.B. auch unter vergleichsweise ungünstigen Randbedingungen wie gemäßigttem Klima, Notwendigkeit einer vollständigen Autarkie, einer nur bedingt verfügbaren Stromversorgung und/oder saisonal anfallender Urinmengen (Tourismusgebiete) tauglich sind.

Um mittels robuster und einfacher Verfahren den Ammoniumstickstoff im Überstand der MAP-fällung zu reduzieren, würde dafür ein Bodenfiltersystem ausgewählt. Es ist bekannt, dass vertikal durchströmte Bodenfiltern Ammonium nitrifizieren können [12-14]. Allerdings liegen keine

Untersuchungen zur Umsetzung von hoch konzentrierten Stoffströmen mit mehreren tausend mg/L in Bodenfiltern vor, wie sie im Überstand aus der MAP-Fällung auftreten. Grundsätzlich hängt die Nitrifikationsleistung von der spezifischen Flächenbelastung mit Ammonium, aber auch dem eingesetzten Substrat ab [15, 16]. Ergebnisse aus einem Forschungsvorhaben zur Eignung von Lava-Substrat zur Verbesserung der Nitrifikationsrate bei konventionellem Schmutzwasserzufluss [16] haben gezeigt, dass die mittlere  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Reinigungsleistung der PKA Büschdorf über einen Zeitraum von 6,5 Jahren 99 % bei einer Zulaufkonzentration von ca. 25 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$  betrug. Ursächlich ist dies bei dem gewählten Substrat auf einen Zeolith-Anteil von ca. 10 % und eine hohe Kationenaustauschkapazität zurückzuführen, die beim Mehrfachen im Vergleich zu anderen Lavasanden bzw. fluviatilen Rundkornsanden liegt [15].

Damit ist die generelle Eignung von Bodenfiltern zur Nitrifikation zwar aufgezeigt, allerdings liegen keine Erfahrungen mit hochkonzentrierten Medien vor. Es bedarf daher einer Untersuchung, ob das System auch bei Konzentrations- und Frachtspitzen aus der MAP- Behandlung und den höheren pH-Werten in diesem Teilstrom funktioniert und welche Bemessungsparameter daraus abgeleitet werden können.

Der Reinighof liegt etwa 2 km außerhalb der Gemeinde Bruchweiler-Bärenbach (Rheinland-Pfalz). Hier leben ca. 10 Menschen verschiedener Geschlechter und Generationen als Gemeinschaft zusammen. Mit einer eigenen Stromversorgung über Solarenergie und mit einer eigenen Quelle für die Wasserversorgung ist der Reinighof bereits ein Vorzeigeprojekt in Sachen Nachhaltigkeit. Aufgrund des abgelegenen Standortes besteht kein Anschluss an das Kanalnetz und ist auch in Zukunft nicht vorgesehen. Mit dem Bau einer Pflanzenkläranlage und der im Rahmen dieses Projektes umgesetzten Aufbereitung von Urin und Faeces wurden nun zusätzlich in Bezug auf Abwasser autarke und nachhaltige Lösungen geschaffen und untersucht, die zur Schließung von Stoffkreisläufen beitragen.

## 1.2 Zielsetzung

Im Rahmen des Projektes Reinighof ergeben sich die folgenden Ziele und Alleinstellungsmerkmale des Behandlungskonzepts:

- Schließung von Stoffkreisläufen auf dezentraler, lokaler Ebene
- Einsparung von Trinkwasser durch den Einsatz von Trockentrenntoiletten
- Gewinnung eines Düngemittels durch MAP-Fällung aus Urin und eines Bodenverbesserers durch Fäzeskompostierung (Schließung von Stoffkreisläufen)
- Erprobung eines innovativen Spezialbodenfilters zur Behandlung hochkonzentrierter stickstoffhaltiger Teilströme
- Autarkie von einer zentralen Abwasserentsorgung durch Verknüpfung aller Behandlungskomponenten vor Ort
- Öffentlichkeitsarbeit zur Verbreitung des Behandlungskonzepts durch Erstellung eines Films und vielfältiger Informationsveranstaltungen wie Seminare, Flyer und Filme.

## 1.3 Arbeitsprogramm

Aus der Projektidee und den Projektzielen ergab sich das folgende Arbeitsprogramm (in Klammern sind die jeweils zuständigen und beteiligten Projektpartner aufgeführt):

- AP 1: Verfahrenstechnische Auslegung und Bau der Versuchsanlagen
  - Planung und Bau der Trenntrockentoiletten (OtterWasser und Europäische Pioniersiedlung e.V.)
  - Vorversuche, Planung und Installation der Urinbehandlung (TU Kaiserslautern)
  - Planung und Bau eines Spezialbodenfilters zur Mitbehandlung des stickstoffreichen Überstand aus der MAP-Fällung (Dr. Bruch & Partner)

- Planung und Installation der Fäzesbehandlung (TU Kaiserslautern, Europäische Pioniersiedlung e.V.)
- AP 2: Betrieb, Anpassung und Bewertung der Einzelverfahren
  - Betrieb der Trenntrockentoiletten und Minimierung der Geruchsemissionen (Europäische Pioniersiedlung e.V., OtterWasser)
  - MAP-Gewinnung aus Urin (TU Kaiserslautern, Europäische Pioniersiedlung e.V.)
  - Betrieb und Bewertung des Spezialbodenfilters (Dr. Bruch & Partner, TU Kaiserslautern)
  - Fäzeskompostierung (TU Kaiserslautern, Europäische Pioniersiedlung e.V.)
- AP 3: Bewertung des Gesamtbehandlungskonzeptes (TU Kaiserslautern mit allen Projektpartner)
- AP 4: Öffentlichkeitsarbeit
  - Informationsveranstaltungen (Europäische Pioniersiedlung e.V.)
  - Erstellung eines Informationsfilms (TU Kaiserslautern mit allen Projektpartnern)
  - Erstellung eines Info-Flyers (TU Kaiserslautern)

## 2. Konzeption, Planung und Auslegung der Verfahrensschritte und der Versuchsanlagen

### 2.1 Gesamtkonzept und Bemessungsgrundlagen

Ziel dieses DBU-Projektes war es, ein autarkes dezentrales Behandlungskonzept mit Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen zu entwickeln und umzusetzen. Alle Teilströme und Reststoffe sollten direkt vor Ort behandelt und teilweise wiederverwendet werden, so dass kein leitungsgebundener Anschluss für die Ableitung von Reststoffen erforderlich ist. Das Gesamtkonzept ist in der Abbildung 1 schematisch dargestellt, Details sind Anhang 1 zu entnehmen. Das häusliche Abwasser wurde in Grauwasser, Faeces und Urin getrennt. Zur Grauwasserbehandlung wurde bereits vor Projektbeginn und außerhalb des Projektes eine Pflanzenkläranlage (PKA) in Betrieb genommen. Die PKA kann ohne Stromverbraucher betrieben werden und fügt sich problemlos in das Landschaftsbild ein. Da am Reinighof kein geeigneter Vorfluter zur Einleitung des gereinigten Grauwassers vorhanden ist, und auch eine Versickerung des Wassers aus Gründen des Grundwasserschutzes und nahegelegenen Trinkwasserbrunnens nicht zulässig ist, wird ein abflussloser Betrieb durch einen Verdunstungsteich gewährleistet.

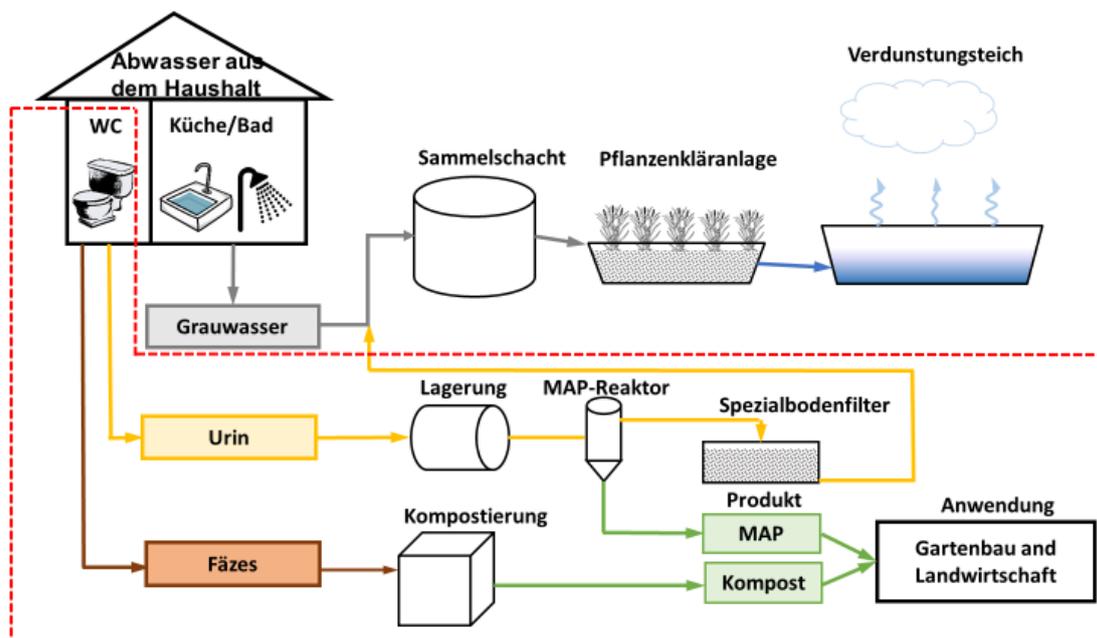


Abbildung 1: Gesamtkonzept der Abwasserbehandlung am Reinighof mit den im Rahmen des Projektes umgesetzten Komponenten innerhalb des rot gestrichelten Rahmens

Für die Behandlung der Toilettenfraktion wurden Trockentrenntoiletten eingesetzt, um Fäzes und Urin zu trennen, den Wasserverbrauch zu senken und damit die Menge des Abwassers zu reduzieren. Die Fäzes wurden in Schnellkompostern (abgeschlossenes System, einfache Handhabung) behandelt und in offenen Systemen nachkompostiert, um eine Volumenreduzierung und eine Hygienisierung zu erreichen. Der Kompost kann als Dünger und Bodenverbesserer von den Anwohnern verwendet werden. Um aus den im Urin enthaltenen Nährstoffen einen guten pflanzenverfügbaren Dünger (Struvit bzw. MAP) zu gewinnen erfolgte die Urinbehandlung in drei Schritten: Lagerung, MAP-Fällung und Nitrifikation des Urinüberstandes in einem Spezialbodenfilter. Während der Lagerung von Urin wird Harnstoff zu Hydrogencarbonat, Hydroxid-Ionen und Ammonium hydrolysiert, was zu einer pH-Verschiebung von etwa 6 auf ca. 9 führt. Dieser pH-Wert ist für die MAP-Fällung geeignet, so dass nur

eine Magnesium-Quelle (Mg) in den MAP-Reaktor gegeben werden muss, um den enthaltenen Phosphor und anteilig Stickstoff in MAP ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) zu binden.



Durch eine MAP-Fällung können im günstigen Fall fast der gesamte im Urin enthaltenen Phosphor aber nur ca. 3 % des Stickstoffs [6] zurückgewonnen werden. Der restliche Stickstoff verbleibt nach der Fällungsreaktion im Überstand und muss weiter behandelt werden. Um eine Überlastung der PKA zur Grauwasserbehandlung zu verhindern, wird dieser ein mit zeolithhaltigem Lava-Sand befüllter Spezialbodenfilter vorgeschaltet, in dem zunächst Adsorption und anschließend die Umsetzung des Ammoniums stattfindet. Der Spezialbodenfilter wurde als Vertikalfilter realisiert.

Die Bemessungsgrundlagen wurden basierend auf folgenden Rahmenbedingungen festgelegt. Am Reinighof leben derzeit acht Menschen dauerhaft zusammen. Mit dem zugehörigen Campingplatz und Seminareinrichtungen sind an einzelnen Tagen bis zu 80 Personen auf dem Reinighof. Um dies annähernd abzubilden wurde ein Mittelwert von 16 Personen pro Tag als Bemessungswert für die Sommersaison gewählt, während das Winter-Szenario mit 8 Einwohner definiert wurde.

## 2.2 Planung und Bau der Trockentrenntoiletten

Die eingesetzten Trockentrenntoiletten (TTT) der Firma Holzapfel+Konsorten (TTC Holz Modell, siehe Abbildung 2) bestehen jeweils aus einem Massivholz-Toilettensitz, einer Urintrennung und einem Sammelbehälter aus Kunststoff (PP). Der Urinabfluss wird als Schlauch aus der Toilette geführt und an der Urinleitung (DA75, PP) zum Urintank angeschlossen. Die Urinleitung wird mit einem Gefälle von 0,43% frostfrei verlegt. Der 25 Liter Fäzes-Sammelbehälter reicht zur Sammlung der Fäzes von einer Person für etwa vier Wochen aus. Die Entnahme des Behälters erfolgt seitlich oder nach hinten. Durch Installation eines kleinen Ventilators (12V/0,5 W) mit handelsüblichem Rohr (DN75) direkt über dem Dach ist die Toilette geruchsfrei und insektenfrei.

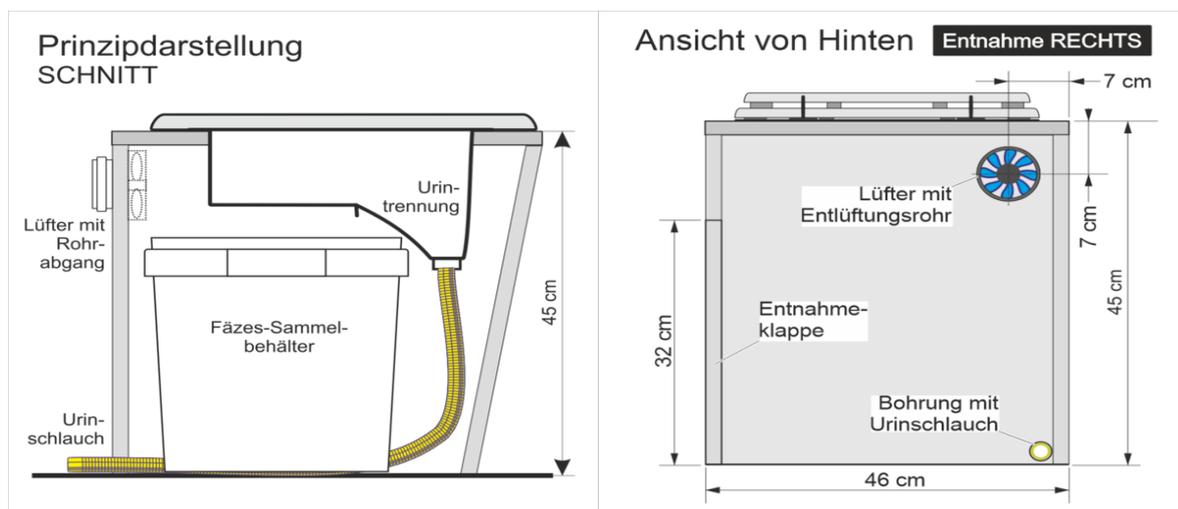


Abbildung 2: Prinzipdarstellung der eingesetzten Trockentrenntoilette (TTC Holz Modell von Holzapfel+Konsorten), entnommen von der Website holzapfel-konsorten [17]

Die Anzahl der Trockentrenntoiletten wird durch die Anzahl der Benutzer, die Größe der Fäzessammelbehälter und die Entleerungshäufigkeit bedingt. Für die Bewohner des Hauses (8 Personen) wurden zwei TTT und ein Urinal im Haus gebaut, damit wöchentliche Entleerungen des Fäzessammelbehälters ausreichen. Für Besucher des Campingplatzes wurde ein Sanitärwagen mit drei Toiletten eingerichtet.

## 2.3 Vorversuche zur Urinbehandlung zur Ermittlung von Bemessungswerten

### 2.3.1 Vorversuche zur Urinlagerung

Zu Beginn des Projektes gab es keine Bemessungsvorlagen zur Auslegung von Lagertanks und MAP-Reaktoren zur Urinbehandlung. Das Volumen des Urinlagertanks muss über die Aufenthaltszeit des Urins bemessen werden. Im Projekt wurde eine weitgehende Harnstoffhydrolyse gewünscht, um den pH-Wert des gelagerten Urins auf ca. 8 bis 9 anzuheben. Damit kann die folgende MAP-Fällung ohne zusätzliche Lauge-Zugabe betrieben werden. Die Änderung des pH-Werts von Urin über die Zeit und pH-Wert Änderungen von Mischungen von frischem und gelagertem Urin wurden im Labor untersucht.

Dazu wurden von 2 L frischen Urins die pH-Wert Änderung während der Lagerung bei 20 °C über 42 Tage gemessen, ohne dass weiterer Urin hinzugefügt wurde (Abbildung 3a). Der pH-Wert von frischem Urin betrug ca. 6. In der ersten Woche blieb der pH-Wert fast unverändert, stieg jedoch in der zweiten Woche von 6 auf 8,5 stark an, in der dritten Woche nur noch langsam und stabilisierte sich ab der vierten Woche bei etwas über 9. Damit reicht eine Aufenthaltszeit von 21 Tagen im Lagertank aus, um eine pH-Anhebung auf 9 zu erzielen.

In der praktischen Anwendung wird der frische Urin im Lagertank mit bereits gelagertem Urin gemischt. Um dies nachzustellen, wurden im Labor 500 mL von über 28 Tage gelagertem Urin (pH 9,0) in ein 2 L Becherglas gefüllt. Dazu wurden unterschiedliche Mengen frischen Urins (pH-Wert ca. 6,5) semi-kontinuierlich zugegeben und gemischt. Zehn Minuten nach Zugabe des frischen Urins (pH-Konstanz), wurde der pH-Wert in der Mischung erneut gemessen. Abbildung 3b ist zu entnehmen, dass die pH-Werte bei einem Volumenverhältnis von frischem/gelagertem Urin von 1,5 bzw. 3 jeweils noch bei 8,5 bzw. 8,0 lagen, und damit für die MAP-Fällung geeignet sind [18]. Aus diesen Versuchen wurde abgeleitet, dass nach einer anfänglichen Teilfüllung des Lagertanks regelmäßig frischer Urin zugeführt werden kann und dennoch der erforderliche pH-Wert für die MAP-Fällung erreicht wird.

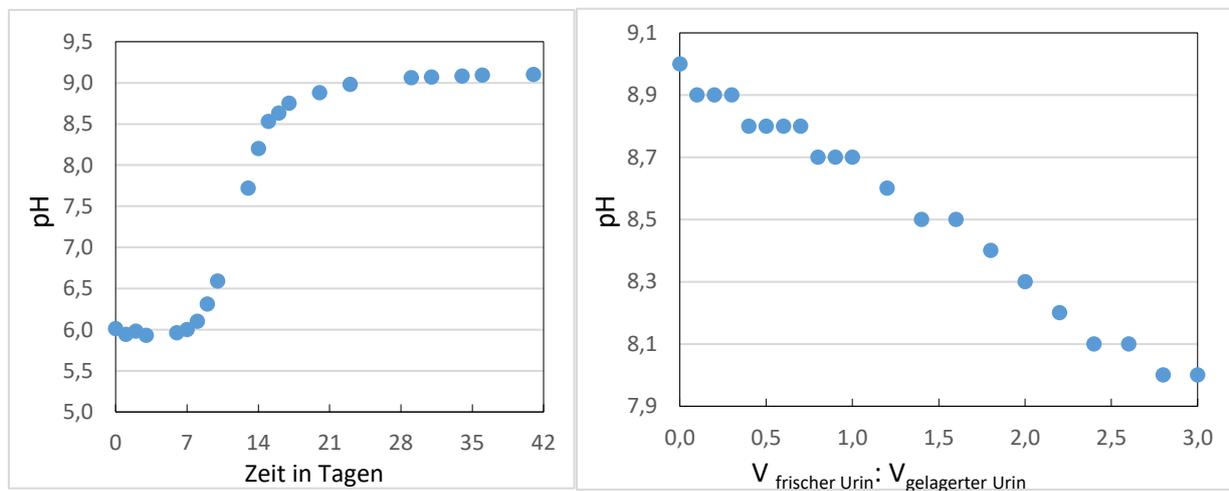


Abbildung 3: Links 3a. pH-Verlauf während der Lagerung von Urin bei einmaliger Zugabe am Tag 0; Rechts 3b. pH-Wert von gemischtem Urin bei unterschiedlichem Volumenverhältnis von frischem/gelagertem Urin

### 2.3.2 MAP-Fällungsversuche unter an den ländlichen Raum angepassten Randbedingungen

Bereits vor Projektbeginn wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit MAP-Fällungsversuche im Labormaßstab durchgeführt [19], um das Prozessverständnis als Basis für die Entwicklung eines einfach zu betreibenden MAP-Fällungsreaktors zu verbessern. Im Ländlichen Raum und somit auch am Reinighof fehlen die Möglichkeiten den Fällungsprozess durch Temperaturanpassungen zu beeinflussen. Weiterhin kann die Verfügbarkeit von Strom begrenzt sein. Daher wurden in den Vorversuchen unter Verwendung von MgO (Laborqualität), einem aus [1] abgeleiteten Molverhältnis

Mg/P von 1,3 und einer in [20] empfohlenen Rührzeit von 15 Minuten die Temperaturabhängigkeit der MAP-Fällung (4°C bzw. 20°C) sowie der Einfluss der Rührerdrehzahl (200 rpm und 350 rpm) ebenso untersucht, wie der Wirkungsgrad der MAP-Fällung bei pH-Werten von 9 (entsprechend gelagertem Urin) bzw. 8,5 (Mischung mit frischem Urin, siehe Kapitel 2.3.1). Weiterhin wurden zwei Füllstrategien, nämlich Batch-Verfahren mit einmaliger Befüllung und einmaliger Magnesiumdosierung (1\*800 mL) oder im Fed-Batch-Verfahren mit zweimaliger Befüllung und zweimaliger Magnesiumdosierung (2\*400 mL) im 1 L Becherglas durchgeführt, um zu überprüfen, ob vorhandenes MAP aus dem ersten Fällungsprozess sich durch das Vorhandensein von Kristallisationskeimen positiv auf den Gesamtprozess auswirkt.

Bei allen Versuchen konnten über 92 % und bis zu knapp 99% des Phosphats gefällt werden [19] (siehe Anhang A2 ). Ein Einfluss der untersuchten Änderungen in der Rührerdrehzahl, Temperatur, pH-Wert oder Chargenprozess ist nicht erkennbar. Daraus wurde für den Reinighof das Behandlungskonzept (Kapital 3.2.2) des MAP-Reaktors ohne zusätzliche Temperierung und pH-Einstellung abgeleitet.

### 2.3.3 Versuche zur Ermittlung der Eignung von Filtermaterialien zur Präzipitat-Abtrennung

In Laborversuchen wurden zur Abtrennung des MAP-Präzipitats Faltenfilter (Whatman, Porengröße 4-7 µm) verwendet, mit denen ein weitgehender Feststoffrückhalt möglich ist. Da diese für den technischen Einsatz nicht geeignet sind, wurde im Vorfeld der Planung der MAP-Fällungsanlage untersucht, ob der im Einzelhandel erhältliche Stoff Taft uni; 50% Polyester, 50% Nylon; DYE LOT zur Präzipitat-Abtrennung geeignet ist. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wurde dazu der ausgefällte Feststoff alternativ über Laborfilterpapier (Whatman, Porengröße 4-7 µm, zwei parallele Ansätze) oder über das Filtertuch Taft uni (ebenfalls zwei parallele Ansätze) abgetrennt. Die Filtermaterialien wurden über die Analysen des AFS-Gehaltes im Filtrat und des zurückgehaltenen Feststoffes beurteilt.

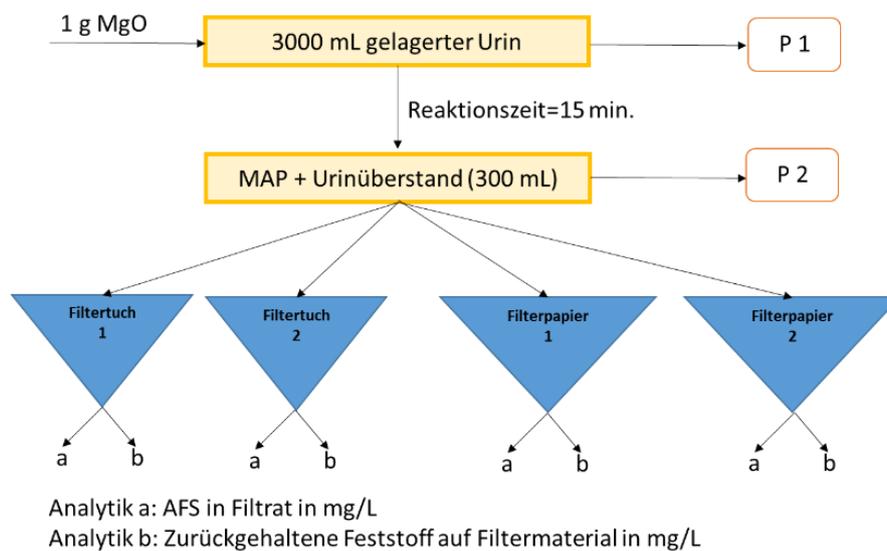


Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Vorversuche zur Eignung von Filtermaterialien zur Feststoffabtrennung

Aus den Analyseergebnissen von Probe 1 und 2 (Urin vor und nach der Fällung) geht hervor, dass die Fällungseffizienz für Phosphat 99,57 % beträgt. Unter der Annahme, dass das gesamte Phosphat in Form von MAP ausfällt, ergibt sich eine Masse von 3649 mg MAP aus 1 L Urin. Tabelle 1 verdeutlicht, dass der gemessene Feststoffrückhalt in der berechneten Größenordnung liegt. Wie Tabelle 1 ebenfalls zu entnehmen ist, weist das Filtertuch ein vergleichbares Rückhaltevermögen für das Präzipitat auf, so dass Taft uni als Filtermaterial zum Betrieb des MAP-Reaktors am Reinighof eingesetzt wird.

Tabelle 1: Feststoffrückhalt in dem ausgewählten Filtertuch und Faltenfilterpapier im Labor

| Filtermaterial       | AFS in Filtrat<br>in mg/L | Zurückgehaltene<br>Feststoffe<br>in mg/L | Summe<br>Feststoffgehalt<br>in mg/L | Anteil von<br>Zurückgehaltener<br>in % |
|----------------------|---------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Filtertuch 1         | 84                        | 3.551                                    | 3.635                               | 96,6%                                  |
| Filtertuch 2         | 76                        | 3.936                                    | 4.012                               | 98,1%                                  |
| Faltenfilterpapier 1 | 72                        | 3.540                                    | 3.612                               | 98,0%                                  |
| Faltenfilterpapier 2 | 79                        | 3.458                                    | 3.537                               | 97,8%                                  |

## 2.4 Planung und Bau des Lagertanks und des MAP-Reaktors zur Urinbehandlung

### 2.4.1 Bemessung

Gemäß Kapitel 2.3.1 sollte Urin mindestens 21 Tage gelagert werden, um den pH- Wert auf einen für die MAP-Fällung geeigneten Wert von über 8 anzuheben. Unter Zugrundelegung des Bemessungswertes von 16 Personen und einem spezifischen Urinanfall von ca. 1,5 L/(E\*d) in DWA-A 272 (2017) [21] ergibt sich ein Mindestvolumen für den Urinlagertank von 504 L (siehe Tabelle 2).

Für die Planung des MAP-Reaktors wurde aufgrund nur begrenzt verfügbarer Investitionsmittel und begrenzter Stromversorgung eine von den BewohnerInnen des Reinighofs manuell bedienbare Einheit entwickelt und auf eine komplexe automatisierte Anlage verzichtet. Nach Gesprächen mit BewohnerInnen des Reinighofs wurde eine Bedienhäufigkeit im Winter alle zwei Wochen und im Sommer wöchentlich festgelegt, um eine langfristige Akzeptanz zu gewährleisten. Bei 16 Personen, einem spezifischen Urinanfall von 1,5 L/(E\*d) und einer Dauer von 7 Tagen ergibt sich daraus ein erforderliches Reaktionsvolumen für den MAP-Reaktor von 168 L (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Bemessung von Lagertank und MAP-Reaktor

| Beschreibung                         | Einheit | Winter-Szenario | Sommer-Szenario |
|--------------------------------------|---------|-----------------|-----------------|
| Einwohnerspezifischer Urinanfall[21] | L/(E*d) | 1,5             |                 |
| Einwohner                            | E       | 8               | 16              |
| Täglich Urinanfall                   | L/d     | 12              | 24              |
| min. Lagerdauer in Urintank          | d       | 21              |                 |
| <b>mindest Volumen des Urintanks</b> | L       | 252             | <b>504</b>      |
| Behandlungsintervall                 | d       | 14              | 7               |
| <b>Reaktorvolumen</b>                | L       | <b>168</b>      | <b>168</b>      |

### 2.4.2 Planung und Bau des Forschungshauses (Lagertank und MAP-Reaktor)

Um den Betrieb des MAP-Reaktors auch im Winter zu ermöglichen und Frostsicherheit zu gewährleisten, wurde zur Einhausung der Versuchsanlage ein Versuchshaus gebaut. Während des Projektes diente das Haus als Standort für die MAP Fällung, sowie als mobiles Labor zur Durchführung von Messungen während der Versuche. Nach Projektende wird das Haus weiterhin den MAP-Fällungsreaktor beherbergen, kann aber zusätzlich für die Öffentlichkeitsarbeit genutzt werden, indem BesucherInnen die Prozesse anhand der technischen Anlage demonstriert und verdeutlicht werden.

Abbildung 5 verdeutlicht die Anordnung der Leitungen und Aggregate im Versuchshaus schematisch. Die Raummaße des Versuchshauses sind 4,0 m x 3,0 m mit einer Deckenhöhe von 2,8 m. Ein Standard-Beton-Schacht mit Innendurchmesser von 2m und einer Bauhöhe von 1,9 m (nach DIN 4034-2) der Mall GmbH wurde als Keller für den Urinlagertank unter dem Gebäude gebaut. Durch diese „Tank im

Tank Lösung“ (siehe Anhang A3) wird der Lagertank vor Frost geschützt und es wird keine Auftriebssicherung benötigt. Da der schwere Schacht als Auffangwanne dienen kann, wird im Fall einer Leckage auch verhindert, dass Urin ungereinigt ins Grundwasser gelangt. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Zugänglichkeit zu den Rohrleitungen, sowie die kurzen Rohrleitungswege zum MAP-Reaktor. Ein abflussloser Abwassersammeltank mit einem Gesamtvolumen von 700 L aus Polyethylen (PE-LLD) (GET 0.7 AW 2, GreenLife GmbH) wird als Urinlagertank eingesetzt. Der Füllstand im Urinlagertank wird über Ultraschall gemessen und per Funk auf einem Display angezeigt (Füllstandsanzeige-digital von GreenLife GmbH). Der gelagerte Urin wird durch eine Membranpumpe (Serie EMG/0,16 Kw, Xylem Water Solutions Deutschland GmbH) vom Urinlagertank zum MAP-Reaktor zur P-Rückgewinnung transportiert. Die Abluftleitung des Urinlagertanks und des MAP-Reaktors sind an eine aktive Überdachentlüftung mittels eines Kanalventilators angeschlossen. Neben dem MAP-Reaktor wird ein Arbeitstisch eingerichtet.

Ein Edelstahl MAP-Reaktor (Abbildung 5 rechts) mit einem Gesamtvolumen von 186 L und einem Füllvolumen von 160 L bestehend aus einem Zylinder- und einem unteren Trichterteil zur Entnahme des MAP wurde von der Werkstatt der TU Kaiserslautern gebaut. Die Abmessungen und Baudetails können dem Anhang A4 entnommen werden. Auf dem Deckel des Zylinders findet sich eine Stütze zur Montage des Rührwerkmotors (Hei-TORQUE Value 400, Heidolph Instrument GmbH), ein Trichter mit Ventil und Deckel zur Mg-Dosierung sowie ein Anschluss der Abluftleitung. Am Rand des Zylinders ist ein Anschluss (oben) für den Urinzulauf, ein Anschluss (mittel) für die pH-Sonde, sowie Anschlüsse (unten) für den Ablauf des Urinüberstands, für ein Plexiglasrohr, welches als Füllstandsfenster dient und einen zusätzlichen Anschluss als Reserve angebracht. An der Mitte des Trichterteils befindet sich noch ein Anschluss für den Ablauf des Urinüberstands zur Anpassung der Betriebsbedienung. An beiden Ablaufanschlüssen wird jeweils eine Probenahmestelle durch Ventile eingerichtet. Der Urinüberstand fließt nach der Fällung im Freigefälle zum Spezialbodenfilter (SBF). Nach dem Ablassen des Urinüberstands gelangen der restliche Urinüberstand und das Präzipitat durch das Ventil unterhalb des Trichters zur Filtrationseinheit. Das Filtrat wird zum Bodenfilter geleitet, und der Feststoff im Filtersack wird an der Luft getrocknet und als Produkt MAP gesammelt und verwendet.

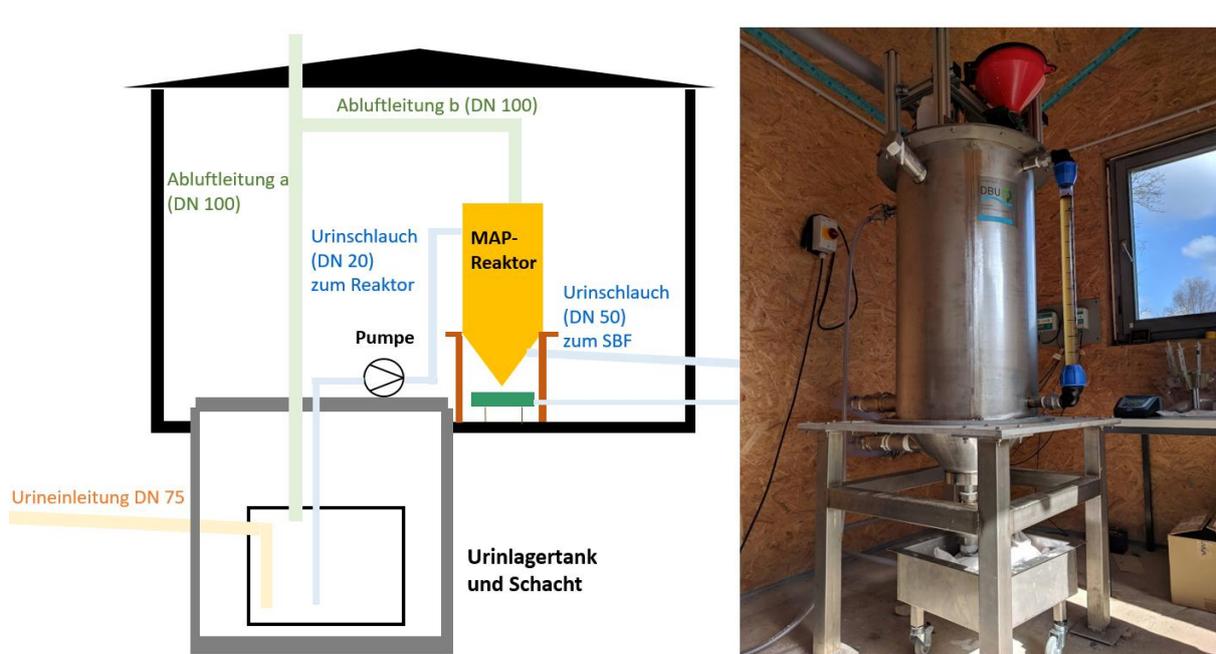


Abbildung 5: Schnitt durch das Forschungshaus (links) und Bild des MAP-Reaktors (rechts) mit Füllstandsanzeige (Plexiglasrohr am Reaktor angebracht) und angeschlossenen Filtersack in der Filtrationseinheit unterhalb des Reaktors

## 2.5 Planung und Bau des Spezialbodenfilters

Nach der MAP-Fällung enthält der Urin-Überstand eine hohe Ammonium-Konzentration und darf nicht unbehandelt abgeleitet werden. Daher wurde ein Spezialbodenfilter geplant und zwischen MAP-Reaktor und Grauwasser-PKA angeordnet. Ziel war es, die Ammoniumkonzentrationen in diesem Filter soweit zu reduzieren, dass eine anschließende Mitbehandlung in der Pflanzenkläranlage zur Grauwasserbehandlung möglich ist. Auch wenn es sich um eine relativ kleine Menge Flüssigkeit in Relation zu dem anfallenden Grauwasser handelt, sollte vermieden werden, dass der Grauwasserbodenfilter alle 1-2 Wochen eine Stoßbelastung mit einer sehr hohen Ammoniumkonzentration von mehreren tausend mg/L erhält.

### 2.5.1 Bemessung des Spezialbodenfilters

Die Oberfläche wurde aufgrund der maximal zu erwartenden  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht und der spezifischen Stickstofffracht bemessen (siehe Tabelle 3). Da für Wässer mit den vorliegenden hohen Konzentrationen kein Regelwerk existiert, wurde auf Literatur zurückgegriffen, um Anhaltspunkte für eine sinnvolle Bemessung zu finden. Als Orientierung diente eine Veröffentlichung über den Stickstoffabbau in Säulenversuchen von Kayser [14], in denen  $43 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  ohne Stickstoffdurchbruch gereinigt wurden. Die zu erwartende Stickstofffracht auf dem Reinighof betrug bei 16 Einwohnern mit  $11 \text{ g}/(\text{E} \cdot \text{d})$  [21]  $176 \text{ g N}/\text{d}$ . Durch die MAP-Fällung werden ca.  $5,8 \text{ g}/(\text{E} \cdot \text{d})$  aus der flüssigen Phase entfernt. Bei einer spezifischen Flächenbelastung von  $43 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  und  $170,2 \text{ g}/\text{d}$  zu nitrifizierendem Stickstoff ergibt sich eine erforderliche Oberfläche von ca.  $4 \text{ m}^2$ . Bei der Bemessung ist zu beachten, dass auf dem Reinighof der Spezialbodenfilter nicht täglich, sondern intervallweise im Abstand von 7-14 Tagen beschickt wird. Bei der Beaufschlagung des Urinüberstands war zu erwarten, dass die an einem Tag zugeführte Fracht um ein Vielfaches höher sein würde, als die mittlere tägliche Fracht bei den Säulenversuchen von Kayser [14]. Um einen Durchbruch zu verhindern wurde zur Absicherung daher beim Spezialbodenfilter ein zeolithhaltiger Lavasand verwendet, der eine ausgesprochen hohe Kationenaustauschkapazität besitzt, und somit eine sehr gute Reinigungsleistung in Bezug auf  $\text{NH}_4\text{-N}$  erwarten ließ [15].

Tabelle 3: Bemessung des Spezialbodenfilters – Rechnerische mittlere tägliche N-Fracht

| Beschreibung                  | Einheit                    |
|-------------------------------|----------------------------|
| Ausbaugröße                   | 16 E                       |
| spezifische N-Fracht          | 11 g N/(E*d)               |
| N-Fracht                      | 176 g N/d                  |
| Rückhalt N in MAP [6]         | 3%                         |
| verbleibende N-Fracht         | 170,2 g N/d                |
| spezifische N-Fracht des SBFs | 43 g N/(m <sup>2</sup> *d) |
| Größe des SBF                 | 4 m <sup>2</sup>           |

### 2.5.2 Aufbau des Spezialbodenfilters

Der Spezialbodenfilter (SBF) ist ähnlich aufgebaut wie der Grauwasserbodenfilter: Eine 20 cm hohe Drainageschicht aus Kies 2/8 und eine 75 cm hohe Schicht aus Lavasand, der ca. 10 % Zeolith und eine hohe Brunauer-Emmett-Teller spezifische innere Oberfläche (BET) von  $80\text{-}100 \text{ m}^2/\text{g}$  enthält, bilden die Filterschicht (siehe Abbildung 6). Bepflanzt wurde der Spezialbodenfilter mit 16 Schilfpflanzen (*Phragmites communis*). Durch Spannen von Schnüren wurde die Filteroberfläche in 16 Quadrate unterteilt (siehe Abbildung 7). Hierdurch konnte während des Betriebs die tatsächlich beaufschlagte Filteroberfläche beurteilt werden, d.h. wie gleichmäßig sich das Abwasser auf der Filteroberfläche verteilt und alle Bereiche benetzt.

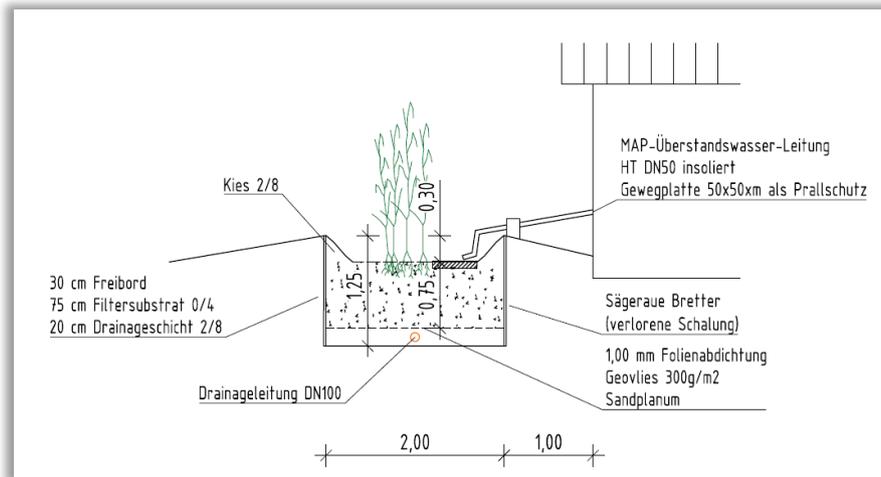


Abbildung 6: Schnitt durch den Spezialbodenfilter

Der beaufschlagte Urinüberstand durchfließt den SBF vertikal und wird über die Drainage in den Kontrollschacht geleitet. Im Kontrollschacht wurde ein Schwanenhals montiert, mit dem sowohl eine Probenahme als auch ein Einstaus des Spezialbodenfilters ermöglicht werden. Die Höhe des Einstaus kann über die Länge des Schwanenhalses gesteuert werden. Aus dem Kontrollschacht fließt der im SBF vorgereinigte Urinüberstand in einen Pumpenschacht, in den auch das Grauwasser aus dem Sanitärwagen des Campingplatzes geleitet wird. Aus diesem Pumpeschacht wird das Gemisch aus nitrifiziertem Urinüberstand und Grauwasser in die alte Mehrkammergrube, die als Vorklärung der Grauwasserbehandlung dient, gepumpt. Hier vermischt es sich mit dem Grauwasser des Hauptgebäudes und gelangt auf die Grauwasserpflanzkläranlage.



Abbildung 7: Spezialbodenfilter mit Unterteilung der Filteroberfläche in 16 Quadrate

## 2.6 Planung und Installation der Fäzesbehandlung

Die Fäzes aus den Trockentrenntoiletten werden bereits in den Toiletten mit Toilettenstreu versehen. Als Toilettenstreu kann grobes trockenes organisches Material wie Holzspäne, Holzhackschnitzel, Rindenschrot und kleine Zweigen verwendet werden. Die Fäzesbehandlung besteht aus einer zweistufigen Kompostierung: Schnellkompostierung in geschlossenen Kompostern und Nachkompostierung in offenen Mieten. In den Kompostern werden die organischen Kohlenstoffverbindungen der Fäzes aerob zu Humus umgewandelt, und Nährstoffe freigesetzt. Zusätzlich entsteht Wärme - Temperaturen über 50 °C werden erreicht - die zur Keimreduzierung beitragen. Das Kompostmaterial kann dann als Bodenverbesserer und Dünger genutzt werden

### 2.6.1 Bemessung

Für Bioabfallkompostierungsanlagen werden zur Hygienisierung Mindesttemperaturen vorgeschrieben, um Krankheitskeime und Unkrautsamen weitgehend abzutöten. Entsprechende rechtliche Vorschriften gibt es weder für die Eigenkompostierung noch für die Fäzeskompostierung. In der BioAbfV [22] wird für Bioabfallkompostierungsanlagen zur Hygienisierung eine Temperatur von mindestens 55 °C jeweils über einen Zeitraum von 14 Tagen, von 60 °C über 6 Tage, von 65 °C über 3 Tage vorgeschrieben, während EcoSanRes [23] eine Temperatur von mindestens 50 °C über einen Zeitraum von 7 Tagen vorschlägt. Um ausreichend lange heiße Phasen während der Schnellkompostierung zu gewährleisten wurde eine mindestens 6-8 Wochen dauernden Kompostierung in geschlossenen Schnellkompostern bei der Planung vorgesehen. Ausgewählt wurden zwei handelsübliche Komposter mit je 220 L Füllvolumen. Anschließend wurde für die Bemessung angenommen, dass der Kompost nochmal über mindestens ein halbes Jahr in offenen Mieten nachkompostiert wird. Die der Bemessung zugrunde gelegten Werte können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Bemessung der Fäzeskompostierung

| Beschreibung                                    | Einheit | Winter-Szenario | Sommer-Szenario | jährlicher Durchschnitt |
|---|---------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| Einwohnerspezifischer Fäzesanfall [20]          | L/(E*d) | 0,07-0,4        |                 |                         |
| Angenommener Anfall Fäzes + Zuschlagsstoffe     | L/(E*d) | 0,5             | 0,5             | 0,5                     |
| Einwohner                                       | E       | 8               | 16              | 12                      |
| Täglich Fäzesanfall                             | L/d     | 4               | 8               | 6                       |
| Volumen Schnellkomposter                        | L       | 220             | 220             | 220                     |
| Befülldauer Schnellkomposter (bei 2 Kompostern) | d       | 110             | 55              | 82,5                    |
| Angenommene Volumenreduktion                    |         | -40%            |                 |                         |
| Jährliche Befüllung der Kompostmieten           | L       |                 |                 | 1314                    |
| Volumen offener Kompost                         | L       |                 |                 | 600                     |
| Befülldauer offener Kompost                     | d       |                 |                 | 167                     |
| benötigte Kompostmieten (jährliche Leerung)     | Stück   |                 |                 | 2                       |

### 2.6.2 Installation der Fäzeskompostierung

Als Schnellkomposter wurden 2 Komposter 220eco (Biolan, Finnland) mit einstellbarem Ventil zur Belüftung und einem Fassungsvermögen von 220 L ausgewählt. Zur Überwachung der Temperatur in den Schnellkompostern sind Temperatursensoren als Einsteckfühler mit Temperaturdatenlogger (testo 175 T3, Kleinschmidt GmbH) angebracht. Während der Projektlaufzeit wurde aufgrund einer zunächst unzureichenden Temperaturentwicklung der Betrieb so angepasst, dass einer Sammeltonne vor den Schnellkompostern zur Zwischenlagerung eingesetzt wurde (Kap.3.5.2). Das in der Sammeltonne und in den Schnellkompostern anfallende Sickerwasser wird in einem Kanister aufgefangen und der Grauwasserbehandlung zugeführt. Hierzu ist es nötig, die Behälter auf einem Podest aufzustellen und entsprechend mit einem Schlauch an den Sickerwasserkanister anzuschließen. Die zwei Schnellkomposter und die Nachkompostierung sind unter einem Holzdach aufgestellt. Die Nachkompostierung erfolgt auf einer geschlossenen Bodenfläche in offenen Holzkompostern (Foto siehe im Anhang A6). Am Reinighof wurde keine automatisierte Befüllung der Kompostanlage umgesetzt. Fäzestransport und Befüllung der Kompostanlagen müssen manuell erfolgen.

### 3. Betrieb, Anpassung und Bewertung der Einzelverfahren

Im Zeitraum von November 2018 bis Januar 2020 wurden die Urinbehandlung und die Fäzeskompostierung unter Begleitung der Projektpartner TU Kaiserslautern und Büro Dr. Bruch und Partner betrieben. Nach der Anpassung der Einzelverfahren wurde der Betrieb ab Februar 2020 sukzessive von den BewohnerInnen des Reinighofs übernommen.

#### 3.1 Betrieb der Trenntrockentoiletten zur Minimierung von Geruchsemissionen

In der untersuchten Betriebsphase vom Oktober 2018 bis Oktober 2020 ist kein Geruchsproblem bei der Nutzung der Trenntrockentoiletten aufgetreten. Der frische Urin ist prinzipiell geruchlos und läuft sofort nach der Ausscheidung über eine Urinleitung zum Lagertank. Einerseits trägt die Zugabe von Holzspänen zu den Fäzes in die Trenntoiletten zur Geruchsminimierung bei, andererseits verhindert der in den Trenntrockentoiletten integrierte Lüfter mit Abluftleitung Geruchsemissionen. Um ein gutes Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff für die Kompostierung zu erhalten sollte das Toilettenstreu nicht im Übermaß hinzugeben werden. Die Zugabe von einem kleinen Becher Toilettenstreu mit rund 100 ml hat sich bewährt.

Geruchsemissionen im Urinlagertank und MAP-Reaktor können durch die angeschlossene Abluftleitung mit integriertem Lüfter ebenfalls problemlos vermieden werden. Im Normalbetrieb wurden keine unangenehmen Gerüche festgestellt. Auch bei Revisionsarbeiten konnte festgestellt werden, dass die Abluftanlage im Urintank sehr gut funktioniert. Bei der MAP-Fällung aus Urin im Forschungshaus kommt es hingegen zu einem intensiven Uringeruch, wenn der Urinüberstand nach der Fällung zum Spezialbodenfilter und zum Filtersack abgelassen wird, da dies eine offene Stelle ohne Anschluss an die Abluftleitung ist. Das Ablassen des Urinüberstands durch die BewohnerInnen des Reinighofs findet ab 2020 daher überwiegend am Abend statt.

#### 3.2 Betrieb des MAP-Reaktors

##### 3.2.1 Übersicht

Im Zeitraum vom 16.11.2018 bis 21.01.2020 (Versuchsphase) wurde insgesamt 34-mal eine MAP-Fällung von der TUK durchgeführt. In diesem Zeitraum wurde der Betrieb der Anlage wissenschaftlich begleitet und untersucht, und Anpassungen des Betriebes vorgenommen. Anschließend wurden 4 Fällungen von den Bewohnern des Reinighofs unter Anleitung durchgeführt und in die Auswertung mit einbezogen. Der wissenschaftlich untersuchte Betriebszeitraum lässt sich in die Einfahrphase und die Betriebsversuchsphase unterteilen. Begleitend zu den Betriebsversuchen wurden Laboruntersuchungen durchgeführt. Während des Betriebes des MAP-Reaktors am Reinighof wurden folgende Proben genommen und auf die in Tabelle 5 angegebenen Parameter analysiert.

Vom 11.10.2018 bis 14.10.2019 wurde der Füllstand im Urinlagertank wöchentlich durch die BewohnerInnen des Reinighofs und bei jedem Betriebsversuch vor und nach der Befüllung des MAP-Reaktors durch TUK MitarbeiterInnen abgelesen. Da keine exakte Ausliterung durch den Hersteller des Urinlagertanks erfolgte, wurde zur Umrechnung von Füllstand zu Füllvolumen von einem einfachen Zylinder mit den Maßangaben des Herstellers ausgegangen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Füllmengen während der Versuchsphasen (siehe Anhang A8): der Median der Füllung liegt bei 16,8 L/d, der Mittelwert bei 18,9 L/d, die beiden Werte liegen zwischen dem Winter- und Sommerszenario der Bemessung des Urinlagertanks (Tabelle 2, Kap. 2.4.1), nämlich 11 -22 L/d. Tägliche Zuflüsse unter 10 L/d traten lediglich im Winter auf und können auf Urlaub einzelner Bewohnern zurückgeführt werden. Mehr als 30 L/d fallen an, wenn größere Veranstaltung am Reinighof stattfinden. Die im Winter- und Sommerszenario vorgesehene Betriebsintervalle für die Durchführung der Fällung entsprechen daher dem praktischen Betrieb der Anlage.

Tabelle 5: Probennahme während des untersuchten Betriebszeitraumes

| Proben-Nr.        | Ort der Probenname                           | Häufigkeit                             | Analysen und Ort der Durchführung   |
|-------------------|--|--|---|
| 1                 | MAP-Reaktor, Urin vor der Fällung            | Bei jeder MAP-Fällung, alle 1-2 Wochen | PO <sub>4</sub> -P, pH, Temp. LF → vor Ort<br>P <sub>ges.</sub> PO <sub>4</sub> -P, N <sub>ges.</sub> NH <sub>4</sub> -N, Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> → TUK Labor                      |
| 2                 | MAP-Reaktor, Urinüberstand nach der Fällung  | Bei jeder MAP-Fällung, alle 1-2 Wochen | PO <sub>4</sub> -P, pH, Temp. LF → vor Ort<br>P <sub>ges.</sub> PO <sub>4</sub> -P, N <sub>ges.</sub> NH <sub>4</sub> -N, Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> → TUK Labor                    |
| 3                 | Kontrollschacht, Ablauf Spezialbodenfilter   | Bei jeder MAP-Fällung, alle 1-2 Wochen | NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N pH, Temp. LF → vor Ort<br>P <sub>ges.</sub> PO <sub>4</sub> -P, N <sub>ges.</sub> NH <sub>4</sub> -N, Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> → TUK Labor |
| 4                 | Grauwasserschacht, Grauwasser                | alle 3-4 Monaten                       | NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N pH, Temp. LF → vor Ort<br>P <sub>ges.</sub> PO <sub>4</sub> -P, N <sub>ges.</sub> NH <sub>4</sub> -N, Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> → TUK Labor |
| 5                 | Verdunstungsteich, Ablauf Pflanzenkläranlage | alle 3-4 Monaten                       | NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N pH, Temp. LF → vor Ort<br>P <sub>ges.</sub> PO <sub>4</sub> -P, N <sub>ges.</sub> NH <sub>4</sub> -N, Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> → TUK Labor |
| <b>Präzipitat</b> | Filtrationseinheit                           | Bei jeder MAP-Fällung                  | Masse → vor Ort   |

Regelmäßig wurde der Urin für die Fällungsversuche charakterisiert (verwendete Methoden siehe Anhang A9). In allen Proben lag der pH-Wert um 9, obwohl täglich frischer Urin in den Urinlagertank befördert wurde. Dieser pH-Wert ist für die MAP-Fällung gut geeignet, so dass keine Basenzugabe erforderlich war. Die PO<sub>4</sub>-P-Konzentrationen schwankten zwischen etwa 260 und 470 mg/L mit einem Mittelwert von 335 mg/L und einem Median von 347 mg/L.

Tabelle 6: Zusammensetzung von Urin im Urintank während der Versuchsphase vom 16.11.2018 bis 21.01.2020

|                   | Temp. | LF    | pH  | PO <sub>4</sub> -P | NH <sub>4</sub> -N | Ges. P | Ges. N |
|-------------------|-------|-------|-----|--------------------|--------------------|--------|--------|
|                   | °C    | mS/cm | -   | mg/L               | mg/L               | mg/L   | mg/L   |
| <b>Min.</b>       | 6,8   | 25,6  | 9,0 | 263,9              | 3433,0             | 266,0  | 3525,0 |
| <b>Max.</b>       | 19,0  | 36,3  | 9,4 | 474,2              | 5365,0             | 2962,5 | 5855,0 |
| <b>Mittelwert</b> | 12,9  | 31,4  | 9,2 | 352,3              | 4317,0             | 545,1  | 4774,9 |
| <b>Median</b>     | 12,0  | 30,7  | 9,2 | 346,8              | 4243,0             | 379,5  | 4798,0 |

### 3.2.2 Einfahrphase: 16.11.2018 – 12.02.2019

Die MAP-Fällung erfolgte alle ein bis zwei Wochen wie folgt:

- a. Befüllung des MAP-Reaktors
- b. 1. Probe: Urin vor der Fällung entnehmen, PO<sub>4</sub>-P vor Ort messen
- c. Benötigte Menge MgO berechnen und einwiegen
 
$$m_{\text{MgO}} [\text{mg}] = c_{\text{P}} [\text{mg/L}] / 31 [\text{mg/mmol}] * 40 [\text{mg/mmol}] * 160 [\text{L}] * \beta$$
 mit:  $m_{\text{MgO}}$  Masse MgO,  $c_{\text{P}}$  Konzentration PO<sub>4</sub>-P, V Füllvolumen MAP-Reaktor,  $\beta$  molares Verhältnis Mg: P
- d. Drehzahl des Rührers einstellen
- e. Zugabe MgO
- f. Rührer nach der Reaktionszeit ausschalten
- g. Sedimentation
- h. Ablassen des Urinüberstands, 2. Probe: Urinüberstand nach der MAP-Fällung
- i. Filtration des Präzipitates

In der Einfahrphase vom 16.11.2018 bis zum 12.02.2019 wurden sieben Versuche durchgeführt und dabei die Betriebsparameter ( $\beta$ -Wert, Reaktionszeit, Drehzahl der Rührer, Sedimentationszeit) variiert (Abbildung 8). Während die Dosiermenge für MgO aufgrund des Messwertes der P-Konzentration im Urin vor Ort ermittelt wurden, wurde die Effizienz der P-Fällung aus der  $PO_4$ -P Konzentration, der nochmals im Labor gemessenen Proben (vor und nach der Fällung) bestimmt. Abbildung 8 ist zu entnehmen, dass anfangs nur eine mäßige Effizienz erreicht wurde. Dies lag bei den Versuchen 1 bis 4. an einer ungenauen P-Bestimmung vor Ort wegen fehlender Temperierung der Proben. Dadurch wich der tatsächliche  $\beta$ -Wert (berechnet auf Basis der im Labor analysierte Werte) vom mit geplanten  $\beta$ -Wert von 1,3 (vor Ort Messung der  $PO_4$ -P Konzentration) ab. Daher lag der tatsächliche  $\beta$ -Wert in den Versuchen 1 bis 4 zwischen 1,0 vom 1,3, die Rührerdrehzahl zwischen 56 rpm bis 121 rpm und die Reaktionszeit bei einer halben Stunde. Da die P-Fällung mit unter 50% unzureichend war, wurde in Versuch 5 zunächst der  $\beta$ -Wert und anschließend in den Versuchen 6 und 7 die Reaktionszeit erhöht. Die besten Ergebnisse wurden bei einer Reaktionszeit von 1,5 h, einer Sedimentationszeit von ca. 22 h, einem  $\beta$ -Wert von 2 und einer Drehzahl von 78 rpm erzielt. Die Ergebnisse weichen stark von den Laborvorversuchen (Kap.2.3.2) ab, daher wurde weiterer Untersuchungsbedarf bezüglich des Einflusses der Betriebsparameter gesehen und es folgten intensive Untersuchungen sowohl im Labor (Kap. 3.2.4) als auch in der technischen Anlage (Kap.3.2.3).

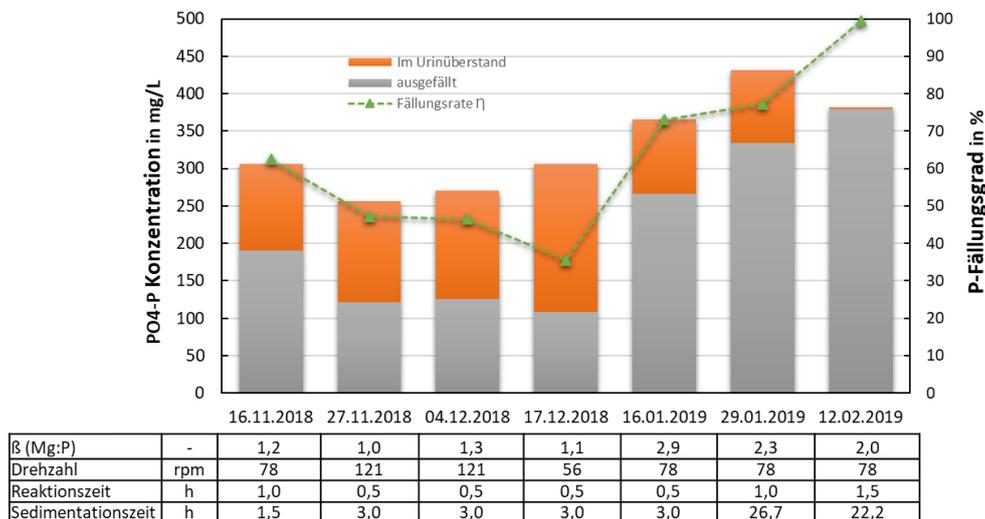


Abbildung 8: Gehalte an Phosphat-Phosphor (im Labor gemessen) im Überstand und im Präzipitat nach der MAP Fällung sowie P-Fällungsgrad bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen während der Einfahrphase. In der Tabelle sind die jeweiligen Betriebseinstellungen angegeben (Bezug berechnete  $\beta$ -Werte auf Basis der Laborwerte)

### 3.2.3 Betriebsversuche und begleitende Laborversuche:

Um den Betrieb zu verbessern, wurden die Erkenntnisse der Einfahrphase mit fachspezifischer Literatur abgeglichen. Eine Suspension von MgO mit Wasser wurde von CAPDEVIELLE et al. [24] zur MAP-Fällung in synthetisch-biologisch gereinigtem Schweineabwasser verwendet und weist auf eine bessere P-Fällungseffizienz hin, als bei Verwendung von MgO Pulver. Eine Studie von KRÄHENBÜHL et al. [25] lässt vermuten, dass der Charakter der zur Fällung eingesetzten MgO-Kristalle eine Rolle für das Lösungsverhalten im Urin spielt. Der kombinierte Effekt des MgO-Typs und der Zugabestrategie wurde bislang nicht systematisch untersucht. Um geeignete Betriebsparameter zu finden, wurden daher 27 Versuche mit den in Tabelle 7 aufgeführten Betriebsparametern durchgeführt. Dabei wurden der Einfluss des Magnesiumoxidtyps, der Dosierstrategie, des Mg: P-Verhältnisses ( $\beta$ -Wert von 1,0; 1,3; 1,5 und 2,0) sowie die Rührgeschwindigkeit (78, 118 und 140 rpm) untersucht.

In der Betriebsversuchsphase wurde die MAP-Fällung grundsätzlich nach derselben Betriebsweise wie während der Einfahrphase durchgeführt. Jedoch wurde zusätzlich die P-Konzentration im MAP-Reaktor während des Fällungsprozesses gemessen. Dafür wurden nach MgO-Zugabe alle 5 bis 30 Minuten Proben aus dem MAP-Reaktor entnommen und sofort die PO<sub>4</sub>-P-Konzentration mit einem Küvettentest analysiert. Wenn die PO<sub>4</sub>-P-Konzentration einen Wert von <5 mg P/L erreichte oder sich nur noch geringfügig änderte (<10 mg/ (L \* h)), wurde der Rührer ausgeschaltet. Somit wurde der Verlauf von P-Konzentration dokumentiert und eine angepasste Reaktionszeit abgeleitet.

Der Einfluss des Magnesiumoxidtyps wurde unter Verwendung von drei verschiedenen MgO-Quellen getestet: MgO von der Grüssing GmbH (Deutschland) mit 97% Reinheit für den technischen Gebrauch (Tech. MgO), MgO von der Carl Roth GmbH (Deutschland) mit 98% Reinheit für Laboranalysen (Labor MgO) und MgO Light von Werthe-Metall (Deutschland, CAS-Nr.: 1309-48-4 mit 99,9%) Reinheit (Amazon MgO). Zur Bewertung des Einflusses der Dosierungsstrategie wurden drei verschiedene Ansätze durchgeführt: (1) Pulverförmiges Magnesiumoxid wurde langsam über einen Zeitraum von 7 Minuten zugegeben, (2) 80-160 g MgO wurden zuerst 10 Minuten lang in 0,8-1,6 L Leitungswasser suspendiert, anschließend langsam über einen Zeitraum von 7 Minuten zugegeben, oder (3) die Suspension wurde auf einmal innerhalb einer Minute oder kürzer zugegeben.

*Tabelle 7: Betriebsbedingungen im MAP-Reaktor während der Fällungsversuche*

| Zeitraum                   | MgO Typ     | MgO Dosierstrategie | Molares Verhältnis Mg:P (β-Wert) | Rührerdrehzahl rpm |
|----------------------------|-------------|---------------------|----------------------------------|--------------------|
| 26.02-05.03. (2019) / n=2  | Tech. MgO   | Pulver langsam      | 2,0                              | 78                 |
| 26.03-16.04. (2019) / n=3  | Tech. MgO   | Suspension langsam  | 2,0                              | 78                 |
| 23.04.-01.05. (2019) / n=3 | Tech. MgO   | Suspension schnell  | 2,0                              | 78                 |
| 06.05.-18.06. (2019) / n=5 | Tech. MgO   | Suspension schnell  | 1,5                              | 78                 |
| 02.07.-23.07. (2019) / n=3 | Tech. MgO   | Suspension schnell  | 1,3                              | 78                 |
| 29.07.-14.08. (2019) / n=3 | Tech. MgO   | Suspension schnell  | 1,3                              | 120                |
| 20.08.-27.08. (2019) / n=2 | Tech. MgO   | Suspension schnell  | 1,3                              | 56                 |
| 25.09.-18.10. (2019) / n=2 | Labor. MgO  | Suspension schnell  | 2,0                              | 78                 |
| 06.11-20.11. (2019) / n=2  | Amazon. MgO | Suspension schnell  | 2,0                              | 78                 |
| 04.12.-17.12. (2019) / n=2 | Amazon. MgO | Suspension schnell  | 1,3                              | 78                 |
| 14.01.-21.01. (2020) / n=2 | Amazon. MgO | Suspension schnell  | 1,0                              | 78                 |

Im Zeitraum von Februar 2019 bis Mai 2019 wurden folgende MgO-Zugabestrategien untersucht: die langsame Zugabe von MgO in Form von Pulver, die langsame sowie die schnelle Zugabe von MgO in Suspension. Abbildung 9 zeigt, dass bei einer schnellen Zugabe der MgO Suspension die P-Konzentration in MAP-Reaktor schneller abnahm als bei einer langsamen Zugabe der Suspension oder einer langsamen löffelweisen Zugabe des MgO Pulvers. Der P-Fällungsgrad bei Zugabe von MgO Pulver war niedriger als bei Zugabe der MgO Suspension, obwohl die Rührzeit bei der Zugabe von Pulver länger dauerte. Daher wurde als zukünftige standardisierte Zugabestrategie die schnelle Zugabe einer MgO-Suspension festgelegt. Die Ergebnisse sind auch Anhang 10 zu entnehmen.

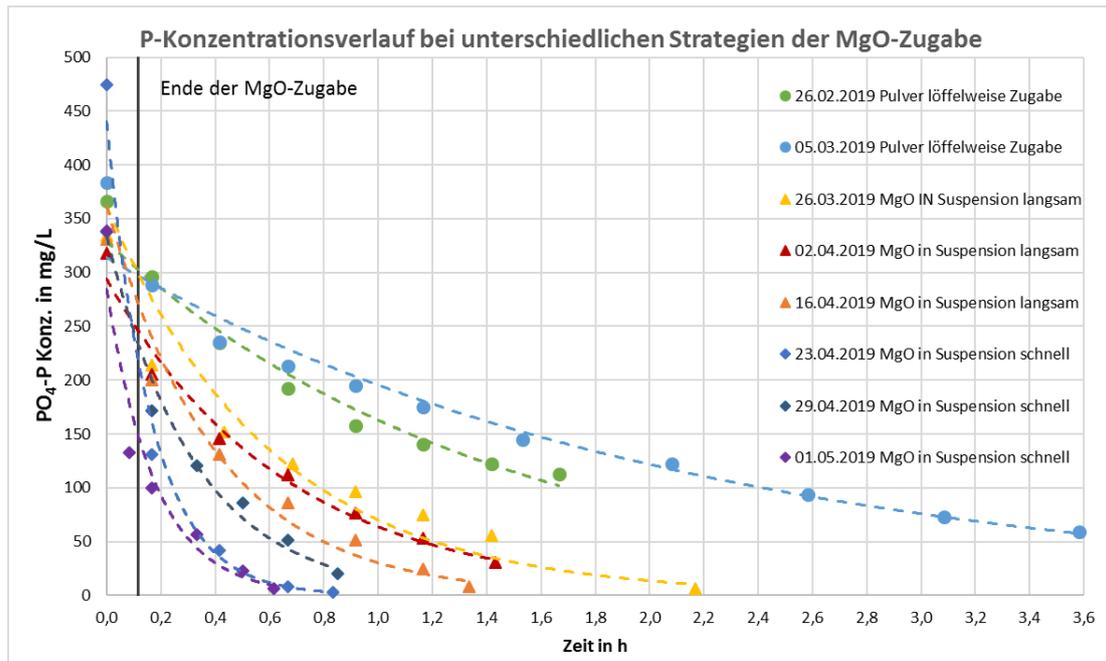


Abbildung 9: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichen MgO-Zugabestrategien, von technischem MgO, Mg: P=2,0 und Rührerdrehzahl 78 rpm

Im Zeitraum von Mai 2019 bis Juli 2019 wurde die MAP-Fällung mit unterschiedlichen Mg: P Verhältnissen ( $\beta = 2,0/1,5/1,3$ ) durchgeführt. Je mehr MgO stöchiometrisch überdosiert wurde, desto schneller fand die MAP-Fällung statt (siehe Abbildung 10). Mit  $\beta=2,0$  erzielte der P-Fällungsgrad einen Wert größer 98%, mit  $\beta=1,5$  und  $1,3$  lag die P-Fällung zwischen 85 und 90%.

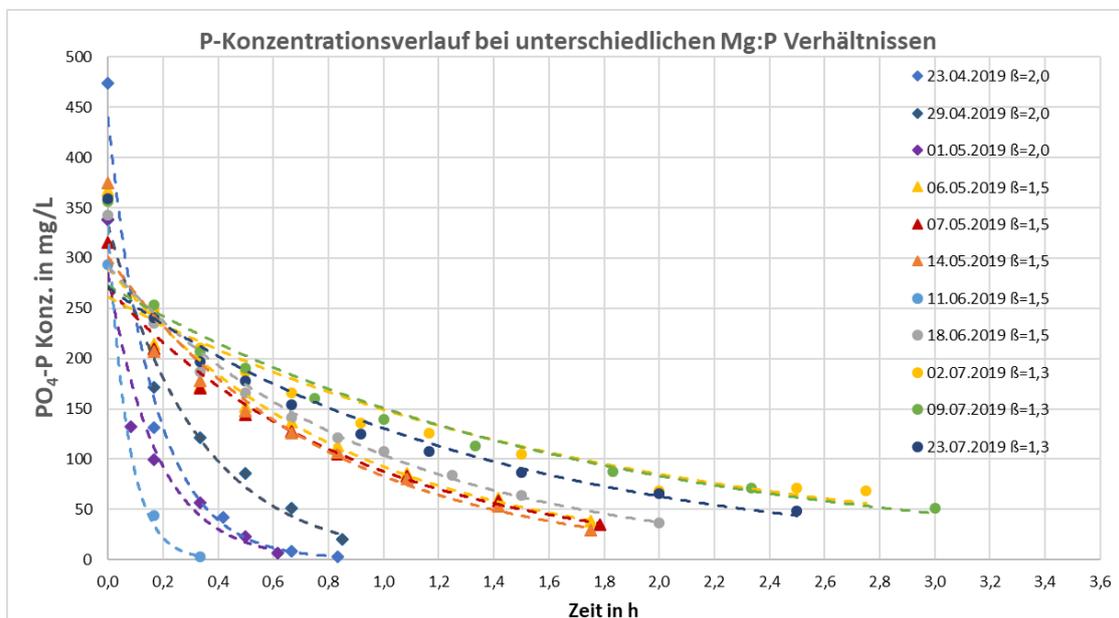


Abbildung 10: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichem molarem Verhältnis von Mg:P ( $\beta$ -Wert), mit schneller Zugabe vom technischem MgO in Suspension und einer Rührerdrehzahl von 78 rpm

Die Drehzahl des Rührers wurde im Zeitraum von Juli 2019 bis August 2019 bei gleicher MgO-Zugabe-Strategie und einem  $\beta$ -Wert von 1,3 variiert. Die P-Verläufe näherten sich bei längeren Rührzeiten einander an und erzielten P-Fällungsgrade zwischen 85% und 90% (Abbildung 11). Ausgehend von diesen Versuchsergebnissen wurde eine Drehzahl von 78 rpm für die folgenden Betriebsversuche festgelegt.

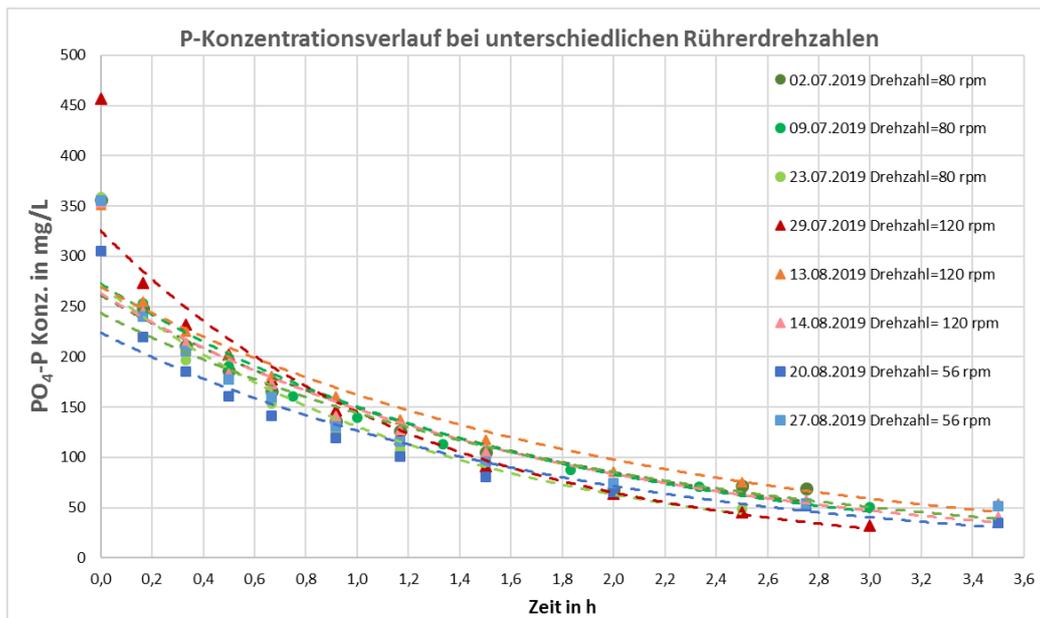


Abbildung 11: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichen Rührerdrehzahlen, mit schneller Zugabe vom technischen MgO in Suspension und Mg:P=1,3

Mithilfe von Begleitversuchen im Labor wurde erkannt, dass die Art des MgO (technisches MgO und MgO in Laborqualität) eine Rolle bei der MAP-Fällung spielt (Kap. 3.2.4). Im September 2019 bis November 2019 wurde ergänzend zu den oben beschriebenen Versuchen mit technischem MgO auch MgO in Laborqualität und ein bei Amazon gekauftes MgO (Herstellerreferenz MgO Light) eingesetzt. Dabei wurde die zuvor festgelegte Standard-MgO-Zugabestrategie verfolgt, die Drehzahl auf 78 rpm eingestellt und ein  $\beta$ -Wert von 2,0 gewählt. Somit konnten die Versuchsergebnisse mit dem vorher verwendeten technischen MgO verglichen werden. In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass bei allen eingesetzten Magnesiumoxiden vergleichbare Ergebnisse bezüglich der Endkonzentration an P im Überstand erzielt werden konnten. Allerdings wurden die hohen P-Fällungsgrade von über 98% bei dem MgO von Amazon und dem Labor MgO bei deutlich kürzerer Rührzeit als mit dem technischen MgO erreicht. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde seitdem beim Betrieb der Anlage das bei Amazon gekaufte MgO verwendet.

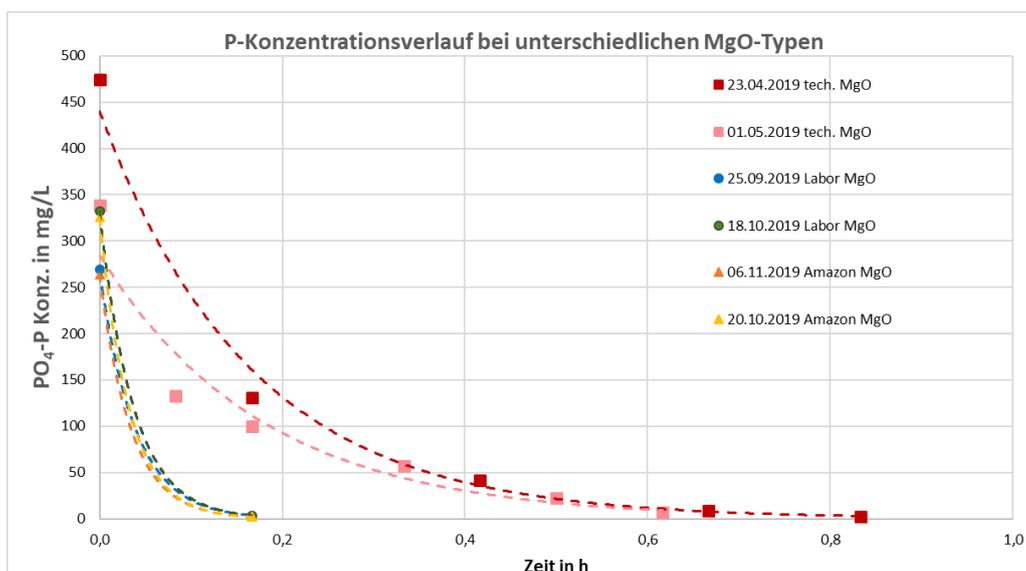


Abbildung 12: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichen MgO-Typen mittels schneller Zugabe der Suspension und einem Mg:P-Verhältnis von 2, sowie einer Rührerdrehzahl von 78 rpm

Die deutlichen Unterschiede im Reaktionsablauf bei Einsatz verschiedener MgO-Typen könnten auf Unterschiede im Reinheitsgrad und die Fähigkeit zur Auflösung in einer Suspension zurückzuführen sein. Letzteres ließ sich nach Herstellung einer Suspension mit technischem MgO, bei der einige Feststoffe im Becherglas der MgO-Suspension verblieben, beobachten. Bei Verwendung von Labor- und Amazon-MgO setzen sich kaum Feststoffe im Becherglas ab.

Nach dieser Beobachtung wurden unterschiedliche Verluste von MgO bei der Herstellung der MgO Suspension vermutet, was in der Praxis dazu führen würde, dass nicht der berechnete  $\beta$ -Wert erzielt wird, da ein Teil des Mg nicht für die Reaktionen zur Verfügung steht. Daher wurde der Einfluss des  $\beta$ -Wertes bei Verwendung des bei Amazon gekauften MgOs auch für  $\beta=1,0$  und  $\beta=1,3$  untersucht (siehe Abbildung 13). Mit  $\beta=1,3$  konnte ein P-Fällungsgrad von  $> 99\%$  erreicht und damit vergleichbar mit dem Wert bei  $\beta=2,0$  bei anderen Mg-Pulvern erzielt werden, allerdings erst nach einer etwas längeren Rührzeit. Mit  $\beta=1,0$  konnte ein P-Fällungsgrad von ca. 90% erreicht werden. Dafür musste jedoch mehr als eine Stunde gerührt werden. Verglichen mit dem technische MgO konnte mit dem bei Amazon gekauften MgO bei einem niedrigeren  $\beta$ -Wert und einer kürzeren Rührzeit eine bessere P-Fällung erreicht werden. Daraus lässt sich schließen, dass die Auswahl des MgO eine wichtige Rolle bei der Effektivität der Fällung spielt.

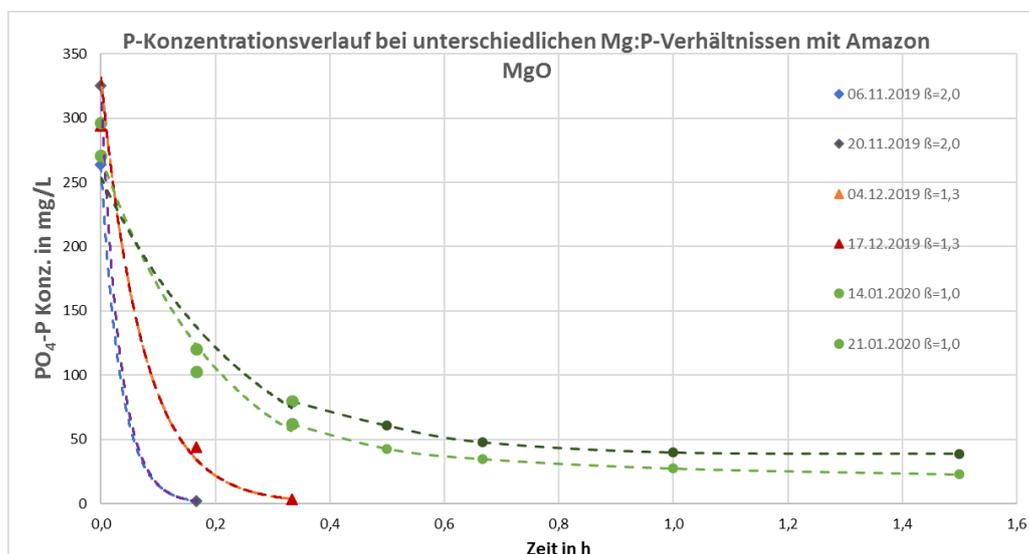


Abbildung 13: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichem molarem Verhältnis Mg:P ( $\beta$ -Wert), mit schneller Zugabe vom Amazon MgO in Suspension und einer Rührerdrehzahl von 78 rpm

Basierend auf den oben genannten Ergebnissen wurden folgende Bedingungen für den weiteren Betrieb des MAP-Reaktors am Reinighof definiert:

- Auswahl eines leichten MgO, das vorgetestet werden muss
- Schnelle Zugabe als Suspension
- Überdosierung von MgO im Bereich von  $\beta=1,3-1,5$
- Rührgeschwindigkeit 78 U/min und Rührzeit 1,5 h

### 3.2.4 Begleitende Laborversuche

Von Juli bis September 2019 wurden begleitende Versuche unter den in Tabelle 8 aufgeführten Randbedingungen im 1 L - Becherglas im Labor durchgeführt, in denen noch weitere Magnesiumverbindungen als Fällmittel getestet wurden [26].

Tabelle 8: Randbedingungen der begleitenden Laborversuche [26]

| Mg-Quelle und Zugabestrategie | $\beta$ -Wert (Mg: P) | Rührerdrehzahl [rpm] |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|
| MgSO <sub>4</sub> -Lösung     | 1,3                   | 120                  |
| MgCl <sub>2</sub> -Lösung     |                       |                      |
| Labor-MgO-Suspension          |                       |                      |
| Tech. MgO-Suspension          |                       |                      |
| Labor-MgO-Pulver              |                       |                      |
| Tech. MgO-Pulver              |                       |                      |
| MgCl <sub>2</sub> -Lösung     | 1,0                   | 120                  |
|                               | 1,3                   |                      |
|                               | 1,5                   |                      |
| Tech. MgO-Suspension          | 1,0                   | 120                  |
|                               | 1,3                   |                      |
|                               | 1,5                   |                      |
| Tech. MgO-Suspension          | 1,3                   | 80                   |
|                               |                       | 120                  |
|                               |                       | 160                  |

In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass sich die P-Konzentrationsverläufe bei unterschiedlichen Mg-Quellen und Zugabestrategie deutlich unterscheiden. Bei den Versuchen mit einer MgSO<sub>4</sub> und MgCl<sub>2</sub> Lösung ist die MAP-Fällung innerhalb weniger Minuten abgeschlossen und erzielt einen P-Fällungsgrad von >99%. Während die P-Konzentrationsverläufe bei einer Zugabe von der Labor-MgO-Suspension und des Labor-MgO-Pulvers vergleichbar sind, verhalten sich das technische MgO-Pulver und dessen Suspension unterschiedlich. Bei den Versuchen mit der Labor-MgO-Suspension und dem Labor-MgO-Pulver ist ein maximaler P-Fällungsgrad von ca. 85% innerhalb von 30 Minuten erreichbar. Nach einer Zugabe von der technischen MgO-Suspension nimmt die P-Konzentration deutlich schneller ab, als nach Zugabe des technischen MgO-Pulvers und wesentlich langsamer als nach Zugabe der MgSO<sub>4</sub> und MgCl<sub>2</sub> Lösung, der Labor-MgO-Suspension oder des Labor-MgO-Pulvers. Bei 90 Minuten erreicht die technische MgO Suspension einen P-Fällungsgrad von >95%, das technische MgO-Pulver nur 72%.

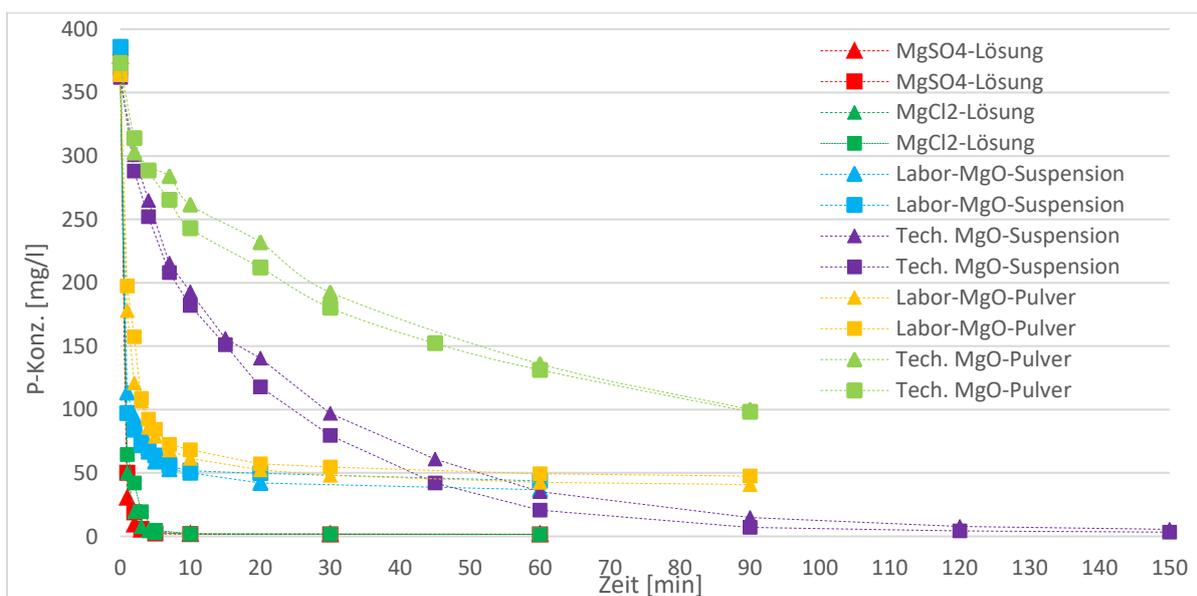


Abbildung 14: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlicher Mg-Quelle und Zugabestrategie (Rührerdrehzahl=120 rpm,  $\beta$ =1,3) [26]

In Abbildung 15 sind die P-Konz.-Verläufe hinsichtlich der molaren Verhältnisse von Mg:P ( $\beta$ -Wert) mit  $MgCl_2$  Lösung und der tech. MgO-Suspension dargestellt. Bei allen Versuchen mit  $MgCl_2$  Lösung erreicht der P-Fällungsgrad innerhalb von 10 Minuten einen Wert  $> 95\%$ . Bei  $\beta$ -Werten  $> 1$  kann der P-Fällungsgrad sogar  $99,5\%$  erreichen. Bei den Versuchen mit der tech. MgO Suspension überlappen sich die Kurven von  $\beta=1,3$  und  $\beta=1,5$ , bei denen die Reaktion schneller abläuft als bei  $\beta=1,0$ . Bei einer längeren Reaktionszeit von 3,5 Stunden beträgt der P-Fällungsgrad bei  $\beta=1,0$  75 bis  $80\%$ . Bei einer stöchiometrischen Überdosierung von  $\beta=1,3$  und  $\beta=1,5$  erreicht der P-Fällungsgrad über  $95\%$  bei einer Reaktionszeit von 1,5 Stunden. Dies kann durch einen „Verlust“ an aktivem MgO durch die Herstellung der Suspension erklärt werden, so dass der effektive  $\beta$ -Wert kleiner als der berechnete sein könnte.

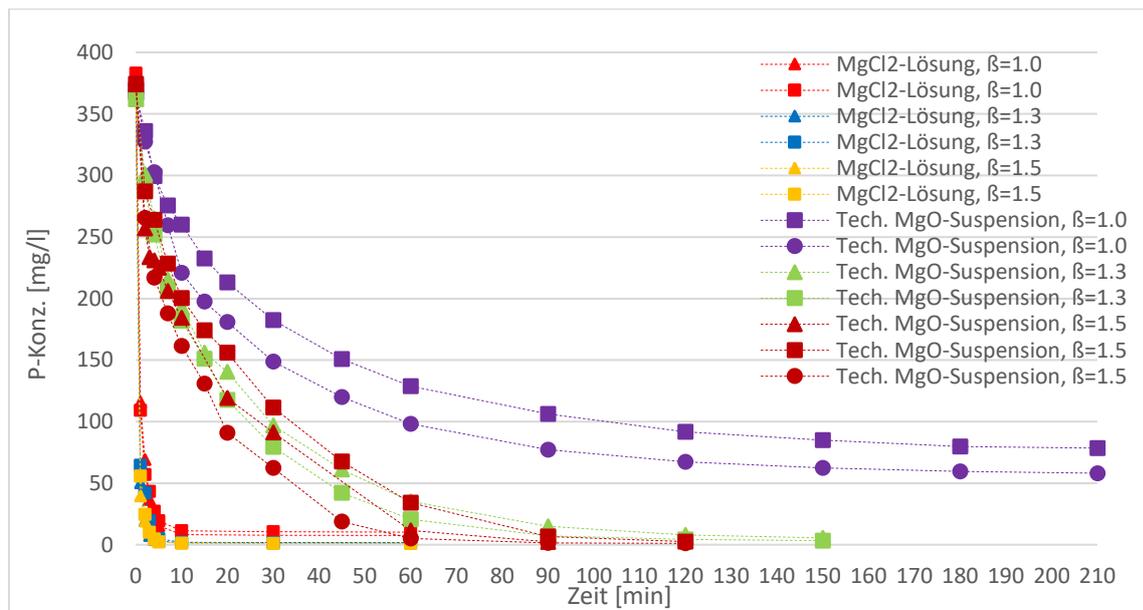


Abbildung 15: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlichen  $\beta$ -Werten ( $MgCl_2$ -Lösung und technisches MgO Suspension, jeweils mit Rührerdrehzahl=120 rpm) [26]

In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass die Rührergeschwindigkeit im Bereich von 80 bis 160 rpm keine Rolle beim P-Fällungsprozess spielt.

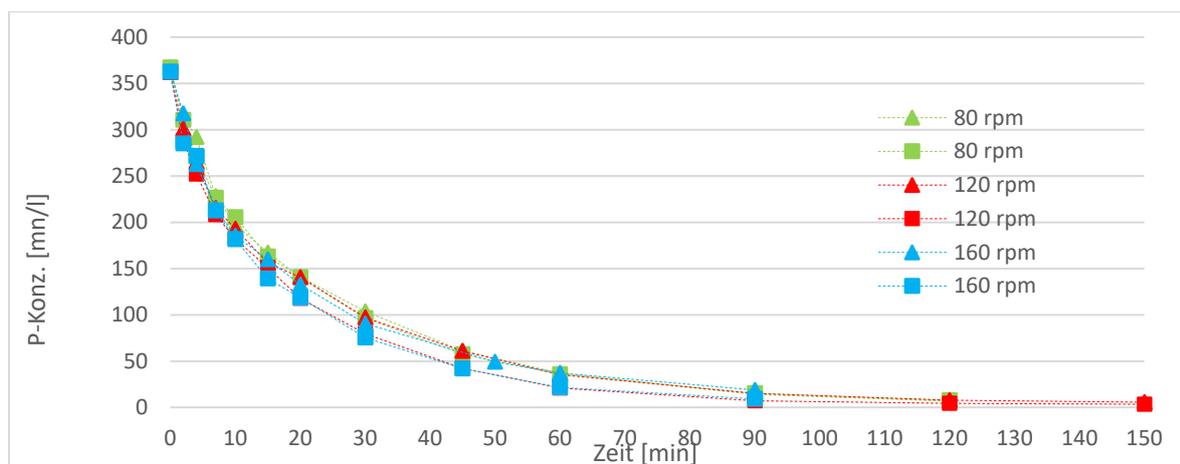


Abbildung 166: Verläufe der P-Konzentration im Überstand bei unterschiedlicher Rührerdrehzahl (technisches MgO in Suspension,  $\beta=1,3$ ) [26]

Mithilfe der Ergebnisse der begleitenden Laborversuche konnten die Betriebsbedingungen des großen MAP-Reaktors am Reinighof angepasst werden. Besonders hilfreich waren die Laborversuche bei der Auswahl der MgO-Zugabestrategie.

### 3.2.5 Schlussfolgerung und betriebliche Aspekte

Für den weiteren Betrieb des Reaktors nach Beendigung der Forschungsphase (ohne eine regelmäßige Analyse der P-Konzentration) wird eine festgelegte Mengenzugabe an MgO pro Charge empfohlen. Tabelle 9 zeigt das Mg:P Verhältnis in Abhängigkeit von den gemessenen Phosphorkonzentrationen im Urin bei unterschiedlichen MgO-Zugabemengen. Um ein Verhältnis über 1 aber unter 2 zu gewährleisten, kann eine Dosierung von 100 g MgO pro Füllung mit 160 L Urin empfohlen werden, was einem Mg:P-Verhältnis zwischen 1,2 und 1,9 entspricht. Bezogen auf die im Urin gemessene maximale bzw. minimale P-Konzentration entspricht das einem Mg:P-Verhältnis von 1,4 bei einer mittleren bzw. medianen P-Konzentration. Beim 70 %-Quantil der P-Konzentrationen liegt das Mg:P-Verhältnis zwischen 1,3 (bei hohen Konzentrationen) und 1,6 (bei niedrigen Konzentrationen), was weitgehend innerhalb des oben definierten bestgeeigneten Bereich von 1,3-1,5 (Kap. 3.2.3) liegt:

Tabelle 9: P-Konzentrationen im Urin und daraus abgeleitetes Mg:P-Verhältnis bei verschiedenen MgO-Dosierungen.

| PO <sub>4</sub> -P Konz. von gelagertem Urin (mg/L) in 34 Urinproben von Nov.2018 bis Jan.2020 |     | Mg:P- Verhältnis in Abhängigkeit der MgO-Zugabemeng pro Charge von 160 L Urin |      |              |       |       |
|--|-----|---|------|--------------|-------|-------|
|  |     | 80 g  | 90 g | <b>100 g</b> | 110 g | 120 g |
| min.   | 256 | 1,5   | 1,7  | <b>1,9</b>   | 2,1   | 2,3   |
| 70%-lower  | 310 | 1,3   | 1,4  | <b>1,6</b>   | 1,7   | 2,0   |
| mittel   | 335 | 1,2   | 1,3  | <b>1,4</b>   | 1,6   | 1,7   |
| median   | 340 | 1,2   | 1,3  | <b>1,4</b>   | 1,6   | 1,7   |
| 70%-upper  | 370 | 1,0   | 1,2  | <b>1,3</b>   | 1,4   | 1,6   |
| max.   | 436 | 0,9   | 1,1  | <b>1,2</b>   | 1,2   | 1,3   |

Eine P-Rückgewinnung von über 90% ist somit bei einer einfachen (easy to go) Bedienung des MAP-Reaktors möglich. Der Betrieb der Urinbehandlung erfolgt diskontinuierlich, bei Erreichen eines bestimmten Füllstandes im Urinsammeltank. Die Speicherung im Urinlagertank sorgt für eine ausreichende Verweilzeit und ein geeignetes Mischungsverhältnis von frischem und gelagertem Urin, weshalb der pH-Wert im Urinlagertank bei ca. 9 liegt und kein Bedarf an einer Zudosierung von Chemikalien zur pH-Einstellung für die MAP-Fällung besteht. Der Betrieb ist alle 1-2 Wochen von den BewohnerInnen des Reinighofs als Anlagebetreiber durchzuführen.

Geeignete Betriebsbedingungen wie die Art der Mg-Quelle, die Zugabemenge und -strategie, die Rührgeschwindigkeit sowie die Reaktions- und Sedimentationszeit wurden während der wissenschaftlichen Begleitphase durch die TU Kaiserslautern erforscht. Das auf Amazon erhältliche MgO Light wird für den weiteren Betrieb des MAP-Reaktors am Reinighof empfohlen. Nach der Auswahl der MgO-Quelle kann der MAP-Reaktor ohne Analysegeräte und Kontrollaufwand einfach von angeleiteten Personen betrieben werden. Folgende Arbeiten müssen durchgeführt werden:

1. gelagerten Urin in den MAP-Reaktor pumpen (160 L)
2. 100 g MgO in einem Liter Wasser suspendieren und die Suspension schnell in den MAP-Reaktor hineingeben
3. nach 1,5 h Rührzeit und 16-24 h Sedimentationszeit kann das ausgefällte MAP in einem Filtersack gesammelt werden
4. Der Filtersack ist mit Leitungswasser zu waschen und an der Luft zu trocken

Mit diesen einfachen Arbeitsschritten können meist deutlich über 90 % des Phosphors aus dem Urin zurückgewonnen werden. Der Urinüberstand nach der MAP-Fällung fließt in freiem Gefälle zum Spezialbodenfilter für eine Nitrifikation.

### 3.3 Betrieb und Bewertung des Spezialbodenfilters

#### 3.3.1 Betrieb des Spezialbodenfilters

##### 3.3.1.1 Beaufschlagungen

Der Spezialbodenfilter dient der Reinigung des aus dem MAP-Reaktor abfließenden Urinüberstandes und wurde zwischen dem 16.11.2018 und dem 21.01.2020 nach jeder MAP-Fällung insgesamt 38-mal mit ca. 160 L beaufschlagt. 34-mal wurden Proben vom Ablauf des Spezialbodenfilters entnommen und analysiert. Das kürzeste Intervall zwischen den Beschickungen betrug einen Tag, das längste 15 Tage. Pro Beaufschlagung war die hydraulische Belastung also immer gleich. Umgerechnet auf die hydraulische Belastung pro Tag ergeben sich allerdings aufgrund der variierenden Zeitintervalle erhebliche Unterschiede. Die hydraulische Belastung liegt aber weit unter den nach DWA-A 262 (2017) [12] zugelassenen 80 mm/d.

Anhand der Quadrate (siehe Kap. 2.5.2, Abbildung 7) wurde die Benetzung der Filteroberfläche kontrolliert. In der Anfangszeit wurde aufgrund ungleichmäßiger Verteilung des Abwassers die Oberfläche des Filterbeetes nochmal eingeebnet und der Prallteller etwas mehr in die Mitte verlegt. Hierdurch erfolgte die Verteilung des Abwassers gleichmäßiger auf der gesamten Oberfläche. Zu Beginn war die benetzte Filteroberfläche etwas geringer und stieg nach der oben erwähnten Maßnahme an. Die Benetzung lag zwischen 0,9 m<sup>2</sup> im trockenen August und 3,9 m<sup>2</sup> an mehreren anderen Terminen. Nur an 5 Terminen waren weniger als 75 % der Fläche benetzt, an 19 Terminen mehr als 75 %. Es wurde also ein Großteil des Filterkörpers zur Reinigung des Urinüberstands genutzt.

#### 3.3.2 Probenahme und Messwerte

Es erfolgten jeweils zwei Probenahmen nach jeder Beschickung, eine direkt nach ca. 30 Minuten (Probe 3a) und eine „Probenahme spät“ (Probe 3b) zwischen 45 und 200 min nach der Beschickung. Da sich das Abwasser auf der Oberfläche des Spezialbodenfilters verteilte und dann vertikal durch den Boden sickerte, wurde das noch im Bodenfilter befindliche Haftwasser verdrängt. Durch die zeitlich verzögerte Probenahme wurden so verschiedene „Mischungsverhältnisse“ des abfließenden Wassers beprobt und die Reinigungsleistung des Bodenfilters kann genauer erfasst werden. Probe 3a und Probe 3b wurde gemäß des in Tabelle 5: Probennahme während des untersuchten Betriebszeitraumes dargestellten Probenplans analysiert. In den Bodenfilter wurden zwei Messsonden der Firma EcoTech eingebaut, wodurch alle 2 Minuten Werte für den pH-Wert und das Redox-Potenzial gemessen und aufgezeichnet wurden.

#### 3.3.3 Auswertung der Messdaten

##### 3.3.3.1 pH-Wert

Die pH-Werte im Ablauf des SBF zeigten über den Projektzeitraum eine fallende Tendenz (Abbildung 17). Der pH-Wert des Ablaufs des Spezialbodenfilters direkt nach der Beschickung lag in der Regel tiefer als der „Ablauf spät“. Dies lag daran, dass zuerst das im Boden befindliche Haftwasser verdrängt wurde. Dieses wies durch die längere Aufenthaltszeit einen niedrigeren NH<sub>4</sub>-N-Gehalt auf als die später gezogene Probe, da bei der Nitrifikation von Ammonium zu Nitrat Protonen entstehen, die den pH-Wert senken. Entsprechend wies die später gezogene Probe (kürzere Zeitspanne zur letzten Beschickung mit Überstand (pH-Wert ca. 9) noch einen höheren pH-Wert und höhere Ammoniumwerte auf. Zu diesen durch die Nitrifikation bedingten unterschiedlichen pH-Werten kommt noch die mögliche Verdünnung der zuerst gezogenen Probe durch auf den SBF fallenden Niederschlag zwischen den Probenahmen hinzu. Dadurch kam es zu Schwankungen im Bereich pH 6,6 bis 7,7. Im weiteren Reinigungsverlauf stabilisierte sich der pH-Wert wieder und lag im Ablauf der PKA während des Probenahmezeitraums relativ gleichmäßig zwischen 7,4 und 7,6.

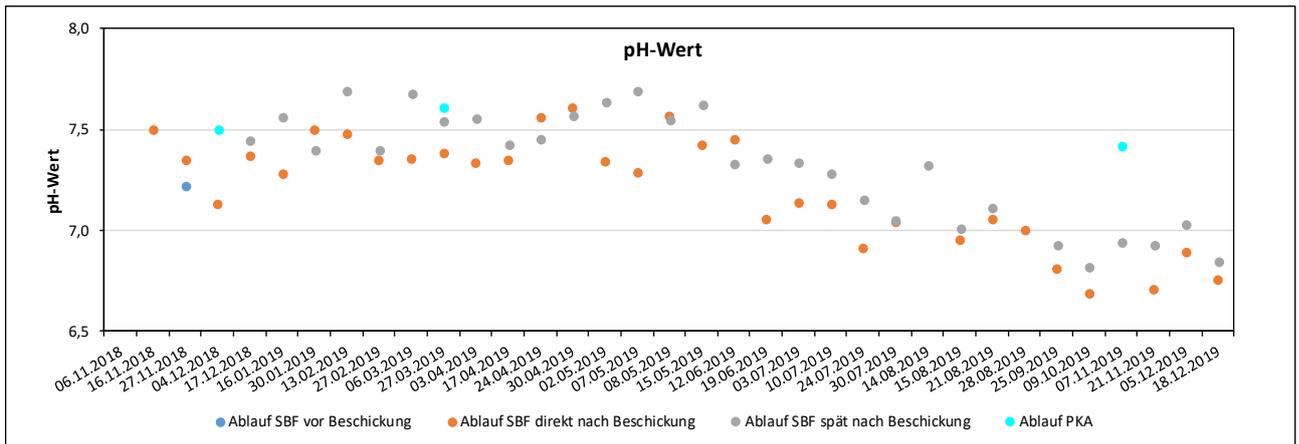


Abbildung 17: pH-Wert im Ablauf des SBF und der Grauwasser-PKA

### 3.3.3.3 Redox-Potential

Das Redoxpotential ist ein wichtiger Parameter, über den auf die Sauerstoffversorgung im Boden Rückschlüsse gezogen werden können. Je höher das Redoxpotential, desto oxidativer ist das System, alkalische Werte senken das Potenzial, saure lassen es steigen. Ein positives Redoxpotential ist für viele bakteriologisch katalysierte Reaktionen wichtig. So kann z.B. die Nitrifikation bereits bei einem Redoxpotential  $< +350$  mV gehemmt werden, während andere Reaktionen gefördert werden, wie die Reduktion von  $\text{SO}_4$  zu  $\text{H}_2\text{S}$  ab einem Redoxpotential  $< -125$  mV [15]. Im SBF sank das Redoxpotential durch die Beaufschlagung des Urinüberstandes kurzfristig stark ab und erreichte negative Werte, stieg dann aber relativ schnell wieder an und blieb zwischen den Beaufschlagungen i.d.R. auf einem Niveau von über 180 mV bei Sonde 1 bzw. über 230 bei Sonde 2 (Abbildung 18).

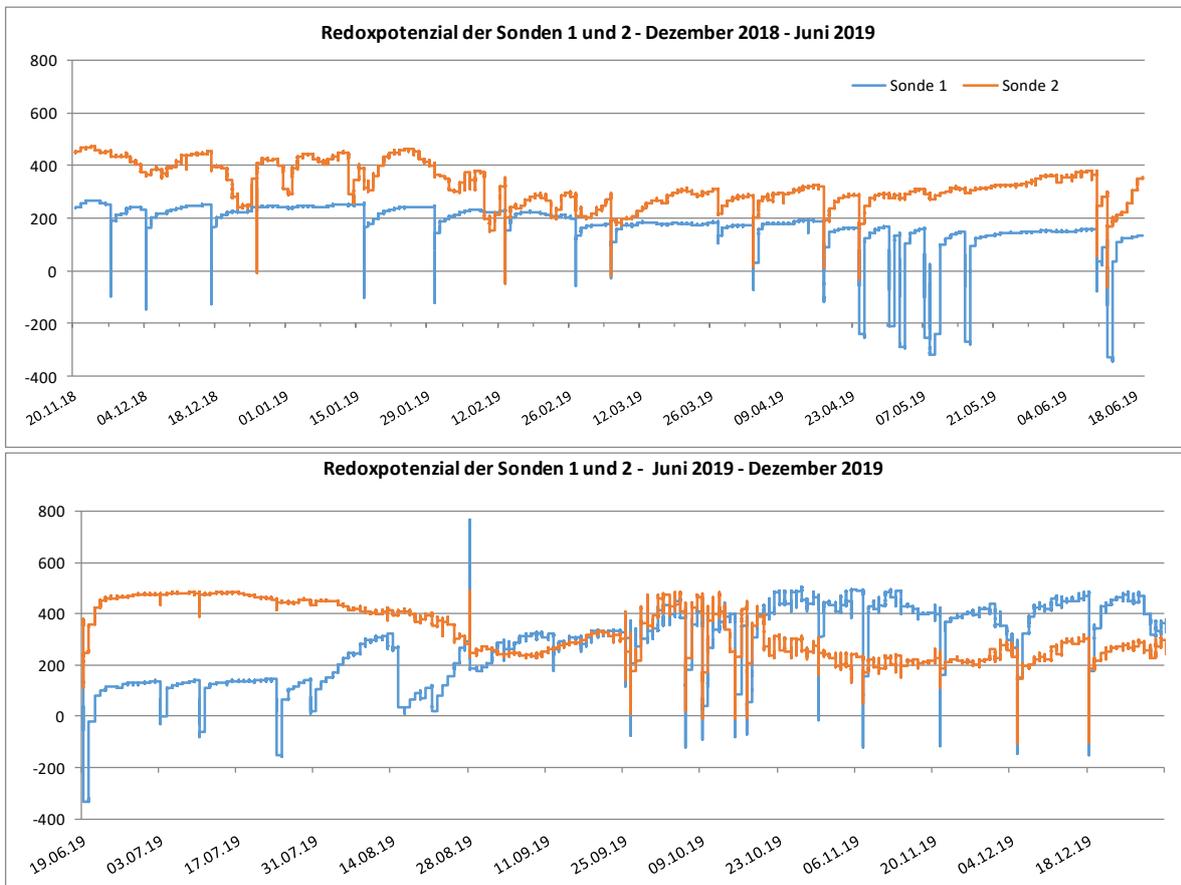


Abbildung 18: Redoxpotential im SBFs

### 3.3.3.4 Ammonium-Stickstoff

Die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Urinüberstand und damit im Zulauf des SBF war mit Werten zwischen 3123 und 5286 mg/L sehr hoch (Abbildung 19). Dies entspricht einer spezifischen Flächenbelastung von ca. 117 bzw. 198 g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^2$  am Tag der Beschickung.

Im Ablauf des SBF war die Konzentration zwar erheblich niedriger, lag aber bei der Beprobung „direkt nach Beschickung“ immer noch zwischen 0,3 und 874 mg/L und bei der Beprobung „spät“ zwischen 21 und 995 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$ .

Die niedrigsten Ablaufkonzentrationen wurden zu Beginn des Betriebs gemessen. Die Ablaufwerte im Ablauf des SBF lagen zwischen Nov. 2018 und Anfang April 2019 zwischen 0,3 und 255 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Zu diesem Zeitpunkt wurde der beaufschlagte Urinüberstand einerseits noch mit dem im Boden befindlichen Haftwasser verdünnt und andererseits wurde das  $\text{NH}_4\text{-N}$  durch die hohe Kationenaustausch-Kapazität des zeolithenhaltigen Lavasands im Boden gebunden. Diese erschöpfte sich aber im Laufe der Zeit, was die trotz zunehmender Nitrifikation ab Mai 2019 steigenden Ablaufwerte erklärt. Der höchste Ablaufwert bei der Probenahme spät wurde am 24.07.2019 mit 995 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$  gemessen (Abbildung 19).

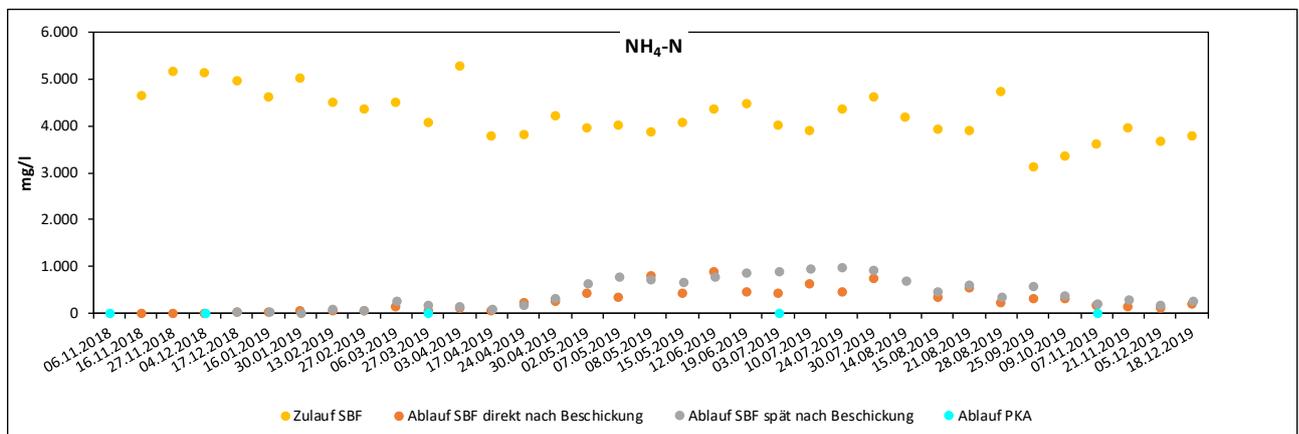


Abbildung 19:  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Zu- und Ablauf des SBF und der Grauwasser-PKA

Der Verlauf der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration passt zu dem Verlauf des pH-Wertes. Wie im Kap. 3.3.3.1 bereits erwähnt, sinkt bei der Nitrifikation der pH-Wert. Da unmittelbar nach der Beschickung das im Boden befindliche Haftwasser verdrängt wurde, das seit der vorher gegangenen Probenahme eine längere Aufenthaltsdauer und damit eine niedrigere  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration aufwies, war auch der pH-Wert geringer. Die später gezogene Probe mit einer kürzeren Aufenthaltszeit wies dagegen einen höheren pH-Wert und höhere Ammoniumwerte auf.

Die drei gemessenen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte der Grauwasser-PKA in der Versuchsphase lagen zwischen 0,1 und 0,8 mg/L. Weitere Messwerte werden im Kap.4.1.1 zusammengestellt.

### 3.3.3.5 Nitrat-Stickstoff

$\text{NO}_3\text{-N}$  wurde sowohl direkt nach der Beschickung als auch bei der späten Probenahme im Ablauf des SBF gemessen. Im Zulauf des SBF lagen die Konzentrationen unter 2,3 mg/L, so dass auf eine regelmäßige Kontrolle an dieser Stelle verzichtet wurde. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen lagen im Ablauf des SBF bei der Beprobung direkt nach der Beschickung zwischen 3,3 und 2918 mg/L bzw. bei der späten Beprobung zwischen 2,6 und 2501 mg/L. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen lag von November 2018 bis Anfang April 2019 unter 10 mg/L, bis Anfang Mai unter 100 mg/L. Danach stiegen die Werte bis Mitte September auf über 2000 mg/L an, der Maximalwert lag bei 2.500 mg/L (Abbildung 20).

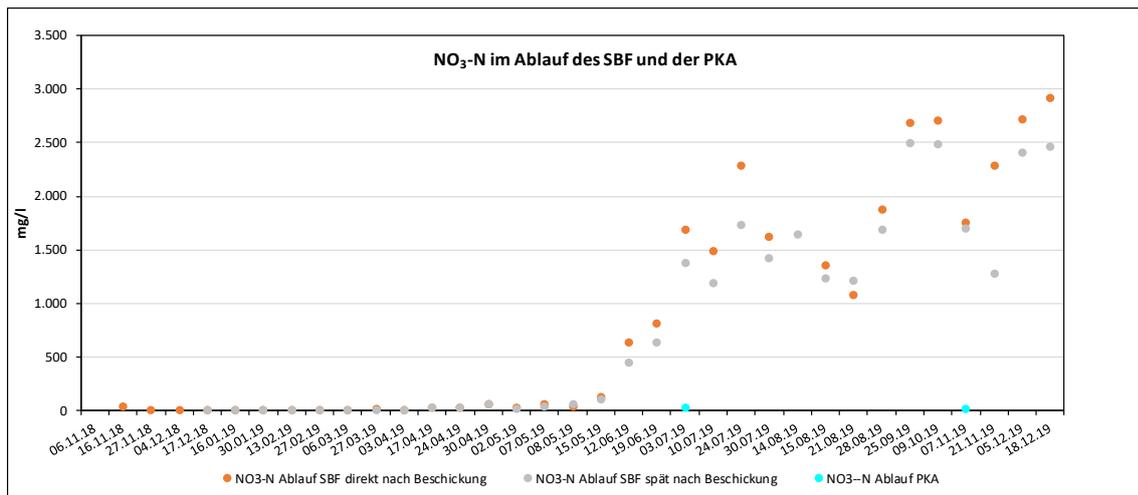


Abbildung 20:  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Ablauf des SBF bei der direkten und der späten Probenahme

Mit zunehmender Aufenthaltsdauer des Wassers im SBF wird mehr  $\text{NH}_4\text{-N}$  im Rahmen der Nitrifikation zu Nitrat oxidiert. Deswegen sind die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im SBF-Ablauf bei der Probenahme direkt nach der Beschickung niedriger als bei der späteren Beprobung, bei den  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen ist es genau umgekehrt: Bei der direkten Probenahme lagen die Konzentrationen höher, da es sich hauptsächlich um aus dem Boden verdrängtes Wasser mit langer Aufenthaltsdauer handelt, bei der späteren Beprobung niedriger.

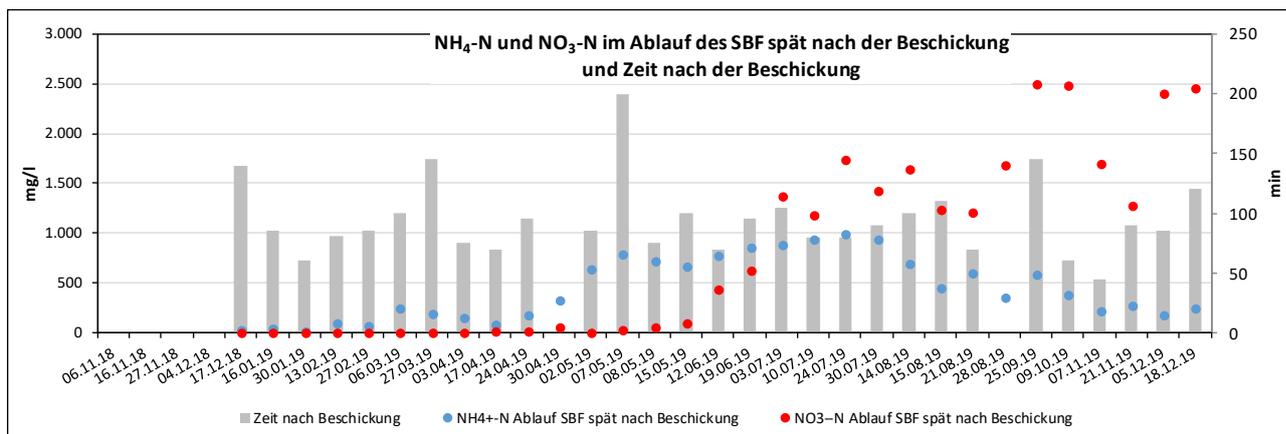


Abbildung 21:  $\text{NH}_4\text{-N}$ - und  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen bei der Probenahme „spät nach Beschickung“

Der Verlauf der  $\text{NH}_4\text{-N}$ - Konzentrationen in Zusammenhang mit den  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen (Abbildung 21) zeigt außerdem, dass es mehr als 6 Monate gedauert hat, bis sich die Nitrifikanten im SBF etablieren konnten. Die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen lagen bis Mitte April 2019 sehr niedrig und stiegen dann langsam an. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen blieben aber bis Mitte Mai niedrig und stiegen erst Mitte Juni 2019 sprunghaft an. Da aber bereits ab April ausreichend hohe Wassertemperaturen für eine Nitrifikation erreicht wurden, deutet dies daraufhin, dass weniger  $\text{NH}_4\text{-N}$  im Boden durch nachlassende Kationenaustauschkapazität gebunden werden konnte und die Nitrifikation erst ab Mitte Juni vollständig etabliert war.

Die zwei gemessenen  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Ablaufwerte der Grauwasser-PKA in der Versuchsphase lagen zwischen 20,2 und 31,8 mg/L. Weitere Messwerte werden im Kap.4.1.1 zusammengestellt.

### 3.3.3.6 Gesamtstickstoff

Die  $N_{ges}$ -Konzentrationen im Urinüberstand, von denen Ammoniumstickstoff 97% ausmachte, waren sehr hoch und lagen zwischen 5515 bei der ersten Probenahme und 3256 mg/L  $N_{ges}$  im April 2019 (Abbildung 22). Die  $N_{ges}$ -Konzentrationen bei der direkten Beprobung im Ablauf des SBFs lagen zwischen 6,4 und 3255, bei der späten Probenahme zwischen ca. 53 und 3310 mg/L  $N_{ges}$ . Wie beim  $NO_3-N$  stiegen die Konzentrationen nach anfangs niedrigem Wert ab Mai 2019 stark an, bis sie ab Spätsommer 2019 - wie die Zulaufkonzentrationen zum SBF - wieder etwas absanken.

Die  $N_{ges}$ -Konzentrationen wurden im weiteren Reinigungsverlauf in der Vorklärung verdünnt, so dass das Gesamtsystem diese hohen Konzentrationen verkräften konnte. Die an drei Tagen gemessenen  $N_{ges}$ -Ablaufkonzentrationen der Grauwasser-PKA in der Versuchsphase lagen zwischen 13,6 und 33,9 mg/L  $N_{ges}$ . Weitere Messwerte werden im Kap.4.1.1 zusammengestellt.

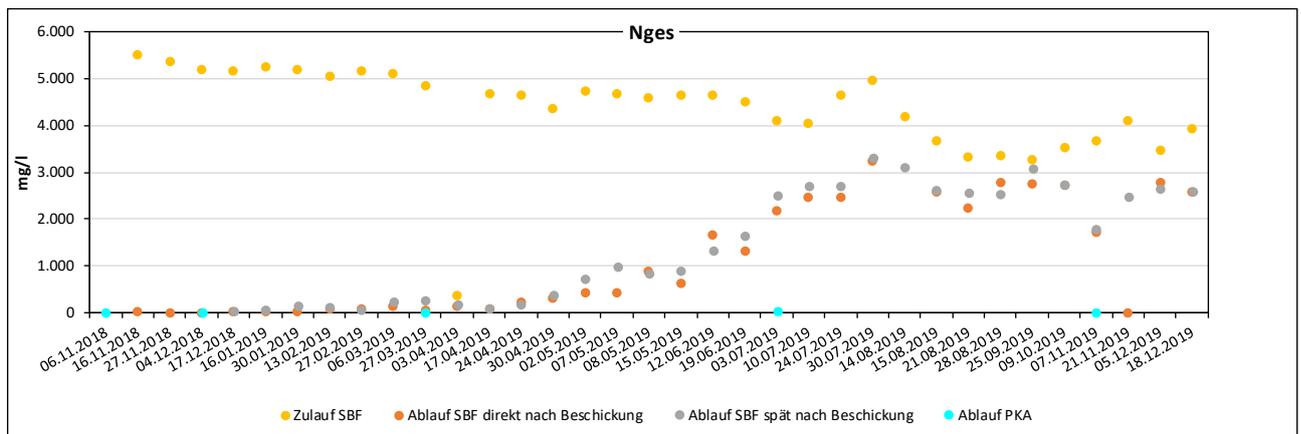


Abbildung 22:  $N_{ges}$ -Konzentrationen im Zulauf sowie im Ablauf des SBFs und der PKA

### 3.3.3.7 Gesamt-Phosphor

Im Ablauf des SBFs lagen die  $P_{ges}$ -Konzentrationen bei der direkten Beprobung trotz zeitweise hoher Zulaufkonzentrationen zwischen kleiner 0,043 mg/L (unterhalb der Bestimmungsgrenze) und 2,5 mg/L, bei der späten Beprobung ebenfalls zwischen < 0,043 und 1,3 mg/L (Abbildung 23).

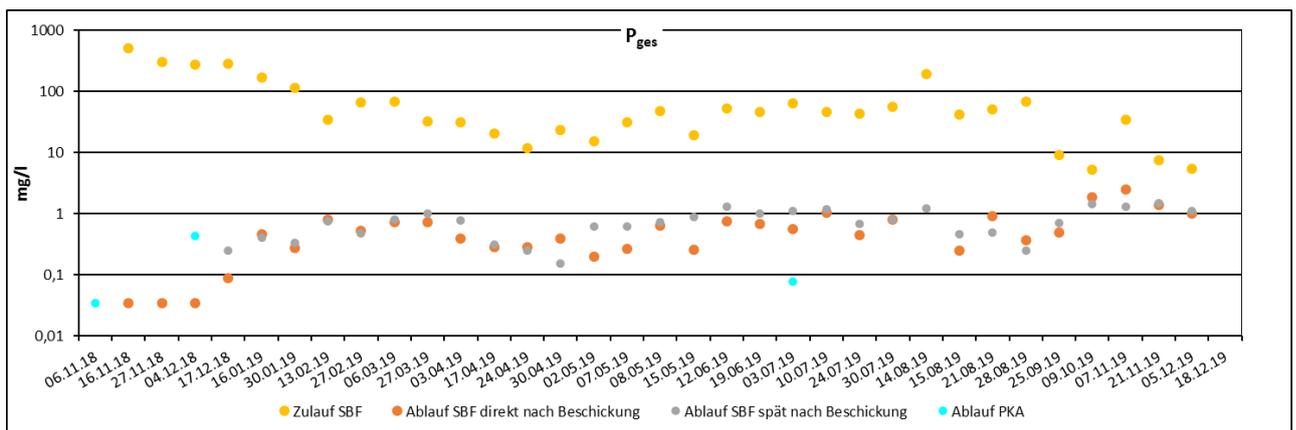


Abbildung 23:  $P_{ges}$ -Konzentrationen im Zulauf sowie im Ablauf des SBFs und der PKA

Die drei gemessenen  $P_{ges}$ -Ablaufkonzentrationen der Grauwasser-PKA lagen einmal unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,043 mg/L, bei 0,08 mg/L und bei 0,44 mg/L  $P_{ges}$ , insgesamt also sehr gute Ablaufwerte.

### 3.3.4 Beaufschlagte Fracht

Die Bemessung des Bodenfilters erfolgte anhand der zu erwartenden Stickstoff-Fracht (vgl. Kap.2.5.1). Es wurde aufgrund der zugrunde gelegten 16 EW von einer Fracht von 176 g N/d ausgegangen. Dies entspricht knapp 43 g N/(m<sup>2</sup>\*d) bei der gewählten SBF-Oberfläche von 4 m<sup>2</sup>.

Die tatsächlichen Frachten pro Beschickung lagen aber aufgrund dessen, dass die Fracht von mehreren Tagen mit einer Beschickung aufgebracht wurde, wesentlich höher als die umgerechneten Tagesfrachten. Die Frachten pro Beschickung lagen beispielsweise für N<sub>ges</sub> zwischen 130,6 und 220,6 g N/m<sup>2</sup>, umgerechnet auf die Anzahl der Tage bis zur nächsten Beschickung sind dies allerdings nur Frachten von 20,5 und 9,33 g N/(m<sup>2</sup>\*d).

Die höchste Tagesfracht für N<sub>ges</sub> fiel am 07.05.2019 mit knapp 200 g/(m<sup>2</sup>\*d) an, denn der SBF wurde bereits am 08.05.2019 erneut beschickt. Die geringste Tagesfracht wurde für den 03.04.2019 berechnet, sie betrug 1,02 g/(m<sup>2</sup>\*d), der SBF wurde erst 14 Tage später das nächste Mal beschickt.

Nur an drei Tagen lag die berechnete N<sub>ges</sub>-Tagesfracht über den der Bemessung zugrunde gelegten 43 g/(m<sup>2</sup>\*d), bei den übrigen Beschickungen lagen die Tagesfrachten deutlich darunter, an 19 Tagen sogar unter 20 g/(m<sup>2</sup>\*d).

Dieses Beispiel zeigt, dass die umgerechneten Tagesfrachten von drei Faktoren abhängen:

- der Konzentration im Urinüberstand und damit im Zulauf des SBFs,
- der daraus errechneten Fracht pro Beschickung, wobei die Abwassermenge relativ konstant bei 160 L liegt,
- der Anzahl der Tage bis zur nächsten Beschickung.

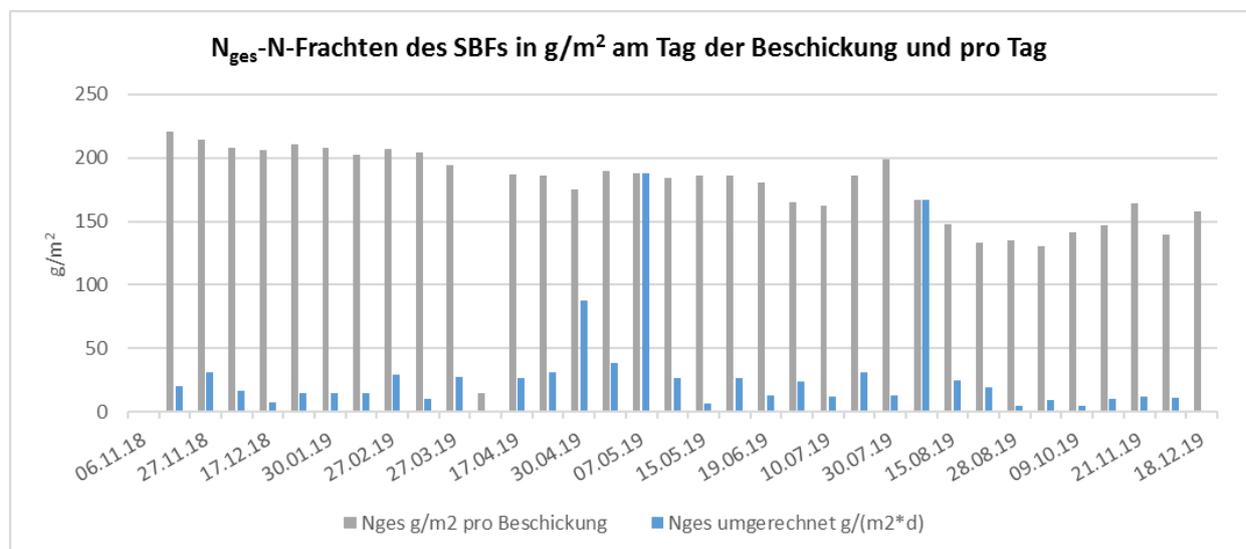


Abbildung 24: Nges-Frachten pro Beschickung und berechnete Tagesfrachten

### 3.3.5 Schlussfolgerung und betriebliche Aspekte

Der Spezialbodenfilter (SBF) verringerte im Untersuchungszeitraum die hohen Ammoniumkonzentrationen und -frachten aus dem MAP-Überstand gut bis sehr gut. Zwar zeigte der Ablauf des SBFs immer noch hohe Stickstoffkonzentrationen, doch wurden diese in der Vorklärung der Grauwasser-PKA stark verdünnt und bei der Passage durch die Grauwasser-PKA teilweise weiter vermindert, so dass eine Reduktion von Ammoniumstickstoff um fast 100 Prozent erfolgte. Die Ablaufwerte der Grauwasser-PKA waren während der Projektlaufzeit bezogen auf die Parameter Ammonium, CSB und Phosphor sehr gut, lagen stets unter NH<sub>4</sub>-N < 0,74 mg/L, CSB < 10 mg/L, PO<sub>4</sub>-P

$<0,1 \text{ mg/L}$ ,  $P_{\text{ges}} < 0,44 \text{ mg/L}$ . Eine Beeinträchtigung durch die Einbringung des Urinüberstands in das System erfolgte nicht.

Die gewählte Auslegung von  $4 \text{ m}^2$  Fläche für den SBF für den Urin von 16 Einwohnern ( $0,25 \text{ m}^2/\text{E}$ ) bzw. im Minimalbetrieb mit 8 Einwohnern  $0,5 \text{ m}^2/\text{E}$  hat sich somit bewährt. Um ein Durchschlagen von Ammoniumspitzen zu vermeiden ist der SBF zwischen MAP-Fällung und Grauwasser-PKA sehr gut geeignet. Kurzzeitige Spitzen, die die spezifische Beaufschlagung an einzelnen Tagen übersteigen, werden gut abgefangen.

Bei zukünftigen Planungen sollte berücksichtigt werden, dass während der Beaufschlagung des SBFs mit dem Urinüberstand kurzfristig eine starke Geruchsbelästigung erfolgt. Es empfiehlt sich, einen entsprechenden Abstand zu geruchssensiblen Nutzungen zu halten.

Speziell für das Projekt Reinighof werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Da die **Grauwasser-PKA** auf 16 EW ausgelegt ist, sollte dies bei der weiteren Entwicklung des Reinighofs berücksichtigt werden. Sollten dauerhaft mehr Bewohner und Gäste auf dem Hof sein, sollte bei Verschlechterung der Ablaufwerte die Bemessung und Auslegung der einzelnen Systemkomponenten entsprechend angepasst werden. Dies verhindert sowohl eine hydraulische als auch eine stoffliche Überlastung der Bodenfilter, besonders der Grauwasser-PKA.
- Aufgrund der geringen Größe des **SBFs** könnte bei erhöhter Belastung oder nachlassender Kationenaustauschkapazität bei Bedarf mit wenig Aufwand das Filtersubstrat erneuert werden. So müsste nicht eine größere Fläche zur Verfügung gestellt werden.
- Zur Vorklärung des Grauwassers wird eine **Mehrkammergrube** eingesetzt. Die Bemessungsgrundlagen nach DWA-A 272 (2014) [21] und DWA-A 262 (2014) [27] gaben bei 16 EW eine Mindestgröße von  $7,5 \text{ m}^3$  vor, gewählt wurden  $9,3 \text{ m}^3$ . Im neuen DWA-A 262 (2017) [28] wurde das vorgeschriebene Volumen für die Vorklärung wesentlich verkleinert (nur noch  $300 \text{ L}/\text{EW}$ ). Erstmals wurde auch der Grauwasseranfall pro EW/Tag mit  $75 \text{ L}$  definiert. Hierdurch ergibt sich, dass an die Vorklärung wesentlich mehr EW angeschlossen werden könnten und hier eine erhebliche Lastreserve für den Reinighof besteht.
- Der **Ablauf des SBFs** sollte regelmäßig, mindestens zweimal im Jahr auf die Stickstoffparameter und Phosphor beprobt werden, um frühzeitig zu erkennen, ob die Reinigungskapazität nachlässt. So können rechtzeitig Maßnahmen ergriffen werden, damit die nachgeschaltete Grauwasser-PKA nicht beeinträchtigt wird. Bei z.B. steigenden P-Ablaufkonzentrationen kann ein Austausch des Filtermaterials erforderlich werden.
- Ebenso sollte der **Ablauf der Grauwasser-PKA** regelmäßig beprobt werden. Am besten wäre eine zeitversetzte Beprobung, also z. B. den SBF kurz nach der Beschickung und 24 und 48 Stunden später den Ablauf der Grauwasser-PKA zu beproben, da die erhöhte Fracht erst zeitverzögert zu erwarten ist. Zu prüfen ist, ob weiterhin niedrige P-Ablaufwerte erzielt werden, da hohe Phosphorkonzentrationen im nachgeschalteten Verdunstungsteich zu enormem Algenwachstum und damit zeitversetzt zu Sauerstoffmangel führen können.
- **Neubepflanzung des SBFs**, bevorzugt mit salzverträglichen Pflanzen, z. B.
  - Queller (*Salicornia europaea agg.*)
  - Meerstrandbinse (*Juncus maritimus*)
  - Strand-Milchkraut (*Glaux maritima*)
  - Strand-Sechszack (*Triglochin maritima*)
  - Meerstrandwegerich (*Plantago maritima*)
  - Salzaster oder Meerstrandaster (*Aster tripolium*)

## 3.4 Betrieb und Bewertung der Fäzeskompostierung

### 3.4.1 Betrieb der Fäzeskompostierung

Am Reinighof wurde keine automatisierte Befüllung der Kompostanlage umgesetzt. Der Fäzestransport und die Befüllung der Kompostanlagen erfolgt manuell.

Zur Überwachung der Temperatur in den Schnellkompostern sind Temperatursensoren (Einsteckfühler) angebracht. Die jeweilige Temperatur lässt sich am Display ablesen und wird auf einer Speicherkarte aufgezeichnet und wurde von der TUK in regelmäßigen Abständen ausgewertet. Die Temperaturfühler in der Kompostmasse müssen vor Arbeiten an den Schnellkompostern aus der Kompostmasse entnommen werden und anschließend wieder an derselben Stelle in den Kompost gesteckt werden.

Die Feuchte des Kompostmaterials lässt sich händisch überprüfen. Man nimmt eine Hand voll Kompost und drückt ihn mit der Faust zusammen:

- Wasser tritt aus Kompost aus → zu feucht
- Der Kompost zerfällt krümelig → zu trocken
- Der Kompost ist klebrig und formstabil → genügend feucht

Hinweis: Bei der Feuchteüberprüfung unbedingt Handschuhe tragen!

### 3.4.2. Einfahrphase der Fäzeskompostierung

Vom 11.01.2018 bis 10.03.2019 wurde die Schnellkomposter nach und nach (entsprechend dem Fäzesanfall in den Trockentrenntoiletten) befüllt. Dabei wurde gemäß den Hinweisen des Herstellers vorgegangen. Vor der ersten Befüllung der Schnellkomposter sollten nach Empfehlung des Herstellers ca. 5 cm möglichst grobes Toilettenstreumaterial in den Komposter gegeben werden. Zwischen jeder Schicht einer Befüllung sollte eine Schicht Strukturmaterial (Strauchschnitt, kleine Stöcke) und soweit vorhanden Grasschnitt hinzugegeben werden. Sollte die Kompostmasse bzw. die hinzugegebenen Fäzes sehr trocken erscheinen, können Grasschnitt oder auch geringe Mengen Wasser hinzugegeben und untergemischt werden. Ist ein Schnellkomposter vollständig gefüllt, sollen für die folgenden 6 Wochen (minimal) bis zur Entleerung keine weiteren Fäzes hinzugegeben werden.

Da für den Kompostierungsprozess und eine größtmögliche Wärmeentwicklung Sauerstoff in der Kompostmasse erforderlich ist, sollte die Belüftungsöffnung möglichst weit geöffnet sein. Sinkt im Winter die Temperatur im Schnellkomposter, sollte die Belüftung jedoch nach Empfehlung des Herstellers verringert werden. Das Material im Schnellkomposter sollte einmal die Woche mithilfe eines Belüftungsstabes gelockert werden, um ausreichend Sauerstoff einzutragen. Bei einer sehr dichten Kompostmasse bzw. auch bei Auftreten von unangenehmen Gerüchen (Buttersäure, Schwefelwasserstoff, Ammoniak) sollte in kürzeren Abständen gelockert werden.

Der Inhalt der Schnellkomposter kann nach einer Mindestverweilzeit von 6 Wochen auf die offene Nachkompostierung gegeben werden. Sollte eine Entleerung der Schnellkomposter nicht notwendig sein, kann der Kompost auch länger im Schnellkomposter verbleiben und erst bei Bedarf auf die offene Nachkompostierung gegeben werden.

Abbildung 25 stellt die Temperaturentwicklung der ersten 3 Chargen in der Einfahrphase dar. Bei der 1. Charge der ersten Befüllung (18.10.2018-15.01.2019) wurde die Temperatur in Komposter 1 bis zur Befüllung des Komposters 2 (02.12.2018, grüne Dreiecke) mit zwei Messfühlern gemessen. Die Verläufe der zwei Messfühler in diesem Zeitraum liegen nah beieinander, was für die Zuverlässigkeit der Messwerte spricht. Ab der zweiten Befüllungsphase in Komposter 2 befinden sich die Messfühler in den jeweiligen Schnellkompostern.

Zu Beginn der Befüllung von Komposter 1 wurde bei Charge 1 Fäzes mit Heu geschichtete ( $V_{\text{Kompost}}: V_{\text{Heu}} \approx 1:0,2$ ). Bereits während der Befüllung sind Temperaturspitzen über  $50^\circ\text{C}$  aufgetreten. Nach Beendigung der Befüllung ( $V_{\text{Kompost}}: V_{\text{Heu}} \approx 1:0,2$ ) im Komposter 1 erreicht die Temperatur jedoch keine Werte mehr von über  $50^\circ\text{C}$ . Die Temperaturentwicklung während der Befüllung des Komposters 2 ist wesentlich geringer als während der ersten Befüllcharge. Dies ist vermutlich auf die niedrigere Lufttemperatur im Winter zurückzuführen.

Für die dritte Befüllcharge wurde der Inhalt des Komposters 1 entnommen und mit Heu wie auch Sägespänen geschichtet ( $V_{\text{Kompost}}: V_{\text{Heu}}: V_{\text{Späne}} \approx 1:0,2:0,1$ ). Anschließend wurde das Gemische wieder in Komposter 1 eingefüllt und weiter kompostiert. Die Temperatur in Komposter 1 erreichte dadurch Temperaturen von über  $60^\circ\text{C}$ , jedoch nur über einen Zeitraum von 2 d. Am 11.02.2019 wurde ebenfalls der Fäzeskompost aus Komposter 2 in den Komposter 1 umgeschichtet. Jedoch wurde der Kompost im Vorhinein mit Heu und Sägespänen vermischt ( $V_{\text{Kompost}}: V_{\text{Heu}}: V_{\text{Späne}} \approx 1:0,5:0,5$ ). Danach ist eine weitere Temperaturspitze von über  $60^\circ\text{C}$  zu sehen. Insgesamt lagen damit die Temperatur im Komposter 1 während der dritten Charge ca. 15 Tage über  $50^\circ\text{C}$ , wodurch die Anforderungen gemäß BioAbfV [22] und EcoSanRes [23] eingehalten wurden. Um auch zukünftig einen entsprechend langen Zeitraum mit Temperaturen über  $50^\circ\text{C}$  zu erzielen, wurde aus den Ergebnissen der Einfahrphase ein neues Bedienungskonzept für die Schnellkompostierung entwickelt (siehe Kapitel 3.5.2).

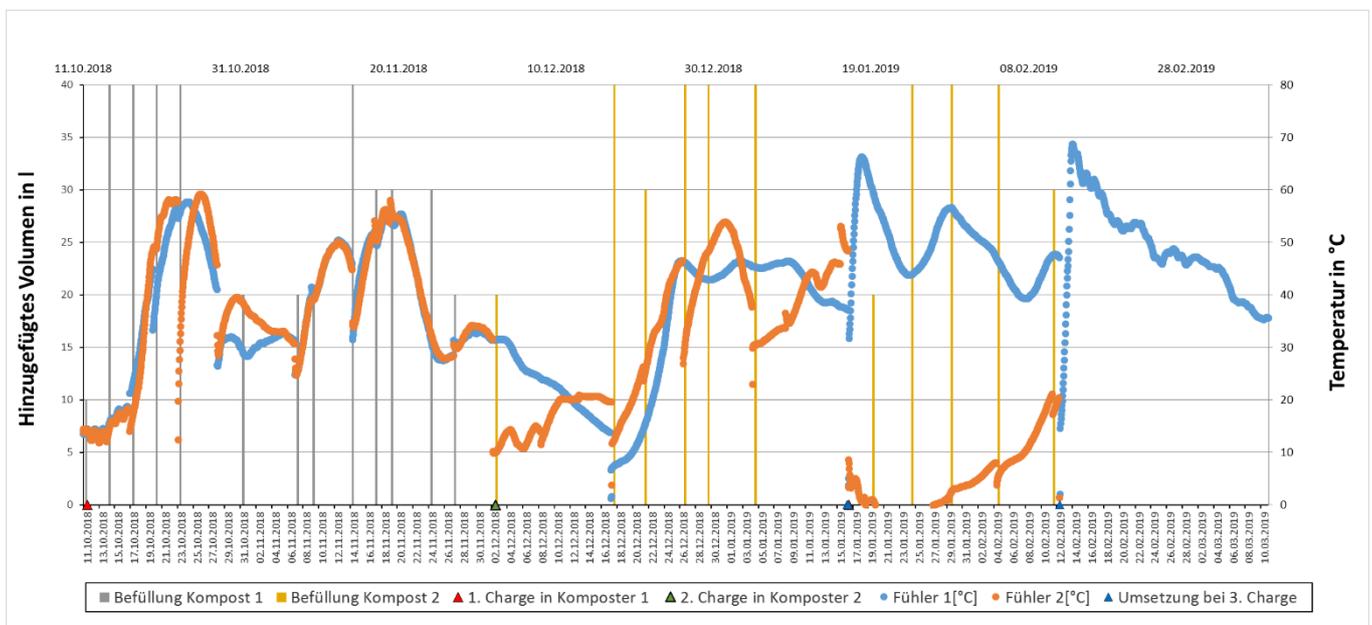


Abbildung 25: Temperaturentwicklung in den Schnellkompostern von der ersten bis zur dritten Befüllcharge während der Einfahrphase

### 3.5.2 Betrieb der Kompostierung nach Anpassung der Befüllungsstrategie

Der Betrieb der Kompostierung ab 12.02.2019 erfolgte wie in Abbildung 26 schematisch dargestellt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Vorgänge eingegangen.

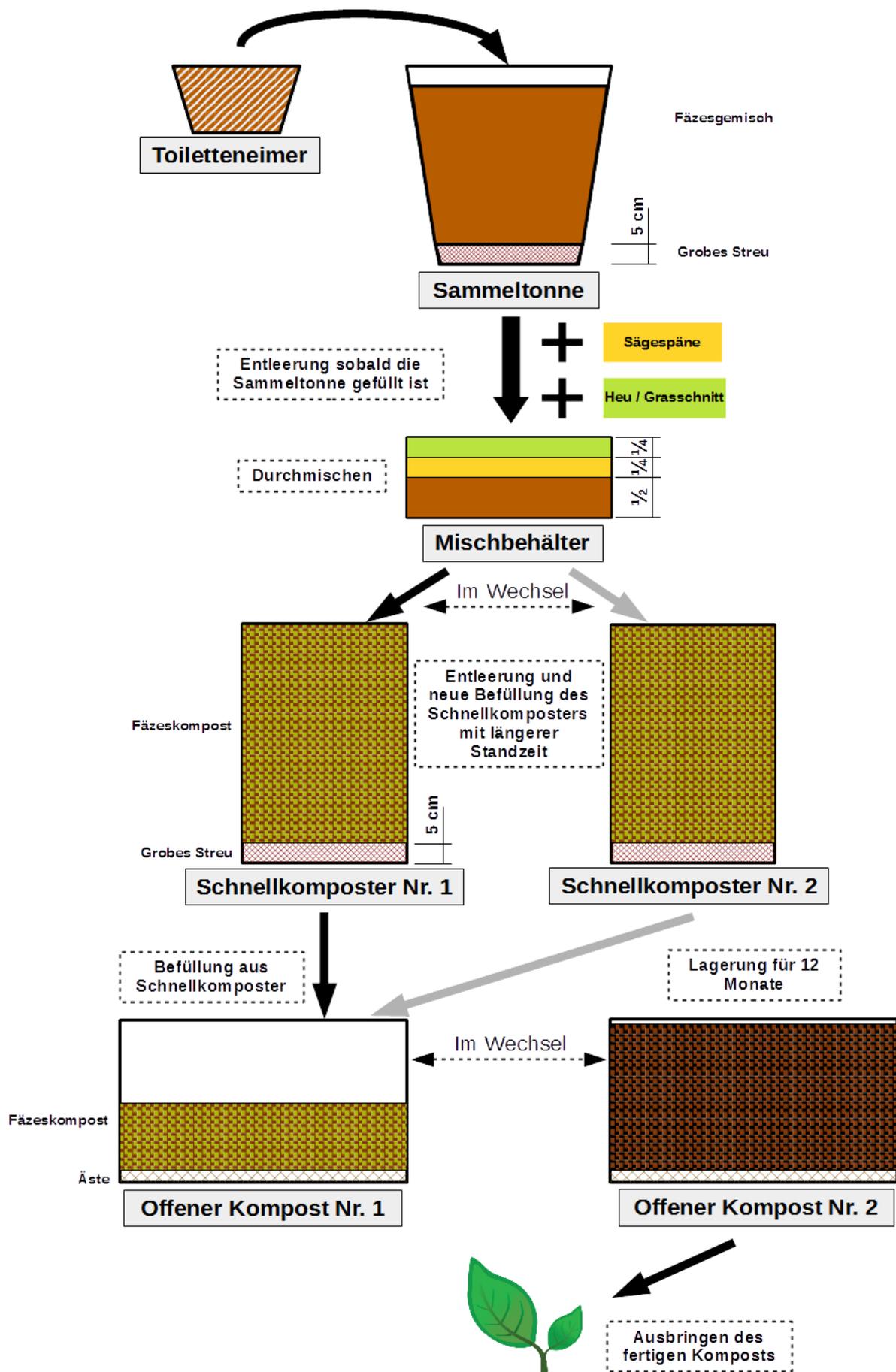


Abbildung 26: Schema der Befüllung und Umschichtung der Fäzeskompostierung.

### Zwischenlagerung in Sammeltonne

Die anfallenden Fäzes werden in die Sammeltonne, in die vor dem Beginn der Befüllung ca. 5 cm möglichst grobes Toilettenstreumaterial eingebracht wurden, gefüllt. Zwischen jeder Schicht einer Befüllung sollte eine Schicht (ca. 1 cm) Strukturmaterial (Strauchschnitt, grobe Späne) hinzugegeben werden. Sobald die Sammeltonne gefüllt ist, wird der Inhalt mit Strukturmaterial gemischt und in einen Schnellkomposter gefüllt.

### Umfüllung und Mischung mit Strukturmaterial

Vor Einbringung des Materials aus der Sammeltonnen wird ca. 5 cm grobes Toilettenstreumaterial auf dem Boden des Schnellkomposters ausgebracht. Die nachfolgend beschriebene Mischungsprozedur muss in mehreren Chargen durchgeführt werden.

- a. Das Kompostmaterial aus der Sammeltonne wird in einen Mischbehälter (z.B. Mörtelkübel) gegeben.
- b. Anschließend werden grobe Sägespäne hinzugegeben.
- c. Auf die Sägespäne wird eine Mischung aus Stroh und Heu (wenn vorhanden besser frischer Grasschnitt) gegeben.
- d. Abschließend werden die Schichten mit einer Schaufel miteinander vermischt und der Fäzeskompost soweit wie möglich zerkleinert.

Das Mischungsverhältnis (Volumen) **Fäzes: Sägespäne: Heu** sollte ungefähr **1: 0,5: 0,5** betragen. Die hergestellte Mischung wird in den vorbereiteten Schnellkomposter gegeben.

### Geschlossene Schnellkompostierung

Da für den Kompostierungsprozess und eine größtmögliche Wärmeentwicklung Sauerstoff in der Kompostmasse erforderlich ist, sollte die Belüftungsöffnung möglichst weit geöffnet sein. Sobald zum Zweck der Umfüllung die Entleerung eines Schnellkomposters notwendig wird, kann der Inhalt auf die offene Nachkompostierung gegeben werden.

### Offene Nachkompostierung

Vor der ersten Entleerung einer Ladung aus dem Schnellkomposter sollte als unterste Schicht ca. 5 cm grobes Strukturmaterial (kleine Äste, Häcksel) in der offenen Kompostmiete ausgebracht werden. Bevor der Kompost aus der offenen Kompostmiete entnommen wird, soll der Kompost mindestens 6 Monate nach dem letzten Aufbringen von frischem Kompost aus den Schnellkompostern lagern.

#### 3.4.3 Temperaturentwicklung in den Schnellkompostern

Vom 06.03.2019 bis zum 19.11.2020 wurden 24 Chargen in der Schnellkompostierung betrieben. In Abbildung 27 ist die Temperaturentwicklung einer Charge im Schnellkomposter beispielhaft dargestellt. Die Temperaturentwicklung bei allen 24 Chargen ist Anhang A11 zu entnehmen. Nach Befüllung der Schnellkomposter mit gemischten Fäzes und Strukturmaterial steigt die Temperatur innerhalb weniger Tage auf über zunächst 55 °C dann 60 °C und schließlich 65 °C an. Nach über 20 Tagen sinkt die Temperatur auf Werte unter 50°C. Nach 6-8 Woche wird der Komposter entleert.

Gemäß den Anforderungen in der BioAbfV [22] soll jeweils eine Temperatur von mindestens 55 °C über einen Zeitraum von 14 Tagen, von 60 °C über 6 Tage, von 65 °C über 3 Tage zur Hygienisierung erreicht werden. In EcoSanRes [23] wird das Erreichen eine Temperatur von mindestens 50 °C über einen Zeitraum von 7 Tagen vorgeschlagen. Daher wurden für die vorliegenden Versuche die Zeitdauern von Temperatur über 65 °C/ 60 °C/ 55 °C/ 50 °C sowie die gesamte Verweilzeit in den Schnellkompostern für jede Charge ausgewertet (Tabelle 10). In 23 von den überwachten 24 Chargen konnten die Anforderungen gemäß BioAbfV und EcoSanRes einhalten werden. Lediglich in der Charge vom

09.01.2020 bis 26.02.2020 wurden die Zielwerte nicht erreicht, was vermutlich an den niedrigen Außentemperaturen in diesem Zeitraum gekoppelt mit einer zu starken Belüftung lag. Zukünftig sollte im Winterbetrieb die Belüftung, wie vom Hersteller empfohlen, verringert werden.

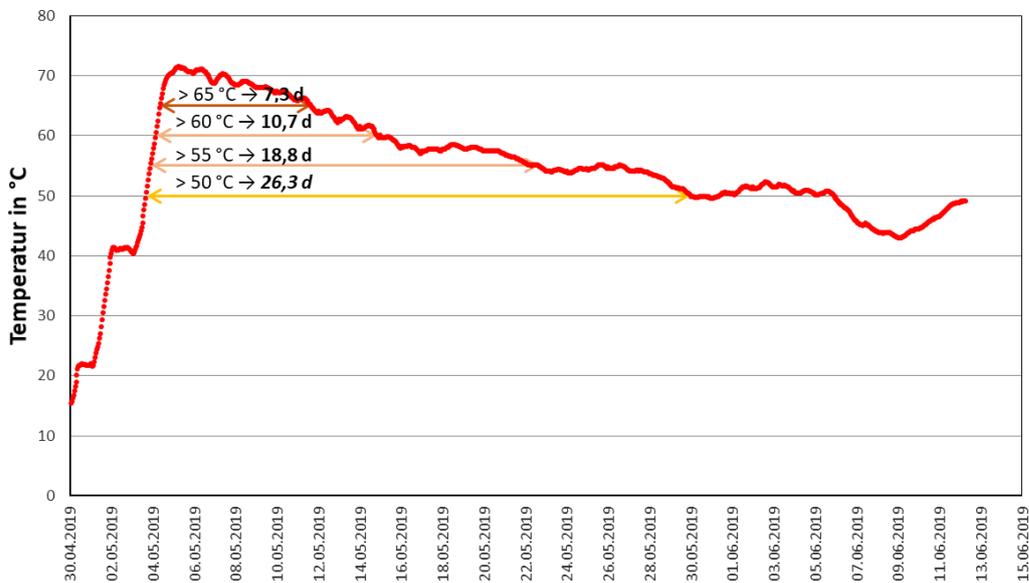


Abbildung 27: Temperaturentwicklung im Schnellkomposter 2 nach der Anpassung, z.B. 30.04.2019-15.06.2019

Tabelle 10: Übersicht über die Dauer von Temperaturen über 50°C und die Verweilzeit in den Schnellkompostern von 24 Chargen nach der Einfahrphase (Chargen 1 bis 3 hier nicht dargestellt)

| Charge Nr. | Anfang     | Ende       | > 65 °C | > 60 °C | > 55 °C | > 50 °C | Komposter 1/2 | Verweilzeit |       |
|------------|------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------------|-------------|-------|
|            |            |            | d       | d       | d       | d       |               | d           | Woche |
| 4          | 06.03.2019 | 29.04.2019 | 3,6     | 6,1     | 9,0     | 17,0    | 2             | 54          | 7,8   |
| 5          | 05.04.2019 | 22.05.2019 | 4,3     | 10,5    | 14,9    | 18,0    | 1             | 47          | 6,7   |
| 6          | 30.04.2019 | 19.06.2019 | 7,3     | 10,7    | 18,8    | 26,3    | 2             | 50          | 7,2   |
| 7          | 22.05.2019 | 19.07.2019 | 7,9     | 11,5    | 20,2    | 28,5    | 1             | 59          | 8,4   |
| 8          | 17.06.2019 | 09.08.2019 | 14,3    | 16,4    | 36,3    | 48,7    | 2             | 53          | 7,6   |
| 9          | 19.07.2019 | 30.08.2019 | 8,3     | 11,0    | 14,8    | 19,8    | 1             | 42          | 6,0   |
| 10         | 09.08.2019 | 21.09.2019 | 16,8    | 21,2    | 36,5    | 38,4    | 2             | 43          | 6,1   |
| 11         | 30.08.2019 | 23.10.2019 | 3,6     | 6,8     | 8,8     | 16,7    | 1             | 54          | 7,7   |
| 12         | 21.09.2019 | 17.11.2019 | 8,5     | 11,8    | 13,7    | 15,6    | 2             | 57          | 8,1   |
| 13         | 23.10.2019 | 24.12.2019 | 0,9     | 9,0     | 13,6    | 19,2    | 1             | 62          | 8,9   |
| 14         | 17.11.2019 | 09.01.2020 | 0,5     | 8,0     | 10,2    | 18,3    | 2             | 53          | 7,6   |
| 15         | 24.12.2019 | 03.02.2020 | 2,4     | 5,5     | 15,3    | 17,8    | 1             | 41          | 5,9   |
| 16         | 09.01.2020 | 26.02.2020 | 0,0     | 2,2     | 6,6     | 9,0     | 2             | 48          | 6,8   |
| 17         | 03.02.2020 | 27.03.2020 | 5,4     | 7,5     | 19,0    | 21,3    | 1             | 53          | 7,6   |
| 18         | 26.02.2020 | 12.04.2020 | 0,3     | 6,1     | 9,0     | 19,0    | 2             | 46          | 6,6   |
| 19         | 27.03.2020 | 22.05.2020 | 4,0     | 7,1     | 15,1    | 16,4    | 1             | 56          | 7,9   |
| 20         | 12.04.2020 | 13.06.2020 | 11,4    | 20,5    | 24,4    | 35,8    | 2             | 63          | 8,8   |
| 21         | 22.05.2020 | 02.07.2020 | 6,5     | 9,8     | 12,7    | 21,9    | 1             | 41          | 5,9   |
| 22         | 13.06.2020 | 30.07.2020 | 9,0     | 22,3    | 23,7    | 24,3    | 2             | 48          | 6,8   |
| 23         | 02.07.2020 | 07.08.2020 | 7,3     | 10,5    | 15,8    | 21,6    | 1             | 36          | 5,2   |
| 24         | 30.07.2020 | 22.08.2020 | 10,5    | 17,5    | 17,8    | 18,0    | 2             | 23          | 3,2   |
| 25         | 07.08.2020 | 29.08.2020 | 7,8     | 13,0    | 19,5    | 19,6    | 1             | 22          | 3,1   |
| 26         | 22.08.2020 | 20.10.2020 | 7,9     | 12,1    | 22,5    | 25,4    | 2             | 59          | 8,5   |
| 27         | 29.08.2020 | 19.11.2020 | 5,6     | 9,4     | 17,8    | 20,0    | 1             | 82          | 11,7  |

Tabelle 10 verdeutlicht, dass die bei der Planung vorgesehene Verweilzeit von 6-8 Wochen im Schnellkomposter bei den meisten Chargen eingehalten wurde. Allerdings betrug die Verweilzeit von den Chargen 23-25 im Zeitraum von Juli bis August 2020 nur zwischen 3 bis 5 Wochen. Dies ist auf eine hohe Besucherzahl in diesem Zeitraum zurückzuführen. Trotzdem wurden ausreichend hohe Temperaturen auch bei diesen drei Chargen über die geforderten Zeiträume gemäß BioAbfV und EcoSanRes erzielt.

#### 3.4.4 Schlussfolgerung und betriebliche Aspekte

Durch Zwischenlagerung und Mischung mit Strukturmaterialien in den angegebenen Verhältnissen konnten gemäß Literatur [22, 23] für eine Hygienisierung erforderliche Temperaturen über die dort vorgegebenen Zeiträumen bei der Schnellkompostierung der Fäzes im geschlossenen Komposter erzielt werden. Die Fäzesbehandlung kann nach der Anleitung in Kap. 3.5.2 weiter durchgeführt werden.

### 3.5 Betrieb des Gesamtsystems

Der Betrieb des MAP-Reaktors und der Fäzeskompostierung wurden jeweils ab Februar 2020 und April 2019 von den BewohnerInnen des Reinighofs selbst übernommen, aber weiterhin Daten gesammelt und ausgewertet. Die Temperaturentwicklung in den Schnellkompostern bei den vom Reinighof betriebenen Chargen (an 6. Charge) wurde in Kap. 3.4 dargestellt und zeigen, dass i.d.R. eine ausreichende Temperaturentwicklung erreicht wurde.

Bei dem Betrieb des MAP-Reaktors durch die BewohnerInnen des Reinighofs lag die Herausforderung darin, eine gute P-Rückgewinnung ohne Messung der P-Konzentration im Urin zu erreichen und zu überprüfen, ob dies mit der von der TUK erstellten betrieblichen Anleitung zuverlässig funktioniert. Vom 12.09.2020 bis zum 19.11.2020 wurden Proben vom Urin vor und nach der Fällung und im Ablauf des SBFs von jeder Charge durch die BewohnerInnen genommen und dann von der TUK abgeholt und analysiert. Die P-Konzentrationen in den Urinproben vor der Fällung lagen zwischen 273 bis 424 mg/L  $PO_4\text{-P}$ , was im Bereich der während der Begleitphase gemessenen P-Konzentration liegt. In allen Proben nach der Fällung waren die P-Konzentrationen unter der Nachweisgrenze von 0,04 mg/L (siehe Tabelle 11). Somit konnte mit dem festgelegten Vorgehen nach der Betriebsanleitung mit einer standardisierten Zugabemenge an MgO eine sehr gute P-Rückgewinnung (> 99%) auch ohne Messprogramm erreicht werden.

*Tabelle 11.  $PO_4\text{-P}$ -Konzentrationen [mg/L] in Urin vor und nach der MAP-Fällung beim standardisierten Betrieb durch die BewohnerInnen des Reinighofs*

|                              | 12.09.2020 | 18.09.2020 | 01.10.2020 | 19.10.2020 | 26.10.2020 | 19.11.2020 |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Urin vor der Fällung</b>  | 424        | 349        | 323        | 317        | 315        | 273        |
| <b>Urin nach der Fällung</b> | <0,04      | <0,04      | <0,04      | <0,04      | <0,04      | <0,04      |

In Abbildung 28 werden die Ergebnisse der  $N_{ges}$ -Elimination des SBFs im Zeitraum vom 12.09.2020 bis zum 9.11.2020 dargestellt. Während die Werte für  $N_{ges}$  im Urinüberstand zwischen 3801 bis 4664 mg/L liegen, liegen die  $N_{ges}$ -Konzentrationen im Ablauf des SBF zwischen 1321 und 2382 mg/L. Stickstoff wird somit in der Größenordnung 35-53% entfernt. Auch unter Einbeziehung der Ergebnisse seit Juni 2019 (Kap.3.3.3.4) ist zu erkennen, dass der SBF bislang stabil läuft.

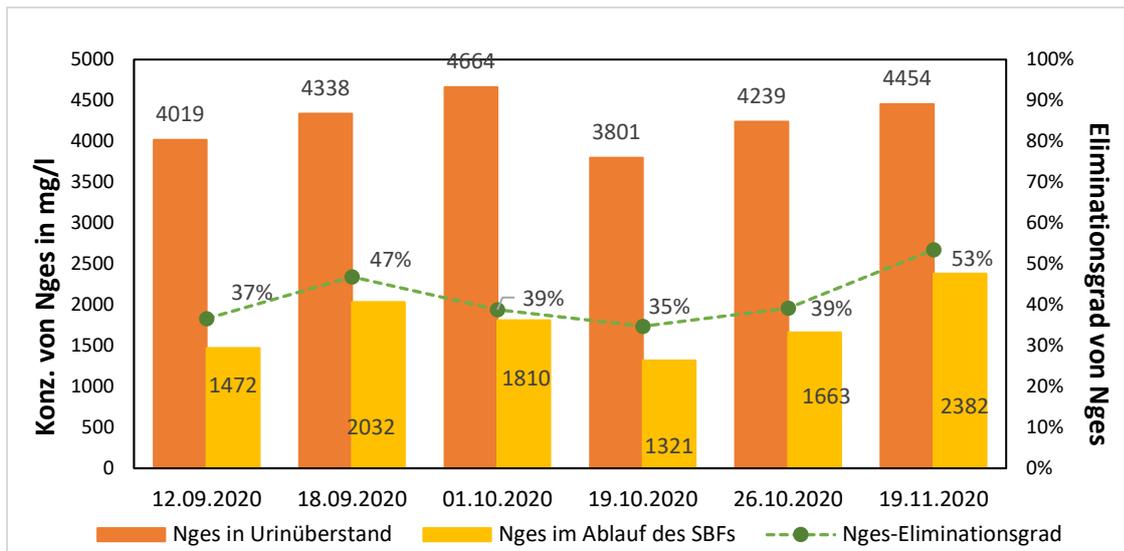


Abbildung 28: N-Konzentrationen im Urinüberstand und Ablauf des SBFs vom 12.09.2020 bis 19.11.2020

## 4. Bewertung des Gesamtbehandlungskonzeptes

Übergeordnetes Ziel des Projektes war es, die Machbarkeit autarker, dezentraler Abwasserbehandlungsanlagen mit weitgehender Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen aufzuzeigen, aus den Versuchen Bemessungswerte und betriebliche Erfordernisse abzuleiten und ein Pilotprojekt zur Bewusstseinsbildung und Wissensvermittlung zu schaffen.

### 4.1 Reinigungsleistung

#### 4.1.1 Ablauf des Gesamtsystems

Da sich der Reinghof in einem Trinkwasserschutzgebiet befindet wurde der Grauwasser-PKA ein Verdunstungsteich nachgeschaltet, so dass das System abflusslos und zum Untergrund hin abgedichtet ist. Dennoch wurde der Ablauf der Grauwasser-PKA an einzelnen Tagen beprobt, um die Leistungsfähigkeit der vorgeschalteten Behandlungsstufen zu beurteilen. Anhand der genommenen Stichproben lagen zwar - vor allem durch die diskontinuierliche Beschickung des Grauwasserbodenfilters und die undefinierte Aufenthaltszeit im System - keine korrespondierenden Proben vor, dennoch kann die Reinigungsleistung anhand der Messergebnisse an mehreren Tagen grob beurteilt werden. Die Anlage vom Reinghof mit 16 angeschlossenen Einwohnern in der Spitze entspricht einer Kleinkläranlage, also einer Anlage der Größenklasse 1.

Tabelle 12 stellt die Ablaufwerte der Grauwasser-PKA während der Projektphase dar, inklusive eines Wertes vor Anschluss der Urinbehandlung. Während der zwei Betriebsjahre des gesamten Systems lagen die Ammoniumstickstoff- und Phosphorkonzentrationen im Ablauf der Pflanzenkläranlage immer unter 1 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$  und unter 1 mg/L  $\text{P}_{\text{ges}}$  (meist unter 0,2 mg/L). Diese Werte sind hervorragend und liegen sogar deutlich unter den Grenzwerten der AbwV [29] einer Kläranlage der Größenklasse 5 (10 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$  und 1 mg/L  $\text{P}_{\text{ges}}$ ), was die sehr hohe Reinigungsleistung aufzeigt. Bezüglich der Entfernung des Gesamtstickstoffs ist das Bild heterogener, da eine Pflanzenkläranlage keine gezielte Denitrifikation ermöglicht. Dennoch sind die Nitratstickstoffkonzentrationen im Verdunstungsteich (02.09.2020) gering, was vermutlich auf eine Entnahme durch Pflanzen zu begründen ist. Somit ist die Reinigungsleistung des Gesamtsystems als hervorragend zu bezeichnen.

Tabelle 12: N- und P-Konzentration im Ablauf der Grauwasser-PKA und im Verdunstungsteich

| Date                    | CSB <sub>ges</sub> | N <sub>ges</sub> | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | P <sub>ges</sub> |
|-------------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|
|                         | mg/l               | mg/l             | mg/l               | mg/l               | mg/l             |
| 06.11.2018 <sup>a</sup> | 9,9                | 15,1             | 3,10               | < 0.06             | 0,70             |
| 04.12.2018              | 8,4                | 3,1              | 0,10               | < 0.06             | 0,44             |
| 27.03.2019              |                    | 13,6             | 0,77               | < 0.06             | 0,10             |
| 03.07.2019              |                    | 34,0             | 0,74               | 31.76              | 0,08             |
| 07.11.2019              |                    | 20,9             | 0,08               | 20,20              | 0,12             |
| 02.09.2020 <sup>b</sup> | 20                 | 21               | 0,3                | 18,7               | 0,1              |
| 02.09.2020 <sup>c</sup> |                    | 0,4              | 0,2                | 0,2                | 0,1              |
| 01.10.2020              |                    | 23               | 0,2                |                    | <0,43            |
| 19.11.2020              |                    | 23               | 0,6                |                    | 0,23             |

- a. Vor dem Anschluss an die Urinaufbereitung.
- b. Kontrolle von Verbandsgemeinde Dahn
- c. Kontrolle von Verbandsgemeinde Dahn, Messwerte vom Verdunstungsteich

## 4.2 Qualität der Produkte

Im Rahmen des Projektes wurden Stichproben vom Urin, dem Urinüberstand, dem Ablauf des SBFs, vom Grauwasser, vom Ablauf der PKA, von den Fäzes und dem Schnellkompost sowie Mischproben vom getrockneten MAP und vom Nachkompost jeweils am 01.10.2020 und 19.11.2020 genommen und auf die Keimbelastung und ausgewählte organische Mikroverunreinigung (Spurenstoffe) untersucht. Anhand dieser Untersuchungen kann der hygienische Status im gesamten System bewertet werden. Die Analysen wurde beim Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) an der Universität in Stuttgart durchgeführt.

### 4.2.1 Ergebnisse der mikrobiologischen Analyse

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen sind in Tabelle 13 aufgelistet. In gelagertem Urin wurden keine E. coli nachgewiesen. Da ein Eintrag fäkaler Verunreinigungen durch Kontaminationen beim Benutzen der Toilette nicht ausgeschlossen sind, trägt vermutlich der pH-Wert vom gelagerten Urin (größer 9) zu den guten Werten bei, da E. coli bei diesem pH-Wert nicht überlebensfähig sind [30]. Auch im MAP (gewaschen oder ungewaschen) wurden entweder keine oder sehr geringe Koloniezahlen für E. coli und Coliforme Keime ermittelt. Hinsichtlich der Keimbelastung ist der getrocknet MAP unbedenklich als Dünger verwertbar.

Der Gehalt an E. coli, Coliformen und Enterokokken wird in der Pflanzenkläranlage deutlich reduziert. Das Grauwasser ist mit ca. 2 bis 3 log-Stufen höher belastet, als der Ablauf der Pflanzenkläranlage wo z.B. bezogen auf E. coli nur vereinzelte KBE/ml Probe vorliegen. Hochgerechnet auf 100 mL Probe ist dieser Wert vergleichbar mit dem der EG-Badegewässerrichtlinie 2006/7/EG im Bereich ausgezeichnet (500 KBE/100mL) bis gut (1000 KBE/100mL).

Beim Kompost weist die abnehmende Keimzahl von Fäkalindikatoren auf einen erfolgreichen Kompostiervorgang hin. Durch Schnellkompostierung und Nachkompostierung wird die Keimbelastung in Bezug auf E. coli, Enterokokken und Coliphagen um  $3\log_{10}$ - $5\log_{10}$  reduziert und das obwohl der Feststoffgehalt durch den Kompostierungsvorgang abnimmt und damit die Feuchtmasse sinkt.

Tabelle 13: Keimzahl der untersuchten Proben in KBE/mL (flüssige Probe) bzw. KBE/g Feuchtmasse

| Probenzeichnung                            | Gesamtkeimzahl | E. coli   | Coliforme Keime | Enterokokken | Coliphagen |
|--|----------------|-----------|-----------------|--------------|------------|
| 1. Urin, 01.10.20                          | 3,00E+04       | <5.00E+01 | 1,08E+03        | 9,01E+03     | <2.50E+00  |
| 2. Urinüberstand, 01.10.20                 | 1,95E+04       | <5.00E+01 | <5.00E+01       | 2,00E+03     |            |
| 1. Urin, 19.11.20                          | 2,42E+04       | 0,00E+00  | 5,00E+00        | 4,63E+03     | 1,00E+00   |
| 2. Urinüberstand, 19.11.20                 | 2,66E+04       | 0,00E+00  | 1,87E+01        | 3,06E+03     |            |
| 3. Ablauf SBF, 01.10.20                    | 3,06E+06       | <5.00E+00 | 2,55E+02        | 7,81E+02     |            |
| 4. Grauwasser, 01.10.20                    | 8,69E+05       | 4,09E+03  | 3,32E+04        | 1,00E+04     |            |
| 4. Grauwasser, 19.10.20                    |                | 2,08E+02  | 6,50E+04        | 4,68E+02     |            |
| 5. Ablauf PKA, 01.10.20                    | 2,05E+02       | 1,00E+00  | 1,45E+02        | 2,23E+00     | 0,00E+00   |
| 5. Ablauf PKA, 19.11.20                    |                | 7,10E+00  | 2,87E+01        | 9,44E-01     | 0,00E+00   |
| 6. frisch Fäzes, 01.10.20                  | 3,42E+08       | 1,02E+08  | 3,08E+07        | 9,05E+07     | 1,14E+07   |
| 7. Schnellkompost, 01.10.20                | 1,49E+08       | 4,34E+06  | 4,36E+05        | 8,01E+06     |            |
| 8. Nachkompost, 01.10.20                   | 2,13E+09       | 3,98E+05  | 5,19E+05        | 8,00E+04     | 1,00E+02   |
| 9. frisches, ungewaschenes MAP, 01.10.20   | 1,92E+07       | 6,60E+01  | 1,38E+02        | 7,60E+04     |            |
| 10. frisches, gewaschenes MAP, 01.10.20    | 3,74E+05       | <1.00E+02 | <1.00E+02       | 9,64E+03     |            |
| 11. gemischtes, getrocknetes MAP, 01.10.20 | 1,84E+04       | <2.50E+00 | <2.50E+00       | 2,68E+02     | 1,00E+01   |
| 11. gemischtes, getrocknetes MAP, 19.11.20 | 4,85E+02       | 1,00E+00  | 9,00E+00        | 1,00E+00     | 0,00E+00   |

#### 4.2.2 Ergebnisse von organischen Mikroverunreinigungen

Organischen Mikroverunreinigungen aus der Gruppe der Genussmittel, Pharmazeutischen Wirkstoffe, natürlichen Hormone, typischer Urinhaltstoffe, Duftstoffe sowie deren Transformationsprodukte wurden in allen Proben am 01.10.2020 und 19.11.2020 analysiert. Alle Messergebnisse sind dem Anhang A12 zu entnehmen. Da die Urinprobe vor der Fällung aus dem Lagertank entnommen wurde, ist sie als Mischprobe der vorangegangenen zwei bis vier Wochen zu verstehen. Wie auch im Projektbericht Kirchentag (Projekt AZ 32799, DBU) [2] beschrieben, werden die ausgewählten Spurenstoffe hauptsächlich über den Urin ausgeschieden und nicht über die Fäzes. In den Proben von Fäzes sowie Kompost lagen Arzneimittelrückstände unter der Nachweisgrenze von <0,1 µg/L. Die Urinprobe vom 01.10.2020 umfasst Urin der Reinighofbewohner und –besucher, da im Oktober durchschnittlich ca. 10 Besucher pro Tag Vorort waren. Die Probe am 19.11.2021 ist wegen des Corona-Lockdowns seit dem 01.11.2020 fast ausschließlich auf BewohnerInnen des Reinighofs zurückzuführen, die nach eigenen Angaben keine Medikamente einnehmen. Als Arzneimittel wurden Aspirin, Carbamazepin, Diclofenac, Gabapention, Ibuprofen, Lidocain, Tramadol, Venlafaxin sowie deren Transformationsprodukt untersucht. Außer Ibuprofen konnten keine Medikamente nachgewiesen werden, da die Konzentrationen von den anderen Arzneimitteln unter der Nachweisgrenze von <0,1 µg/L lagen. Während die Konzentration von Ibuprofen (Summe von Ibuprofen und Transformationsprodukten) in der Urinprobe vom 01.10.2020 bei ca. 3500 µg/L lag, lag sie am 19.11.2020 bei ca. 300 µg/L. In allen MAP-Proben, (frisch gewaschen und ungewaschen sowie gemischt gelagert) sind keine Arzneimittel nachweisbar. Ibuprofen wird zudem über den Urinrückstand zum SBF geleitet und daher weiter eliminiert. Am Ende finden sich im Ablauf der PKA keine Arzneimittelrückstände. Hinsichtlich Arzneimittelrückstände sind der Ablauf der Grauwasser-PKA als Ablauf des Gesamtsystems und der Kompost sowie das MAP als rückgewonnenen Ressourcen als unbedenklich einzustufen.

### 4.3 Kostenzusammenstellung

Gesicherte Aussagen zu den Investitionskosten zu tätigen ist schwierig, da ein Teil der Anlage (Grauwassersystem) bereits vor Erstellung des im Rahmen des Projektes untersuchten Teils der Toilettenfraktion mit Behandlungsaggregaten installiert war und weil ein erheblicher Teil in Eigenleistung erbracht wurde (z.B. Bau des Forschungshauses etc.) oder vergünstigt an der TUK gebaut wurden (z.B. MAP-Reaktor).

Im Folgenden werden Betriebskosten des Gesamtsystems zusammenstellt. Die Behandlung des Grauwassers, Fäzes sowie Urinüberstand nach der MAP-Fällung erfolgt durch biologische Prozesse und ist fremdenergiefrei. Strom ist für die Ventilatoren zur Entlüftung der Trockentrenntoiletten und im Forschungshaus, für den Transport des gelagerten Urins vom Lagertank in den MAP-Reaktor, zur Mischung des MAP-Reaktors und zum Transport des Ablaufs des SBFs in die Mehrkammergrube zur Grauwasser-Vorklärung erforderlich. Gemäß Tabelle 14 ergibt sich ein Jahresverbrauch an Strom von 57,4 kWh für das Gesamtsystem. Umgerechnet auf den Einwohner entspricht dies einem Wert zwischen 3,5 (Spitzenbelastung 16 E) und 7 kWh/(E\*a) (8 E ohne BesucherInnen) und liegt damit deutlich unter dem mittleren einwohnerspezifischen Energieverbrauch einer Kläranlage von ca. 64,3 in der Größenklasse 1 (DWA Leistungsvergleich 2015) [31]. Beim Reinighof stammt der benötigte Strom zu 100% aus regenerativen eigenen Quellen, so dass hier rechnerische keine Treibhausgas-Emissionen entstehen.

Die Betriebsmittel setzen sich aus den Zuschlagstoffen für die Fäzesbehandlung und MgO zur MAP-Fällung zusammen, wobei Zuschlagstoffe zur Kompostierung auf dem Reinighof als Reststoffe anfallen und nicht extern bezogen werden müssen. Lediglich das MgO-Fällmittel muss gekauft werden, wobei 100 g/Charge verbraucht werden. Für den jährlichen Betrieb werden somit insgesamt ca. 4 kg MgO benötigt, das entspricht Kosten von 85 €/Jahr und jährliche MAP Produktion von ca. 12 kg/Jahr.

Tabelle 14: Stromverbrauch des Gesamtsystems

| Position  | Leistung | Betriebsweise          |                    | Jahresverbräuche [kWh/Jahr] |
|---|----------|------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Entlüftung von TTT                                | 0,5 W    | ständig                |                    | 13,1                        |
| Entlüftung im Forschungshaus                      | 2 W      | ständig                |                    | 17,5                        |
| Pumpe vom Urinlagertank zum Reaktor               | 0,16 kW  | 20 Minuten pro Charge  | 40 Charge pro Jahr | 2,1                         |
| Rührer des MAP-Reaktors                           | 77 W     | 1,5 Stunden pro Charge | 40 Charge pro Jahr | 4,6                         |
| Pumpe vom Ablauf des SBF zur Grauwasservorklärung | 1 kW     | 30 Minuten pro Charge  | 40 Charge pro Jahr | 20,0                        |
| gesamt  |          |                        |                    | <b>57,4</b>                 |

Somit fallen an Betriebskosten faktisch nur die 85,- €/a für das MgO an, was bei 8 Einwohner ca. 11,- €/E\*a entspricht. Allerdings ist der eigene Aufwand zum Betrieb der Anlage nicht als Personalkosten eingerechnet, ebenso wenig ist Re-Investition berücksichtigt.

### 4.4 Bemessungsvorschläge für zukünftige Planungen

Für die meisten im Projekt untersuchten Anlagenkomponenten (Urinlagertank, MAP-Reaktor und Spezialbodenfilter zur Urinbehandlung) gibt es bislang kein Regelwerk mit Bemessungsvorgaben. Für die Bemessung eines Urinlagertanks gibt es gemäß DWA [20] und Saniresch [1] die Empfehlung, eine Lagerzeit von mindestens 6 Monaten zur Hygienisierung einzuhalten. Das würde für den Reinighof mit 16 Einwohner im Sommer-Szenario ca. 4,5 m<sup>3</sup> Volumen bedeuten. Das Ziel beim Reinighof ist allerdings nicht die direkte Verwendung von abgelagertem Urin, sondern den pH-Wert auf für die MAP-Fällung

erforderliche Werte über 8 anzuheben und zu stabilisieren. Dazu reicht eine Lagerzeit von 21 Tage aus. Dieser Wert wird zur Bemessung eines der MAP-Fällung vorgeschalteten Lagertanks auf Basis der Projektergebnisse empfohlen.

Bei der Bemessung eines dezentral und nicht automatisiert betriebenen MAP-Fällungsreaktor sind nach der Ermittlung des täglichen Urinanfalls (ggf. saisonabhängige Szenarien) zunächst die gewünschten Betriebsintervalle festzulegen. Bei einem einfachen Betrieb alle 1-2 Woche wird ein Reaktorvolumen von 10-20 L/E benötigt. Dies kann bei kürzeren Beschickungsintervallen entsprechend verringert werden.

Der Spezialbodenfilter ist erstmalig zur Behandlung des Urinüberstands nach der MAP-Fällung und vor Einleitung in einen Bodenfilter zur Grauwasserbehandlung eingesetzt worden. Im Betrieb hat sich gezeigt, dass mit zeolithhaltigem Lavasand mit hoher Kationenaustauschkapazität eine sehr gute Nitrifikation bei einer spezifischen Fläche von 0,25 bis 0,5 m<sup>2</sup>/E erreicht werden kann. In weiteren Projekten sollte dieser Wert verifiziert werden. Allerdings ist eine weitere Behandlung des Ablaufs des SBFs erforderlich.

## 4.5 Bewertung des Betriebs und Akzeptanz des Systems durch die BewohnerInnen

### 4.4.1 Nutzung der Trockentrenntoiletten

Wir haben im Zuge des Forschungsprojektes unsere 3 Toiletten im Wohnbereich auf Trockentrenntoiletten umgebaut. Auch der Sanitärwagen auf unserem Naturzeltplatz ist mit 3 Trockentrenntoiletten ausgestattet. Nach anfänglicher Eingewöhnungszeit an die neuen Toiletten können wir von einer weitgehendsten positiven Nutzung sprechen. Durch den Einbau von Abzugventilatoren kommt es zu keiner unangenehmen Geruchsentwicklung. Es gibt natürlich auch ein paar Faktoren, die nur durch intensive Aufklärung nicht zum Problem werden: z.B. Nutzung der Sägespäne zur Fäzesabdeckung – bei der Bestreuung der Fäzes dürfen keine Sägespäne in die Urinschale des Trennsitzes kommen, da diese den Urinabfluss verstopfen bzw. ins Rohrsystem und letztendlich in den Sammelbehälter gelangen – dies ist vor allem Kindern zu zeigen und zu erklären. Auch das nach jeder Nutzung der Toilette der Toilettendeckel geschlossen werden muss – sonst funktioniert der Abzug nicht – bedarf einer Aufklärung. Auf den Toiletten im Sanitärwagen konnten wir feststellen, dass viele Besucher vor der Nutzung die Toilettenbrille mit Klopapier auslegen. Dies hatte bei hohen Benutzerzahlen den Effekt, dass sehr große Mengen an Klopapier im Fäzessammeleimer gelandet sind. Wir haben dann extra Toilettenpapier-Sammeleimer aufgestellt um dieses nicht verschmutzte Papier aus der Kompostierung fern zu halten.

### 4.4.2 Entleerung Fäzes und Kompostierung

Es war von Anfang an klar, dass die Entleerung der Toiletten nur durch Eimertransport möglich ist. Für manche Menschen war es schon eine Überwindung die Fäzeseimer zu wechseln. Wir bringen die Eimer vom Haus und Sanitärwagen auf unseren Kompostierplatz. Dort werden diese erstmal in einen Sammelbehälter entleert. Die Eimer müssen dann gesäubert und gereinigt werden, was auch einen nahen Kontakt mit der Materie bedeutet.

Wenn der Sammelbehälter voll ist, mischen wir in einer Maurerwanne die Fäzes mit Grünschnitt oder Heu und Hobelspäne. Der Mischvorgang wird mittels einem elektrisch angetriebenen Handrührgerät bewerkstelligt. Dies ist eine anstrengende Arbeit und je nach Jahreszeit sehr schweißtreibend. Die gemischte Masse wird dann in den Thermo-Komposter geschaufelt – Fassungsvermögen ca. 220 L – mit der Temperaturmesssonde versehen und verschlossen. Es ist unterschiedlich, wie schnell jede Charge in die Heißphase geht, doch im Durchschnitt ist nach einer Woche die Temperatur angestiegen, bis die erforderliche Temperatur für eine gesicherte Hygienisierung erreicht wird. Nach einer Verweilzeit von 6 – 7 Wochen ist der thermische Prozess abgeschlossen. Dann wird der Kompost zur

Nachkompostierung für einen Zeitraum von 1 ½ Jahren in offenen aber abgedeckten Mieten gelagert. Da wir alles von Hand machen sind wir gespannt, ob es auf diesem Gebiet innovative technisierte Entwicklungen geben wird.

#### 4.4.3 Nutzung des Kompostes

Das Forschungsprojekt läuft ja noch nicht so lange, dass wir über eine größere Menge fertigen Kompostes verfügen. Es war uns auch klar, dass wir diesen Kompost nicht in unserem Garten verwenden werden. Wir können anhand der Temperaturmessungen zwar den Stand der Hygienisierung sehen, dennoch verwenden wir den bis jetzt produzierten Kompost zur Düngung von Hecken und anderen Neuanpflanzungen was bei unserer etwas kargen Bodenbeschaffenheit sehr förderlich ist.

#### 4.4.4 Betrieb der MAP – Fällung

Für das Forschungsprojekt haben wir einen 750 l Urinsammelbehälter unter dem Forschungshaus installiert. Für eine MAP – Fällung werden 160 l in einem Reaktor mit 100 mg Magnesiumoxid vermischt und 1 ½ Stunden gerührt. Nach ca. 12 Std. Ist das MAP ausgefallen und wird in einen Filtersack abgelassen. Dieser wird mehrmals gespült und zum Trocknen aufgehängt. Der Restüberstand wird in ein kleines Klärbeet abgelassen und fließt später in die Klärung unserer großen Pflanzenkläranlage.

Der Vorgang ist relativ einfach zu handeln, doch muss auch hier auf verschiedene Handhabungen geachtet werden, da es sonst zu sehr intensivem Uringeruch im Forschungshaus kommt. Auch bei der Terminierung der Abläufe müssen wir darauf achten, dass, wenn das kleine Klärbeet beschickt wird, dies nur in den Abendstunden passieren kann, denn sonst liegt eine Duftwolke über dem Zeltplatz oder hier oben vorm Haus.

#### 4.4.5 Anwendung MAP

Über die Anwendung des von hier gewonnenen MAP können wir noch keine großen Angaben machen. wir haben in unserem Garten verschiedene Experimentierflächen unter Beobachtung, wo noch keine eindeutigen Ergebnisse zu sehen sind.

#### 4.4.6 Daten und Feedback zur Nutzung Seminarraum, Campingplatz, Bewohner

Wie Anfangs erwähnt, haben sich die Bewohner des Reinighofs gut an das neue System gewöhnt. Für viele unserer persönlichen Besucher ist so eine Anlage neu, deshalb ist es immer mit Einweisungen und Erklärungen verbunden.

Dieses gilt ebenfalls für die Besucher des Naturzeltplatzes sowie Nutzer des Seminarraumes. Nach der Benutzung der Trockentrenntoiletten ist der überwiegende Teil der Besucher sehr zufrieden mit der Nutzung. Auch für viele ist die Geruchsneutralität der Toiletten mit einem AHA-Effekt verbunden, denn in ihrer ersten Vorstellung müssten solche unangenehm riechen. Ein weiterer Aspekt ist der Sichtkontakt zu Fäzes mit Sägespänen abgedeckt. Das ist für viele neu und braucht eine gewisse Gewöhnungszeit. Doch als Fazit bleibt: Das Feedback ist zu 95% positiv und viele können sich vorstellen, eine solche Trockentrenntoilette in ihrem privaten Bereich zu installieren. Auch durch die Einweisungen und Erklärungen wird vielen deutlich, dass unsere Ausscheidungen kein Abfall oder was Ekliges sind, sondern ein Rohstoff mit sehr viel Potenzial und Nährstoffen. Das Trockentrenntoiletten ohne Wasserspülung auskommen und damit eine wichtige Ressource eingespart wird, ist für viele in der Zeit von Klimawandel und immer trockner werden den Sommern ein einleuchtender Aspekt und trägt sehr zum Überdenken und zur Akzeptanz solcher Systeme bei.

## 4.5 Modellcharakter

Im Zuge des Projektes konnte eindrucksvoll belegt werden, dass das Gesamtkonzept auch durch Nicht-Fachleute sicher betreibbar ist und im Gesamtablauf zum Verdunstungsteich verlässlich sehr niedrige Konzentrationen bezüglich Pges,  $\text{NH}_4\text{-N}$  und CSB erreicht werden (siehe Kapitel 4.1). Weiterhin können Abwasserinhaltsstoffe in Form eines Kompostes, in dem die Anfangsbelastung an Fäkalkeimen mit über 99,9 % erheblich reduziert wurde, genutzt und mit MAP ein wertvoller Dünger produziert werden. Die Anlagenkomponenten funktionieren verlässlich seit über zwei Jahren auch ohne eine zentrale Abwasserinfrastruktur als Back-up.

Damit ist die Eignung für abgelegene Einzelanwesen aufgezeigt. Das Konzept und die einzelnen Verfahrenskomponenten, hier vor allem der für den dezentralen Einsatz entwickelte MAP-Reaktor und der erstmalig für die Nitrifikation bei hohen Ammoniumkonzentrationen erprobte Spezialbodenfilter, können sehr gut auf andere Anwendungsbereiche wie Naturfreundehäuser, Wanderhütten, Outdoortouringplätze, Ferienhausgebiete etc. übertragen werden und könnten vor allem auch im internationalen Kontext für den dezentralen Bereich eingesetzt werden. Allerdings benötigt es bislang dafür immer einen „Kümmerer“, der sich um die Kompostierung der Fäzes und den Betrieb des MAP-Reaktors kümmert. Eine Weiterentwicklung zu einem stärker automatisierten Ablauf wäre ein sinnvoller nächster Entwicklungsschritt.

Der Reinighof verwertet die gewonnenen Produkte bislang selbst. Das wird auch zukünftig für den Kompost so bleiben, für das MAP kann mittelfristig ein Verkauf entlang des am Reinighof vorbei laufenden Wanderweges oder an Seminar- und Campingplatznutzer erfolgen.

Im Zuge des Projektes wurden auch Gespräche mit potenziellen Nutzern geführt, z.B. zeigten Gäste vom Landesforstamt Interesse an den innovativen, dezentralen Lösungen der Abwasserentsorgung, z.B. für Wanderhütten.

Das Projekt wird von Seiten der VG positiv bewertet. Trotz einer zurzeit vorhandenen Anschlussquote an die öffentliche Kanalisation von rd. 99 % besteht seitens der VG großes Interesse an einsatzfähigen Abwassersystemen für die verbleibenden nicht angeschlossenen Einzelanwesen wie Pfälzerwaldhütten oder Aussiedlerhöfe. Die Gemeinde ist bestrebt, möglichst vollständig von der Abwassersammlung in Klärgruben mit anschließendem Abtransport zur Kläranlage in Fahrzeugen abzukommen. Da die VG die Kosten ab Lieferung des Abwassers (z.B. für Entleerung, Behandlung Schlamm Entsorgung) zurzeit selbst trägt, besteht auch aus finanzieller Sicht ein Interesse an der Multiplikation des Konzeptes.

Rechtliche Aspekte wurden dabei wie folgt geregelt:

- Genehmigung: Die VG hat der Übertragung der Abwasserbeseitigungspflicht an den Reinighof zugestimmt. Aufgrund fehlender Gesetzesgrundlagen (nachfolgend aufgeführt) ist der Bau der Anlage genehmigungsfrei.
  - o Wasserrecht: kein Einleitungs-/Benutzungstatbestand (Vgl. § 9 WHG u. § 15 LWG) entsprechend keine Genehmigungserfordernis nach § 8 WHG), Anlagenkapazität <8  $\text{m}^3/\text{d}$  keine Anlagengenehmigung (Vgl. § 62 Abs. 1 Nr. 1 LWG).
  - o Baurecht: Abwasserbeseitigungsanlagen auf Grundstücken sind genehmigungsfrei (Vgl. §62 Abs. 1 Nr. 3c LBauO). Behälter und Wasserbecken sind im Innenbereich bis zu einer Größe von 50  $\text{m}^3$  bzw. 10<sup>3</sup> (wassergefährdende Stoffe) oder bei Wasserbecken bis 100  $\text{m}^3$  genehmigungsfrei (Vgl. §62 Abs. 1 Nr. 5 a u. b LBauO). Im Außenbereich sind Behälter bis 50  $\text{m}^3$  bzw. 10<sup>3</sup> (wassergefährdende Stoffe) genehmigungsfrei, wenn sie einem land-, forstwirtschaftlichen oder

gartenbaulichen Betrieb dienen, Wasserbecken sind nicht genehmigungsfrei (Vgl. §62 Abs. 1 Nr. 5 a u. b LBauO).

- Landespflege: denkbar wäre Bewertung des Bauvorhabens als Eingriff (§ 14 BNatSchG und § 6 LNatSchG). Zuständige Behörde hat dies jedoch verneint. Folglich keine Genehmigung nach § 17 Abs. 3 BNatSchG notwendig.

- Daher ist auch eine Abstimmung mit der Struktur- und Genehmigungsbehörde entfallen, da es aus deren Sicht kein Genehmigungserfordernis gibt.

Überwachung: Die VG ist zur Überwachung der Anlage verpflichtet (vgl. §59 Abs. 2 LWG). Sie beprobt die Ablaufwerte der Pflanzenkläranlage in unregelmäßigen Abständen (obwohl das System durch den Verdunstungsteich abflusslos ist). Nach bisherigen Messergebnissen erfüllt die Anlage sämtliche Anforderungen hervorragend. Die Beprobungen der Verbandsgemeinde am Ablauf des Grauwasserbodenfilters werden zumindest für diesen Betriebspunkt auch in Zukunft Aussagen über die Langzeitstabilität des Betriebes erlauben, wobei eine etwas intensivere Beprobung im Monitoring und die Hinzuziehung der Qualitätsprüfungen der gewonnenen Produkte sicherlich wünschenswert wäre.

## 5. Öffentlichkeitsarbeit und Publikationen

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Filme in Zusammenarbeit mit Campus TV der TU Kaiserslautern erstellt, jeweils ein fünfminütiger Film zur Erläuterung des Gesamtkonzepts und eine lange Version von 25 Minuten zur Dokumentation des Projektes. Dabei wird das Konzept, der nachhaltige Umgang mit Ressourcen und die technische Umsetzung nachhaltiger Abwasserinfrastrukturen am Beispiel des Reinighofs vorgestellt. Die Filme sollen weiteren Interessenten Anregungen für eigene Projekte geben und dazu beitragen, sich bewusst mit der Ressource Abwasser auseinanderzusetzen. Da die Filme im Internet verfügbar sind, kann sich jede interessierte Person über das Projekt und die Hintergründe informieren. Der Kurzfilm ist abrufbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=aRuNxGPQF3c>. Der Langfilm ist abrufbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=5A7YOkvqKsE>. Beide Filme sind auch auf der Homepage des Fachgebietes Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung unter <https://www.bauing.uni-kl.de/wir/forschung-projekte/projekte-detailansicht/news/detail/News/projekt-reinighof/> zu finden.

Die Filme werden auch in der Lehre des Fachgebiets Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung der TU Kaiserslautern eingesetzt. In den Vorlesungen Ressourceneffiziente Siedlungswasserwirtschaft (Bachelor) und Verfahrenstechnik der Ressourcenrückgewinnung (Master) werden das Konzept sowie die Funktionsweise und Bemessung der Anlagen besprochen. Außerdem wurden Bachelorarbeiten zum Thema „Urinbehandlung und Nährstoffrecycling im Umfeld dezentraler Behandlungssysteme“ von Wanzhen Chen (2017) und zum Thema „Phosphorrückgewinnung aus Urin im Umfeld dezentraler Behandlungssysteme“ von Yujia Lin (2019) erstellt. Im Rahmen einer Lehrveranstaltung von Dr. Ingo Bruch an der Cusanus Hochschule wurde eine Exkursion mit einer Studentengruppe zur Besichtigung der Anlage auf dem Reinighof durchgeführt. Durch die Verbreitung der Informationen zum Projekt und der Erkenntnisse aus dem Projekt wird gerade bei den jungen Ingenieuren und Ingenieurinnen, die die Zukunft der Siedlungswasserwirtschaft in ihrem Beruf gestalten werden, ein Verständnis für die Herausforderungen im ländlichen Raum und für die Ressource Abwasser sowie für Lösungsstrategien geschaffen. Da an den studentischen Projekten und Veranstaltungen auch internationale Studierende teilnehmen, wird eine Verbreitung des Wissens auch über den deutschen Sprachraum hinaus erwartet.

Am 29.07.2019 waren die „Dienstanfänger Referentinnen/Referenten Wasserwirtschaft“ vom Umweltministerium Baden-Württemberg (ca. 10 TeilnehmerInnen) im Rahmen einer „Fachexkursion Dezentrale Abwasserbehandlung mit Ressourcenrückgewinnung“ auf dem Reinighof. Die Exkursion am Reinighof ist bei den TeilnehmerInnen sehr gut angekommen und diese haben großes Interesse an den vorgestellten Lösungen zur Ressourcenrückgewinnung gezeigt. Auch die Dringlichkeit zur Schaffung von Rechtssicherheit zu diesem Thema wurde thematisiert und positiv aufgenommen.

Der Reinighof wird regelmäßig von verschiedenen Besuchergruppen, z.B. TeilnehmerInnen an Kursen und Seminaren des Reinighofs, Wanderern und Touristen des Naturparks Pfälzer Wald, Kinder-, Jugend- und Familiengruppen auf dem Zeltplatz etc. besucht. Dabei nutzen die Besucher und Besucherinnen die Trockentrenntoiletten und werden über die spezifische Behandlung sowie die Ressourcenrückgewinnung von den getrennten Abwasserteilströmen informiert. Dies trägt zu einer Verbreitung der Thematik auch außerhalb der Fachwelt bei und zu einer Sensibilisierung für die Ressourcen Wasser und Abwasser. Darüber hinaus sind FÖJ vom Reinighof und zeitweise der TUK aktiv beteiligt an dem Betrieb der Abwasseranlagen.

Auch die Presse ist auf die Thematik aufmerksam geworden, z.B. mit einem Artikel „Urinreaktor geht bald in Betrieb“ in „Die Rheinpfalz“ siehe [https://www.rheinpfalz.de/startseite\\_artikel,-urinreaktor-geht-bald-in-betrieb-aid,1256262.html](https://www.rheinpfalz.de/startseite_artikel,-urinreaktor-geht-bald-in-betrieb-aid,1256262.html)

Im wissenschaftlichen Bereich ist aus dem Projekt der Fachartikel ‘Development of a Self-Sustaining Wastewater Treatment with Phosphorus Recovery for Small Rural Settlements’ im Journal Sustainability 2021 (13), Special Issue "Intelligent Rural Areas—Novel Solutions for Sustainability and Livability" veröffentlicht worden. An der Tagung „Scheißkongress“ des NetSan e.V. in Frankfurt am Main vom 23.-24.11.2019 haben Thomas Kölsch vom Reinighof und Jingsi Xiao von der TU Kaiserslautern teilgenommen, dabei hat Jingsi Xiao einen Vortrag über das Projekt Reinighof gehalten.

Außerdem wurde über das Projekt im Tagungsband von 39. Assistententreffen der deutschsprachigen siedlungswasserwirtschaftlichen Institute (2018) berichtet sowie auf der Ostergrußkarte (2020) des Instituts Wasser Infrastruktur Ressourcen der TU Kaiserslautern, wodurch mehreren hundert Fachleuten im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft erreicht werden.

## 6. Fazit

Das vorliegende Projekt hat gezeigt, dass die Umsetzung eines autarken, ressourcenorientierten Abwasserentsorgungskonzeptes im ländlichen Raum auch unter schwierigen Randbedingungen, wie fehlendem Vorfluter und nur begrenzter Verfügbarkeit von Strom, möglich ist. Durch die Trennung von Grauwasser, Urin und Fäzes wurden die Teilströme entsprechend ihrer jeweiligen Belastung und ihres Ressourcenpotenzials gezielt behandelt, wobei Urin sich hervorragend für die Produktion des Mineraldüngers MAP eignet.

Die Kompostierung von Fäzes zur Hygienisierung und anschließenden Nutzung des Kohlenstoffs und der Nährstoffe hat im zweistufigen Prozess gut funktioniert, Fäkalkeime konnten erheblich reduziert werden. Allerdings weist der abgelagerte Kompost immer noch E. coli, Coliforme Bakterien und Enterokokken in der Größenordnung  $10^5$  Keime/g Feuchtmasse auf, so dass ein Einsatz zur Bodenverbesserung z.B. für Hecken- und Baumpflanzungen empfohlen wird, nicht aber für die Nahrungsmittelproduktion. Sollte dies angestrebt werden, bedarf es weiterer Anstrengungen zur Hygienisierung des Materials.

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen, ein einfach zu betreibendes System zur Gewinnung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) aus Urin zu entwickeln, welches auch ohne den Einsatz von Messtechnik nur nach festgelegter Arbeitsanleitung den im Urin enthaltenen Phosphor weitestgehend, d.h. über 90% häufig über 99% aus der flüssigen Phase entfernt und in den wertvollen Dünger MAP (Struvit) überführt. Ein weiterer Kernbaustein des Projektes war die Entwicklung und Erprobung einer Behandlungsstufe für den nach der MAP-Fällung verbleibenden stickstoffhaltigen Überstand. Dazu wurde ein Spezialbodenfilter (SBF) mit zeolithhaltigem Lavasand als Substrat gebaut. Im mittlerweile mehrjährigen Betrieb konnte eindrucksvoll belegt werden, dass trotz extrem hoher Ammoniumkonzentrationen von mehreren tausend mg/L eine stabile Nitrifikation erzielt werden konnte, wodurch die Ammoniumkonzentrationen auf einige 100 mg/L gesenkt werden, so dass der Ablauf des Spezialbodenfilters dem Grauwasserbodenfilter zugeführt werden kann.

Mit der Kombination aus MAP- Fällung und diesen zwei Bodenfiltersystemen war es möglich, dauerhaft und auch bei tiefen Temperaturen im Winter sehr niedrige Ablaufkonzentrationen bezüglich CSB, Ammonium und Phosphor zu erzielen. Im nachgeschalteten Verdunstungsteich konnte Nitrat weiter reduziert werden.

Dieses ressourcenorientierte abflusslose Abwassersystem führt zu einer effizienten Nährstoffrückgewinnung insbesondere von Phosphor und weist eine hervorragende Reinigungsleistung auf. Da der im Urin enthaltene Stickstoff jedoch nur zu einem geringen Anteil mit dem MAP zurückgewonnen wird, könnten weitere Forschungen und Entwicklungen zur Rückgewinnung höherer Stickstoffanteile die Ressourceneffizienz noch steigern.

Neben den klassischen Abwasserinhaltsstoffen wurde anhand von zwei Messkampagnen aufgezeigt, dass Arzneimittelrückstände in den Endprodukten MAP und Kompost nicht mehr nachzuweisen sind, wobei bereits im Urin nur geringe Mengen einzelner Arzneimittel gefunden wurden. Allerdings wurden, um den Verbleib der organischen Substanzen im System dennoch ermitteln zu können, neben Arzneimitteln auch natürliche Hormone und deren Transformationsprodukte sowie typische Urininhaltsstoffe mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften, z.B. aliphatische und aromatische Verbindungen, analysiert. Auch diese Substanzen waren im getrockneten MAP mit Ausnahme von Cholesterin, das in sehr niedrigen Konzentrationen noch im MAP gefunden wurde, nicht mehr nachweisbar. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das gewonnene MAP auch bei Einsatz eines stärker medikamentenbelasteten Urins weitgehend frei von organischen Schadstoffen ist und unbedenklich als Dünger eingesetzt werden kann, da auch nur vereinzelt Fäkalkeime mit deutlich

weniger als 10 KBE/g MAP gefunden wurden und Viren (als Coliphagen bestimmt), im MAP nicht nachgewiesen wurden.

Verglichen mit konventionellen Sanitär- und Abwasserentsorgungssystemen ist der Aufwand, den die BewohnerInnen aufbringen müssen, deutlich höher. Vor allem die Entleerung der Toiletten und die Vorbereitung der Kompostierung sind zeitaufwändig und nicht die angenehmste Arbeit. Hier bedarf es zukünftig der Entwicklung einfacher teilautomatisierter Lösungen. Hinzu kommt im Normalbetrieb alle zwei Wochen der Zeitaufwand für die MAP Fällung. Dennoch nehmen die BewohnerInnen diese Arbeiten aufgrund der Vorteile des Gesamtkonzeptes in Kauf. Vorteile sind z.B., dass der einwohnerspezifische Energieverbrauch mit 3,5 (Bezug 16 E) bis max. 7 kWh/(E\*a) (hohe Wert: Bezug 8 E trotz zahlreicher BesucherInnen) sehr gering ist. Da der Strom aus einer eigenen Photovoltaikanlage stammt, entstehen durch den Stromverbrauch keine Treibhausgasemissionen. Die Betriebskosten sind mit 85,- €/a bzw. knapp 11,- €/E\*a für das Magnesiumoxid sehr niedrig. Mögliche Erlöse für MAP sind hier nicht mit einberechnet. Ein großer Vorteil des Systems ist die Gewinnung von Kompost und vor allem des lagerfähigen mineralischen Langzeitdüngers MAP. Vorteilhaft an dem umgesetzten Konzept ist auch der deutlich geringere Trinkwasserbedarf durch den Einsatz von Trockentrenntoiletten.

Das am Reinighof verwendete System ist autark ohne eine zentrale Abwasserreinigung als Back-up zu haben. Die Akzeptanz des ressourceneffizienten dezentralen Abwasserbehandlungssystems bei den BewohnerInnen und BesucherInnen auf dem Reinighof war überwiegend sehr gut. Die Idee, das Konzept und die Technologien des innovativen Behandlungskonzeptes wurden u.a. durch vielfältige Veranstaltungen auf dem Reinighof, durch Exkursionen und Dokumentationsfilme sowie in Lehrveranstaltungen und Fachveröffentlichungen, vorgestellt und sind dort jeweils auf reges Interesse gestoßen. Dadurch wird mittelfristig die Umsetzung solcher, an die jeweiligen Gegebenheiten angepasster, ressourcenorientierter Sanitärsysteme im ländlichen Raum für Einzelanwesen, Hütten etc. befördert werden.

## Literaturangaben

- [1] Abschlussbericht-Projekt Saniresch, Winker, M. u. Rieck, C., 2013
- [2] Wissenschaftliches Begleitprogramm zur Bestimmung und Bewertung von Arzneimittelstoffen aus Urin und Komposttoiletten von Großveranstaltungen, Steinmetz, H., Pittmann, T. u. Kuch, B., Stuttgart 2015
- [3] Der Emscherquellhof - Zeitzeuge einer Flussgeschichte, Emscherogenossenschaft, 2013
- [4] Zukunftsfähiges Abwassermanagement im ländlichen Raum?, Wupperverband, Wuppertal 2003
- [5] Etter, B., Tilley, E., Khadka, R. u. Udert, K. M.: Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal. *Water research* 45 (2011) 2, S. 852–862
- [6] VUNA: Valorisation of urine nutrient--Promoting Sanitation & Nutrient Recovery through Urine Separation. Final Project report (2015)
- [7] Low-cost Rotating Biological Contactor, M. Zandee, B. Etter, K. Udert, 2011
- [8] Dosta, J., Fernández, I., Vázquez-Padín, J. R., Mosquera-Corral, A., Campos, J. L., Mata-Alvarez, J. u. Méndez, R.: Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process. *Journal of hazardous materials* 154 (2008) 1-3, S. 688–693
- [9] Sobotka, D., Czerwionka, K. u. Makinia, J.: Influence of temperature on the activity of anammox granular biomass. *Water Science and Technology* 73 (2016) 10, S. 2518–2525
- [10] Antonini, S., Nguyen, P. T., Arnold, U., Eichert, T. u. Clemens, J.: Solar thermal evaporation of human urine for nitrogen and phosphorus recovery in Vietnam. *The Science of the total environment* 414 (2012), S. 592–599
- [11] Antonini, S., Paris, S., Eichert, T. u. Clemens, J.: Nitrogen and Phosphorus Recovery from Human Urine by Struvite Precipitation and Air Stripping in Vietnam. *CLEAN - Soil, Air, Water* 39 (2011) 12, S. 1099–1104
- [12] DWA A 262: Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Kläranlagen mit bepflanzten und unbepflanzten Filtern zur Reinigung häuslichen und kommunalen Abwassers. DWA-Regelwerk, A 262. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall 2017
- [13] Bewachsene Bodenfilter als Verfahren der Biotechnologie. Abschlussbericht im Rahmen des DBU-Verbundprojekts „Bewachsene Bodenfilter“. AZ 14178-01, G. Fehr, G. Geller, D. Goetz, U. Hagendorf, H. Kunst, H. Rustige und B. Welker, 2002
- [14] K. Kayser, S. Kunst und G. Fehr: Stickstoffelimination in bewachsenen Bodenfiltern. *Wasser & Boden* (2001) 53, S. 7–10
- [15] Bruch, I., Fritsche, J., Bänninger, D., Alewell, U., Sendelov, M., Hürlimann, H., Hasselbach, R. u. Alewell, C.: Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands. *Bioresource technology* 102 (2011) 2, S. 937–941
- [16] Bruch, I., Alewell, U., Hahn, A., Hasselbach, R. u. Alewell, C.: Influence of soil physical parameters on removal efficiency and hydraulic conductivity of vertical flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 68 (2014), S. 124–132
- [17] Website holzapfel-konsorten: <https://www.holzapfel-konsorten.de/index.php?id=97>. Zuletzt abgerufen am 14.03.2021
- [18] Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung. Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen. Dissertation, David Montag, 2008
- [19] Urinbehandlung und Nährstoffrecycling im Umfeld dezentraler Behandlungssysteme. Bachelorarbeit, Wanzhen Chen, 2017
- [20] Wagner, J. u. Wilke, S. (Hrsg.): Neuartige Sanitärsysteme. Begriffe, Stoffströme, Behandlung von Schwarz-, Braun-, Gelb-, Grau- und Regenwasser, stoffliche Nutzung. Weiterbildendes Studium - Wasser und Umwelt. Kromsdorf: Bauhaus-Univ.-Verl. 2015

- [21] DWA A 272: Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS). DWA-Regelwerk, A 272. Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e. V 2014
- [22] BioAbfV\_2017\_Bioabfallverordnung
- [23] Caroline Schönning u. Thor Axel Stenström: Guidelines for the Safe Use of Urine and Faeces in Ecological Sanitation System. 2004
- [24] Capdevielle, A., Sýkorová, E., Biscans, B., Béline, F. u. Daumer, M.-L.: Optimization of struvite precipitation in synthetic biologically treated swine wastewater--determination of the optimal process parameters. *Journal of hazardous materials* 244-245 (2013), S. 357–369
- [25] Krähenbühl, M., Etter, B. u. Udert, K. M.: Pretreated magnesite as a source of low-cost magnesium for producing struvite from urine in Nepal. *The Science of the total environment* 542 (2016) Pt B, S. 1155–1161
- [26] Phosphorrückgewinnung aus Urin im Umfeld dezentraler Behandlungssysteme. Bachelorarbeit, Yunjia Lin, 2019
- [27] DWA A 262: Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Kläranlagen mit bepflanzten und unbepflanzten Filtern zur Reinigung häuslichen und kommunalen Abwassers. DWA-Regelwerk, A 262. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall 2014
- [28] DWA A 272: Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Kläranlagen mit bepflanzten und unbepflanzten Filtern zur Reinigung häuslichen und kommunalen Abwassers. DWA-Regelwerk, A 262. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall 2017
- [29] Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV)
- [30] Paruch, A. M.: Effects of temperature, storage time and pH on survival of *Escherichia coli* in source-separated yellowwater. *Water and Environment Journal* 29 (2015) 1, S. 98–104
- [31] 28. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen. Stromverbrauch und Stromerzeugung, DWA, 2015

# Anhang

# A1: Lage- und Leitungsplan, Fließschema

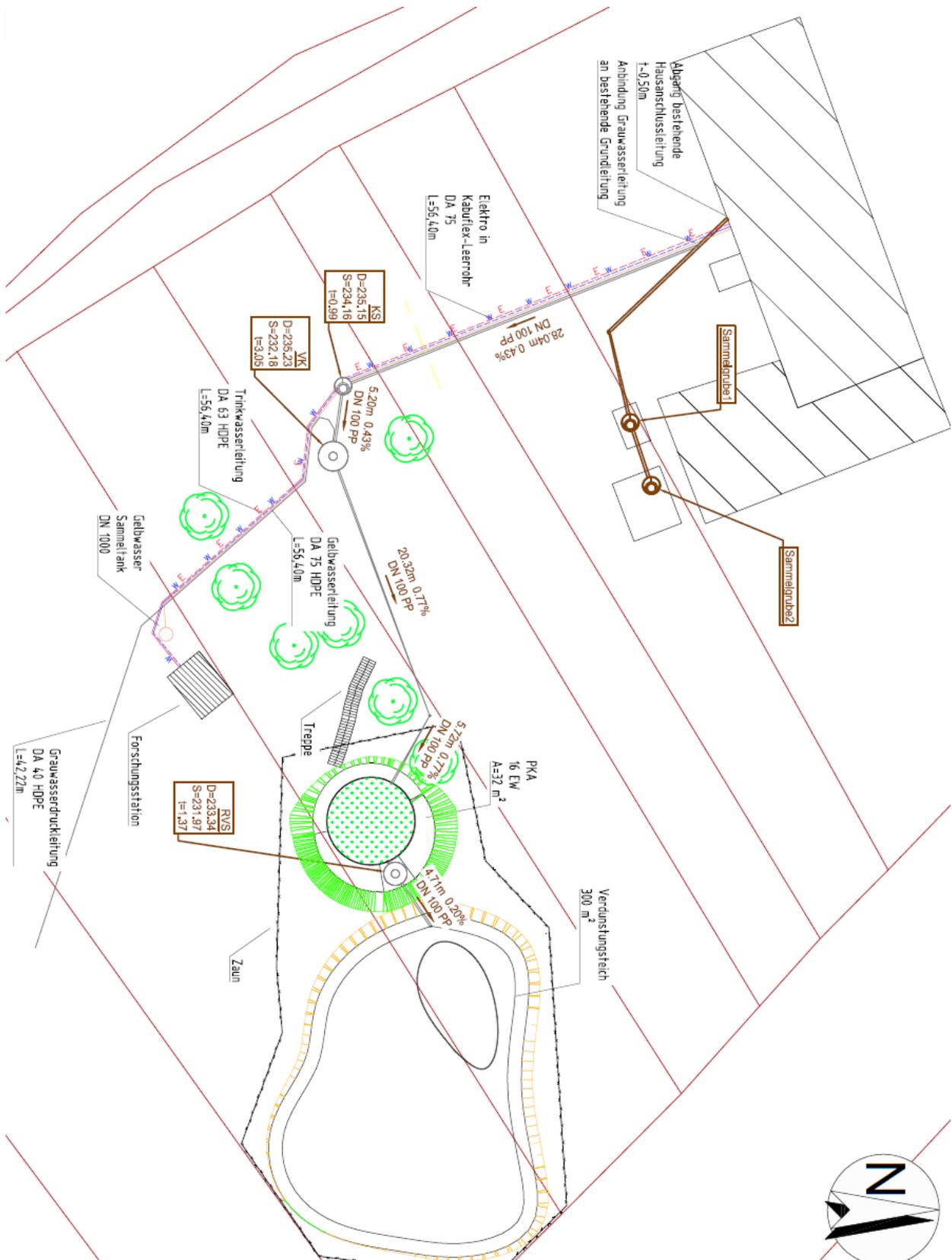


Abbildung A1.1: Lageplan des Reingehofs

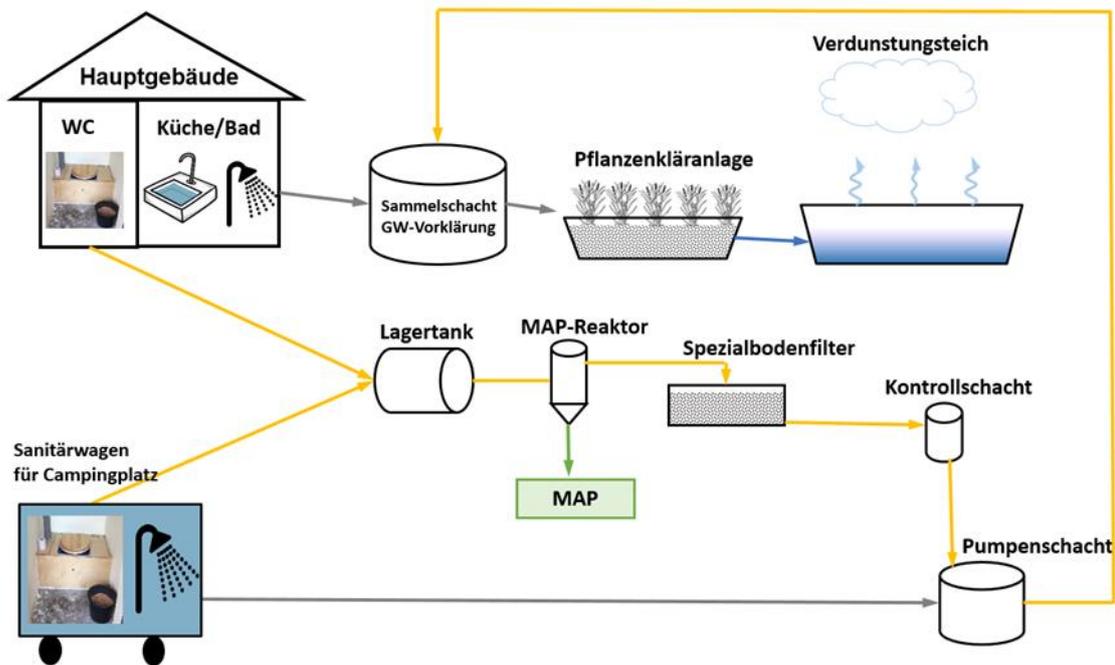


Abbildung A1.2: Fließschema der Abwasserlinie am Reinighof (Grauwasser und Urin)

## A2: Ergebnisse der Laborversuche zur Vorauswahl der Betriebsstrategie

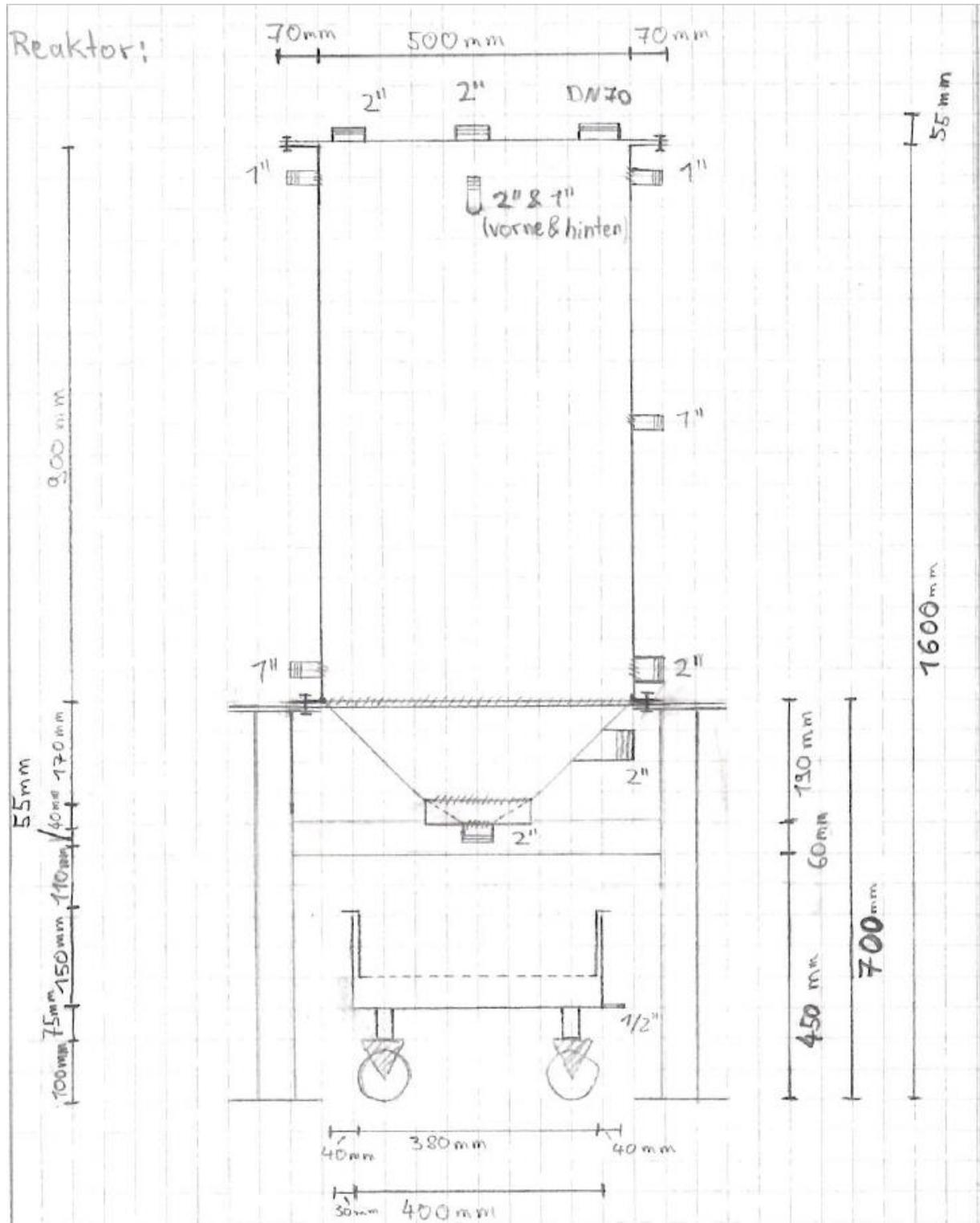
Tabelle A2: P-Fällungsgrad bei unterschiedlichen Randbedingungen (Bachelorarbeit, Chen, 2017) [19]

| Versuch Nr. | Füllungsweise | Temp. °C | pH-Wert | Drehzahl | P- Konzentration im Urin vor Fällung [PO <sub>4</sub> -P mg/L] | P- Konzentration im Urin nach Fällung [PO <sub>4</sub> -P mg/L] | P- Fällungsgrad |
|-------------|---------------|----------|---------|----------|--|---|-----------------|
| 1           | 1*800 ml      | 20       | 9,2     | 200 rpm  | 181,5  | 5,6   | 96,9%           |
| 2           | 1*800 ml      | 20       | 9,2     | 300 rpm  | 181,5  | 4,5   | 97,5%           |
| 3           | 2*400 ml      | 20       | 9,2     | 200 rpm  | 181,5  | 3,3   | 98,2%           |
| 4           | 2*400 ml      | 20       | 9,2     | 300 rpm  | 181,5  | 2,3   | 98,7%           |
| 5           | 1*800 ml      | 20       | 8,5     | 200 rpm  | 186,7  | 10,7  | 94,3%           |
| 6           | 1*800 ml      | 20       | 8,5     | 300 rpm  | 186,7  | 7,7   | 95,9%           |
| 7           | 1*800 ml      | 4        | 9,5     | 200 rpm  | 186,7  | 13,6  | 92,7%           |
| 8           | 1*800 ml      | 4        | 9,5     | 300 rpm  | 186,7  | 7,6   | 95,9%           |
| 9           | 1*800 ml      | 4        | 8,5     | 200 rpm  | 184,6  | 12,8  | 93,1%           |
| 10          | 1*800 ml      | 4        | 8,5     | 300 rpm  | 184,6  | 11,8  | 93,6%           |
| 11          | 2*400 ml      | 4        | 9,4     | 200 rpm  | 184,6  | 3,0   | 98,4%           |
| 12          | 2*400 ml      | 4        | 9,4     | 300 rpm  | 184,6  | 2,8   | 98,5%           |
| 13          | 2*400 ml      | 20       | 8,5     | 200 rpm  | 187,8  | 6,5   | 96,6%           |
| 14          | 2*400 ml      | 20       | 8,5     | 300 rpm  | 187,8  | 7,0   | 96,3%           |
| 15          | 2*400 ml      | 4        | 8,5     | 200 rpm  | 352,0  | 6,7   | 98,1%           |
| 16          | 2*400 ml      | 4        | 8,5     | 300 rpm  | 352,0  | 4,0   | 98,9%           |



#### A4: Abmessungen des MAP-Reaktors

| Zylinderteil           |    |       | Trichterstein     |    |      |
|------------------------|----|-------|-------------------|----|------|
| Durchmesser            | cm | 49,2  | obere Durchmesser | cm | 49,2 |
| Höhe, h1               | cm | 90,0  | Gefälle           | °  | 45,0 |
| Volumen Zylinder       | L  | 171,1 | Höhe bis Boden    | cm | 17,0 |
| Gesamtvolumen: 186,2 L |    |       | Volumen Trichter  | L  | 15,1 |



## A5: Fotoprotokoll der Bauphase



Abbildung A 4.29: linksoben: Schacht für Urinleitung und Trinkwasserleitung neben dem Forschungshaus; linksunten: Aushub für den Beton-Schacht unter dem Forschungshaus; rechts: Einbringen des Beton-Schachtes



Abbildung A4.30: links: Fundament für das Forschungshaus; rechts: Baustelle Forschungshaus



Abbildung A4.31: linksoben: Forschungshaus im Bau; linksunten: Urinlagertank im Betonschacht; rechts: Abluftleitung vom Urinlagertank über das Dach des Forschungshauses



Abbildung A4.32: links: Sanitärwagen auf dem Campingplatz; rechts: Grauwasserleitung und Urinleitung vom Sanitärwagen

A6: Kompostanlage zur Fäzesbehandlung



A7: Verwendete Messmethoden (Bezug Tabelle 5)

| Parameter                        | Probe | Wo      | Methode   | Bemerkungen                          |
|----------------------------------|-------|---------|---|--------------------------------------|
| pH/Temp.                         | homo. | Vor Ort | WTW Cond 3110   |                                      |
| Leitfähigkeit                    | homo. |         | Messgerät   |                                      |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P | mf)   | Vor Ort | LCK 348 for 0.5–5.0 mg/L PO4-P,                               | Probe Verdünnung und Temperierung in |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N  | mf.   | Vor Ort | Teststäbchen/<br>ggf. LCK LCK 339 for<br>0.23–13.5 mg/L NO3-N | Teststäbchen zeigt ab 2,3 mg NO3-N/L |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N  | mf.   | Vor Ort | Teststäbchen/<br>LCK 342 for 0.6–6.0 mg/L NO2-N               | Teststäbchen zeigt ab 0,6 mg NO2-N/L |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P | mf    | Labor   | DIN_EN_ISO_6878   | Probe 10-Fach Verdünnung             |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N  | mf.   | Labor   | IC (Metrohm 930 Compact IC Flex)                              | Probe Stabilisierung durch HNO3      |
| Mg <sup>2+</sup>                 | mf.   | Labor   | IC (Ionenchromatography)                                      |                                      |
| Ca <sup>2+</sup>                 | mf.   | Labor   | IC  |                                      |
| Na <sup>+</sup>                  | mf.   | Labor   | IC  |                                      |
| K <sup>+</sup>                   | mf.   | Labor   | IC  |                                      |
| Ges. P                           | homo. | Labor   | DIN_EN_ISO_6878   |                                      |
| Ges. N                           | homo. | Labor   | DIN DIN_12260   |                                      |

mf.: Membranfiltriert durch 0,45 µm

## A8: Füllstand im Urintank

Hinweis: Da keine exakte Ausliterung durch den Hersteller erfolgte, wurde von einem einfachen Zylinder mit den Maßangaben des Herstellers zur Berechnung des Volumens ausgegangen.

|                    |   |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Füllstand</b>   | h | [m] | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 |
| <b>Füllvolumen</b> | V | [l] | 17   | 47   | 85   | 129  | 176  | 225  | 277  | 329  |
| <b>Füllstand</b>   | h | [m] | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 0,80 |
| <b>Füllvolumen</b> | V | [l] | 382  | 433  | 483  | 531  | 575  | 614  | 645  | 665  |

| Zeit       |                 | Füllstand        |                    | Entnahmevolumen              |
|------------|-----------------|------------------|--------------------|------------------------------|
| Datum      | Dauer<br>dt [d] | Gemessen<br>h[m] | Rate<br>dV/dt[L/d] | Bei jeder MAP-Fällung<br>[L] |
| 11.10.2018 |                 | 0,04             | -                  | -                            |
| 15.10.2018 | 4               | 0,14             | 16,2               | -                            |
| 22.10.2018 | 7               | 0,23             | 11,3               | -                            |
| 30.10.2018 | 8               | 0,35             | 15,0               | -                            |
| 05.11.2018 | 6               | 0,45             | 17,5               | -                            |
| 07.11.2018 | 2               | 0,50             | 25,8               | -                            |
| 07.11.2018 | 0               | 0,43             | -                  | 160                          |
| 12.11.2018 | 5               | 0,48             | 10,4               | -                            |
| 16.11.2018 | 4               | 0,50             | 5,1                | -                            |
| 16.11.2018 | 0               | 0,37             | -                  | 160                          |
| 19.11.2018 | 3               | 0,43             | 21,0               | -                            |
| 20.11.2018 | 1               | 0,45             | 20,9               | 160                          |
| 27.11.2018 | 7               | 0,53             | 11,7               | -                            |
| 27.11.2018 | 0               | 0,36             | -                  | 160                          |
| 04.12.2018 | 7               | 0,41             | 7,5                | -                            |
| 04.12.2018 | 0               | 0,24             | -                  | 160                          |
| 11.12.2018 | 7               | 0,31             | 9,9                | -                            |
| 17.12.2018 | 6               | 0,36             | 8,6                | -                            |
| 17.12.2018 | 0               | 0,19             | -                  | 160                          |
| 23.12.2018 | 6               | 0,29             | 15,9               | -                            |
| 31.12.2018 | 8               | 0,37             | 10,3               | -                            |
| 07.01.2019 | 7               | 0,47             | 15,0               | -                            |
| 09.01.2019 | 2               | 0,50             | 15,4               | -                            |
| 14.01.2019 | 5               | 0,58             | 15,8               | -                            |
| 16.01.2019 | 2               | 0,58             | -                  | -                            |
| 16.01.2019 | 0               | 0,41             | -                  | 160                          |
| 22.01.2019 | 6               | 0,48             | 12,2               | -                            |
| 29.01.2019 | 7               | 0,57             | 12,9               | -                            |
| 29.01.2019 | 0               | 0,40             | -                  | 160                          |
| 04.02.2019 | 6               | 0,46             | 10,5               | -                            |
| 11.02.2019 | 7               | 0,52             | 8,8                | -                            |
| 12.02.2019 | 1               | 0,54             | 20,0               | -                            |
| 12.02.2019 | 0               | 0,37             | -                  | 160                          |

| Zeit       | Zeit   | Füllstand |            | Entnahmevolumen       |
|------------|--------|-----------|------------|-----------------------|
| Datum      | Dauer  | Gemessen  | Rate       | Bei jeder MAP-Fällung |
| -          | dt [d] | h[m]      | dV/dt[L/d] | [L]                   |
| 26.02.2019 | 7      | 0,56      | 14,4       | -                     |
| 26.02.2019 | 0      | 0,43      |            | 160                   |
| 05.03.2019 | 7      | 0,51      | 11,8       |                       |
| 05.03.2019 | 0      | 0,34      |            | 160                   |
| 12.03.2019 | 7      | 0,44      | 15,0       |                       |
| 19.03.2019 | 7      | 0,57      | 18,8       |                       |
| 26.03.2019 | 7      | 0,75      | 20,4       |                       |
| 26.03.2019 | 0      | 0,54      |            | 160                   |
| 02.04.2019 | 7      | 0,68      | 17,9       |                       |
| 02.04.2019 | 0      | 0,49      |            | 160                   |
| 09.04.2019 | 7      | 0,63      | 19,2       |                       |
| 16.04.2019 | 7      | 0,80      | 15,4       |                       |
| 16.04.2019 | 0      | 0,63      |            | 160                   |
| 23.04.2019 | 7      | 0,80      | 15,4       |                       |
| 23.04.2019 | 0      | 0,60      |            | 160                   |
| 29.04.2019 | 6      | 0,70      | 13,8       |                       |
| 29.04.2019 | 0      | 0,51      |            | 160                   |
| 01.05.2019 | 2      | 0,56      | 24,8       |                       |
| 01.05.2019 | 0      | 0,38      |            | 160                   |
| 06.05.2019 | 5      | 0,49      | 23,0       |                       |
| 06.05.2019 | 0      | 0,33      |            | 160                   |
| 07.05.2019 | 1      | 0,35      | 20,7       |                       |
| 07.05.2019 | 0      | 0,18      |            | 160                   |
| 14.05.2019 | 7      | 0,32      | 19,3       |                       |
| 14.05.2019 | 0      | 0,14      |            |                       |
| 27.05.2019 | 13     | 0,44      | 22,6       |                       |
| 04.06.2019 | 8      | 0,58      | 17,6       |                       |
| 09.06.2019 | 5      | 0,80      | 30,7       |                       |
| 09.06.2019 | 0      | 0,57      |            | 160                   |
| 11.06.2019 | 2      | 0,63      | 27,5       |                       |
| 11.06.2019 | 0      | 0,45      |            | 160                   |
| 18.06.2019 | 7      | 0,58      | 18,7       |                       |
| 18.06.2019 | 0      | 0,41      |            | 160                   |
| 25.06.2019 | 7      | 0,52      | 16,3       |                       |
| 02.07.2019 | 7      | 0,67      | 19,6       |                       |
| 02.07.2019 | 0      | 0,44      |            | 160                   |
| 09.07.2019 | 7      | 0,54      | 14,6       |                       |
| 09.07.2019 | 0      | 0,39      |            | 160                   |
| 16.07.2019 | 7      | 0,47      | 12,0       |                       |
| 23.07.2019 | 7      | 0,56      | 13,0       |                       |
| 23.07.2019 | 0      | 0,40      |            | 160                   |
| 29.07.2019 | 6      | 0,53      | 22,4       |                       |

| 29.07.2019   | 0                       | 0,36                     |                            | 160                                  |
|--------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| <b>Zeit</b>  | <b>Zeit</b>             | <b>Füllstand</b>         |                            | <b>Entnahmemengen</b>                |
| <b>Datum</b> | <b>Dauer<br/>dt [d]</b> | <b>Gemessen<br/>h[m]</b> | <b>Rate<br/>dV/dt[L/d]</b> | <b>Bei jeder MAP-Fällung<br/>[L]</b> |
| 06.08.2019   | 8                       | 0,52                     | <b>20,8</b>                |                                      |
| 12.08.2019   | 6                       | 0,80                     | <b>35,3</b>                |                                      |
| 12.08.2019   | 0                       | 0,58                     |                            | 160                                  |
| 14.08.2019   | 2                       | 0,59                     | <b>4,7</b>                 |                                      |
| 14.08.2019   | 0                       | 0,44                     |                            | 160                                  |
| 19.08.2019   | 5                       | 0,80                     | <b>58,9</b>                |                                      |
| 19.08.2019   | 0                       | 0,60                     |                            | 160                                  |
| 27.08.2019   | 8                       | 0,80                     | <b>16,8</b>                |                                      |
| 27.08.2019   | 0                       | 0,60                     |                            | 160                                  |
| 03.09.2019   | 7                       | 0,80                     | <b>19,2</b>                |                                      |
| 03.09.2019   | 0                       | 0,60                     |                            | 160                                  |
| 04.09.2019   | 1                       | 0,63                     | <b>26,9</b>                |                                      |
| 04.09.2019   | 0                       | 0,48                     |                            | 160                                  |
| 11.09.2019   | 7                       | 0,59                     | <b>15,6</b>                |                                      |
| 11.09.2019   | 0                       | 0,42                     |                            | 160                                  |
| 17.09.2019   | 6                       | 0,49                     | <b>12,1</b>                |                                      |
| 25.09.2019   | 8                       | 0,66                     | <b>20,0</b>                |                                      |
| 25.09.2019   | 0                       | 0,48                     |                            | 160                                  |
| 30.09.2019   | 5                       | 0,80                     | <b>50,6</b>                |                                      |
| 30.09.2019   | 0                       | 0,61                     |                            | 160                                  |
| 07.10.2019   | 7                       | 0,80                     | <b>17,9</b>                |                                      |
| 07.10.2019   | 0                       | 0,65                     |                            | 160                                  |
| 08.10.2019   | 1                       | 0,70                     | <b>38,9</b>                |                                      |
| 08.10.2019   | 0                       | 0,51                     |                            | 160                                  |
| 14.10.2019   | 6                       | 0,71                     | <b>29,5</b>                |                                      |

A9: Zusammensetzung von Urin im Urintank während der Versuchsphase vom 16.11.2018 bis 21.01.2020

| Datum      | Temp. | LF    | pH  | PO <sub>4</sub> -P<br>(vor Ort) | PO <sub>4</sub> -P<br>(Labor) | Na <sup>+</sup> | NH <sub>4</sub> -N | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ges. P | Ges. N |
|------------|-------|-------|-----|---------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|----------------|------------------|------------------|--------|--------|
| -          | °C    | mS/cm | -   | mg/l                            | mg/l                          | mg/l            | mg/l               | mg/l           | mg/l             | mg/l             | mg/l   | mg/l   |
| 16.11.2018 | 12,5  | 34,7  | 7,9 | <b>282,2</b>                    | 306,0                         | 1978            | 5073               | 1616           | 7,2              | 1,7              | 419    | 5855   |
| 27.11.2018 | 10,5  | 34,3  | 9,4 | 196,9                           | 256,0                         | 1957            | 5155               | 1528           | 8,1              | n.a              | 422    | 5425   |
| 04.12.2018 | 10,4  | 36,2  | 9,3 | 273,2                           | 285,0                         | 2026            | 5365               | 1673           | 7,8              | 6,4              | 403    | 5520   |
| 17.12.2018 | 7,9   | 36,3  | 9,4 | 168,5                           | 310,7                         | 1897            | 5063               | 1856           | 8,9              | n.a              | 323    | 5375   |
| 16.01.2019 | 7,8   | 33,1  | 9,4 | 369,4                           | 365,1                         | 1757            | 4761               | 1781           | 5,2              | n.a              | 381    | 5435   |
| 29.01.2019 | 6,9   | 35,7  | 9,4 | 444,5                           | 431,9                         | 1887            | 4651               | 1714           | 6,9              | 2,1              | 375    | 5230   |
| 12.02.2019 | 6,8   | 34,0  | 9,4 | 382,7                           | 381,5                         | 1730            | 4612               | 1607           | 6,2              | 18,8             | 410    | 5435   |
| 26.02.2019 | 10,6  | 31,3  | 9,3 | 336,5                           | 363,0                         | 1882            | 4355               | 1658           | 6,3              | 0,0              | 366    | 5405   |
| 06.03.2019 | 8,1   | 32,3  | 9,4 | 383,6                           | 365,6                         | 1907            | 4540               | 1730           | 6,3              | 0,0              | 388    | 5365   |
| 26.03.2019 | 11,5  | 30,5  | 9,3 | 334,1                           | 335,5                         | 1816            | 4221               | 1568           | 5,7              | 0,0              | 375    | 4895   |
| 02.04.2019 | 11,5  | 30,5  | 9,3 | 318,2                           | 325,0                         | 1787            | 4149               | 1561           | 5,5              | 0,0              | 356    | 4750   |
| 16.04.2019 | 10,9  | 29,6  | 9,2 | 331,0                           | 325,0                         | 1949            | 3802               | 1535           | 13,8             | 0,0              | 366    | 4970   |
| 23.04.2019 | 12,7  | 29,0  | 9,2 | 344,8                           | 345,7                         | 1805            | 3942               | 1524           | 12,1             | 0,0              | 484    | 4930   |
| 29.04.2019 | 11,7  | 30,7  | 9,2 | 338,0                           | 329,3                         | 1730            | 4243               | 1513           | 6,2              | 0,0              | 381    | 4945   |
| 01.05.2019 | 12,8  | 30,0  | 9,2 | 338,3                           | 336,7                         | 1739            | 3883               | 1455           | 5,0              | 0,0              | 358    | 4615   |
| 06.05.2019 | 11,2  | 30,0  | 9,1 | 369,3                           | 366,2                         | 1707            | 3958               | 1537           | 4,9              | 0,2              | 378    | 5285   |
| 07.05.2019 | 12,1  | 29,7  | 9,3 | 316,9                           | 325,9                         | 1746            | 4053               | 1488           | 5,6              | 1,1              | 340    | 4766   |
| 14.05.2019 | 12,1  | 29,1  | 9,2 | 374,6                           | 335,0                         | 1695            | 3914               | 1456           | 14,5             | 0,0              | 335    | 4830   |
| 11.06.2019 | 14,9  | 31,0  | 9,2 | 332,2                           | 332,2                         | 1780            | 4339               | 1596           | 6,0              | 0,0              | 450    | 4320   |
| 18.06.2019 | 17,1  | 32,0  | 9,2 | 342,3                           | 337,3                         | 1735            | 4822               | 1615           | 14,1             | 0,2              | 438    | 4525   |
| 02.07.2019 | 18,3  | 30,5  | 9,2 | 356,1                           | 360,5                         | 1668            | 4473               | 1592           | 10,7             | 0,2              | 388    | 4525   |
| 09.07.2019 | 17,3  | 30,4  | 9,1 | 356,7                           | 346,5                         | 1604            | 4141               | 1486           | 8,3              | 0,0              | 363    | 4455   |
| 23.07.2019 | 18,9  | 32,1  | 9,0 | 358,8                           | 358,8                         | 1679            | 4600               | 1622           | 11,2             | 0,0              | 378    | 5095   |
| 29.07.2019 | 18,5  | 34,5  | 9,0 | 456,5                           | 436,2                         | 1919            | 5167               | 1693           | 7,9              | 0,0              | 466    | 5640   |
| 13.08.2019 | 16,9  | 32,3  | 9,1 | 351,2                           | 366,7                         | p.f.            | p.f.               | p.f.           | p.f.             | p.f.             | 378    | 4743   |
| 14.08.2019 | 16,2  | 30,5  | 9,1 | 353,4                           | 339,2                         | 1792            | 4278               | 1533           | 9,4              | 0,0              | 366    | 3995   |
| 20.08.2019 | 19,0  | 29,1  | 9,1 | 305,4                           | 316,1                         | 1619            | 4177               | 1542           | 5,7              | 0,0              | p.f.   | p.f.   |
| 27.08.2019 | 18,9  | 30,4  | 9,1 | 355,1                           | 319,7                         | 1548            | 3657               | 1367           | 18,8             | 0,0              | 384    | 3995   |
| 25.09.2019 | 17,4  | 25,6  | 9,1 | 268,9                           | 258,6                         | 1561            | 3433               | 1523           | 8,3              | 0,0              | 266    | 3525   |
| 08.10.2019 | 14,8  | 27,0  | 9,1 | 331,8                           | 285,8                         | 1573            | 3509               | 1420           | 9,8              | 0,0              | 338    | 3825   |
| 06.11.2019 | 11,9  | 27,9  | 9,2 | 263,9                           | 264,0                         | 1457            | 3781               | 1489           | 10,0             | 0,0              | 303    | 3855   |
| 20.11.2019 | 11,0  | 32,1  | 9,2 | 325,4                           | 347,1                         | 1869            | 4319               | 1655           | 10,8             | 0,0              | 359    | 4463   |
| 04.12.2019 | 10,4  | 33,1  | 9,2 | 294,8                           | 313,7                         | 1627            | 3892               | 1611           | 9,9              | 0,0              | 313    | 3950   |
| 17.12.2019 | 9,6   | 32,9  | 9,2 | 335,0                           | 336,9                         | 1782            | 4133               | 1537           | 8,6              | 0,0              | 336    | 4230   |
| 07.01.2020 | 9,8   | 33,0  | 9,2 | 289,3                           | 296,7                         | 1730            | 3883               | 1488           | 9,9              | 0,0              | 303    | 3950   |
| 21.01.2020 | 9,6   | 30,8  | 9,2 | 271,3                           | 261,5                         | 1739            | 3958               | 1561           | 8,6              | 0,0              | 275    | 4230   |

n.a.: nicht angegeben

p.f.: Probe fehlt



### A10: P-Konzentrationen während der MAP-Fällungsversuche

P-Konzentrationen im Überstand bei 2 Versuchen am 26.02.2019 und 05.03.2019 mit langsamer Zugabe von technischem MgO als Pulver, Mg:P=2,0 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>26.02.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 13:35   | 366,5          |
| Ende MgO Zugabe        | 13:42   |                |
| Probenahme P1-1        | 13:45   | 296,6          |
| Probenahme P1-2        | 14:00   | 234,4          |
| Probenahme P1-3        | 14:15   | 192,1          |
| Probenahme P1-4        | 14:30   | 158,2          |
| Probenahme P1-5        | 14:45   | 140,3          |
| Probenahme P1-6        | 15:00   | 122,6          |
| Probenahme P1-7        | 15:15   | 112,9          |

| <b>05.03.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:25   | 383,6          |
| Ende MgO Zugabe        | 12:33   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:35   | 288,6          |
| Probenahme P1-2        | 12:50   | 235,4          |
| Probenahme P1-3        | 13:05   | 213,1          |
| Probenahme P1-4        | 13:20   | 195,1          |
| Probenahme P1-5        | 13:35   | 175,1          |
| Probenahme P1-6        | 13:57   | 145,1          |
| Probenahme P1-7        | 14:30   | 122,2          |
| Probenahme P1-8        | 15:00   | 93,6           |
| Probenahme P1-9        | 15:30   | 72,8           |
| Probenahme P1-10       | 16:00   | 59,3           |

P-Konzentrationen im Überstand bei 3 Versuchen im Zeitraum 26.03.2019 bis 16.04.2019 mit langsamer Zugabe von technischem MgO in Suspension, Mg P=2,0 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>26.03.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:50   | 334,1          |
| Ende MgO Zugabe        | 11:57   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:00   | 214,3          |
| Probenahme P1-2        | 12:16   | 151,6          |
| Probenahme P1-3        | 12:31   | 122,1          |
| Probenahme P1-4        | 12:45   | 96,7           |
| Probenahme P1-5        | 13:00   | 74,4           |
| Probenahme P1-6        | 13:15   | 55,2           |
| Probenahme P1-7        | 14:00   | 6,2            |

| <b>02.04.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:20   | 318,1          |
| Ende MgO Zugabe        | 11:27   |                |
| Probenahme P1-1        | 11:30   | 205,1          |
| Probenahme P1-2        | 11:45   | 145,3          |
| Probenahme P1-3        | 12:00   | 112,1          |
| Probenahme P1-4        | 12:15   | 76,4           |
| Probenahme P1-5        | 12:30   | 52,9           |
| Probenahme P1-6        | 12:46   | 30,2           |

| <b>16.04.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:50   | 331,0          |
| Ende MgO Zugabe        | 11:57   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:00   | 200,2          |
| Probenahme P1-2        | 12:15   | 131,3          |
| Probenahme P1-3        | 12:30   | 86,0           |
| Probenahme P1-4        | 12:45   | 51,6           |
| Probenahme P1-5        | 13:00   | 24,2           |
| Probenahme P1-6        | 13:10   | 8,2            |

P-Konzentrationen im Überstand bei 3 Versuchen im Zeitraum 23.04.2019 bis 01.05.2019 mit schneller Zugabe von technischem MgO in Suspension, Mg:P=2,0 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>23.04.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:50   | 474,2          |
| Ende MgO Zugabe        | 11:52   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:00   | 131,1          |
| Probenahme P1-2        | 12:15   | 41,7           |
| Probenahme P1-3        | 12:30   | 8,3            |
| Probenahme P1-4        | 12:40   | 2,7            |

| <b>29.04.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:20   | 338,0          |
| Ende MgO Zugabe        | 12:22   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:25   |                |
| Probenahme P1-2        | 12:30   | 171,4          |
| Probenahme P1-3        | 12:40   | 120,9          |
| Probenahme P1-4        | 12:50   | 85,7           |
| Probenahme P1-5        | 13:00   | 51,4           |
| Probenahme P1-6        | 13:11   | 20,0           |
| Probenahme P1-7        | 13:20   | 4,1            |

| <b>01.05.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:25   | 338,3          |
| Ende MgO Zugabe        | 12:26   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:30   | 132,7          |
| Probenahme P1-2        | 12:35   | 99,6           |
| Probenahme P1-3        | 12:45   | 56,6           |
| Probenahme P1-4        | 12:55   | 22,7           |
| Probenahme P1-5        | 13:02   | 6,7            |

P-Konzentrationen im Überstand bei 5 Versuchen im Zeitraum vom 06.05.2019 bis 18.06.2019 mit schneller Zugabe von technischem MgO in Suspension, Mg:P=1,5 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>06.05.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:25   | 367,8          |
| Ende MgO Zugabe        | 12:26   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:35   | 214,1          |
| Probenahme P1-2        | 12:45   | 172,5          |
| Probenahme P1-3        | 12:55   | 152,7          |
| Probenahme P1-4        | 13:05   | 136,5          |
| Probenahme P1-5        | 13:15   | 113,5          |
| Probenahme P1-6        | 13:30   | 86,1           |
| Probenahme P1-7        | 13:50   | 60,8           |
| Probenahme P1-8        | 14:10   | 38,6           |

| <b>07.05.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:35   | 315,4          |
| Ende MgO Zugabe        | 12:36   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:45   | 209,4          |
| Probenahme P1-2        | 12:55   | 170,7          |
| Probenahme P1-3        | 13:05   | 144,2          |
| Probenahme P1-4        | 13:15   | 128,0          |
| Probenahme P1-5        | 13:25   | 105,1          |
| Probenahme P1-6        | 13:40   | 82,7           |
| Probenahme P1-7        | 14:00   | 58,6           |
| Probenahme P1-8        | 14:22   | 35,2           |

| <b>14.05.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:05   | 374,6          |
| Ende MgO Zugabe        | 12:06   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:15   | 207,0          |
| Probenahme P1-2        | 12:25   | 177,6          |
| Probenahme P1-3        | 12:35   | 147,7          |
| Probenahme P1-4        | 12:45   | 126,1          |
| Probenahme P1-5        | 12:55   | 107,0          |
| Probenahme P1-6        | 13:10   | 80,1           |
| Probenahme P1-7        | 13:30   | 52,7           |
| Probenahme P1-8        | 13:50   | 29,4           |

| <b>11.06.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:30   | 402,7          |
| Ende MgO Zugabe        | 12:31   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:40   | 185,8          |
| Probenahme P1-2        | 12:50   | 139,9          |
| Probenahme P1-3        | 13:00   | 104,8          |
| Probenahme P1-4        | 13:10   | 75,0           |
| Probenahme P1-5        | 13:20   | 48,9           |
| Probenahme P1-6        | 13:30   | 26,1           |

| <b>18.06.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:50   | 342,3          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 12:00   | 235,0          |
| Probenahme P1-2        | 12:10   | 186,8          |
| Probenahme P1-3        | 12:20   | 166,0          |
| Probenahme P1-4        | 12:30   | 141,7          |
| Probenahme P1-5        | 12:40   | 120,9          |
| Probenahme P1-6        | 12:50   | 107,6          |
| Probenahme P1-7        | 13:05   | 83,5           |
| Probenahme P1-8        | 13:20   | 64,0           |
| Probenahme P1-9        | 13:50   | 36,9           |

P-Konzentrationen im Überstand bei 3 Versuchen im Zeitraum vom 02.07.2019 bis 23.07.2019 mit schneller Zugabe von technischem MgO in Suspension, Mg:P=1,3 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>02.07.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:20   | 356,1          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 12:30   | 248,4          |
| Probenahme P1-2        | 12:40   | 210,6          |
| Probenahme P1-3        | 12:50   | 186,5          |
| Probenahme P1-4        | 13:00   | 166,0          |
| Probenahme P1-5        | 13:15   | 136,3          |
| Probenahme P1-6        | 13:30   | 126,1          |
| Probenahme P1-7        | 13:50   | 104,9          |
| Probenahme P1-8        | 14:20   | 68,6           |
| Probenahme P1-9        | 14:50   | 71,6           |
| Probenahme P1-10       | 15:05   | 68,7           |

| <b>09.07.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:00   | 356,7          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 12:10   | 253,6          |
| Probenahme P1-2        | 12:20   | 207,3          |
| Probenahme P1-3        | 12:30   | 190,8          |
| Probenahme P1-4        | 12:45   | 160,8          |
| Probenahme P1-5        | 13:00   | 139,3          |
| Probenahme P1-6        | 13:20   | 112,8          |
| Probenahme P1-7        | 13:50   | 87,9           |
| Probenahme P1-8        | 14:20   | 71,2           |
| Probenahme P1-9        | 15:00   | 50,8           |

| <b>23.07.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:40   | 358,8          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 11:50   | 240,3          |
| Probenahme P1-2        | 12:00   | 197,1          |
| Probenahme P1-3        | 12:10   | 177,9          |
| Probenahme P1-4        | 12:20   | 154,0          |
| Probenahme P1-5        | 12:35   | 124,8          |
| Probenahme P1-6        | 12:50   | 107,9          |
| Probenahme P1-7        | 13:10   | 86,7           |
| Probenahme P1-8        | 13:40   | 65,5           |
| Probenahme P1-9        | 14:10   | 48,8           |
| Probenahme P1-10       | 14:40   | 27,5           |

P-Konzentrationen im Überstand bei 3 Versuchen im Zeitraum vom 29.07.2019 bis 14.08.2019 mit schneller Zugabe von technischem MgO in Suspension, Mg:P=1,3 und Rührerdrehzahl 120 rpm.

| <b>29.07.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:40   | 456,5          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 11:50   | 273,2          |
| Probenahme P1-2        | 12:00   | 232,1          |
| Probenahme P1-3        | 12:10   | 202,1          |
| Probenahme P1-4        | 12:20   | 177,4          |
| Probenahme P1-5        | 12:35   | 146,4          |
| Probenahme P1-6        | 12:50   | 118,6          |
| Probenahme P1-7        | 13:10   | 91,1           |
| Probenahme P1-8        | 13:40   | 63,9           |
| Probenahme P1-9        | 14:10   | 45,0           |
| Probenahme P1-10       | 14:40   | 32,1           |

| <b>13.08.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:40   | 351,2          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 11:50   | 255,0          |
| Probenahme P1-2        | 12:00   | 225,0          |
| Probenahme P1-3        | 12:10   | 201,1          |
| Probenahme P1-4        | 12:20   | 180,8          |
| Probenahme P1-5        | 12:35   | 160,4          |
| Probenahme P1-6        | 12:50   | 138,0          |
| Probenahme P1-7        | 13:10   | 117,3          |
| Probenahme P1-8        | 13:40   | 85,7           |
| Probenahme P1-9        | 14:10   | 75,1           |
| Probenahme P1-10       | 15:10   | 54,4           |

| <b>14.08.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:40   | 353,4          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 11:50   | 245,3          |
| Probenahme P1-2        | 12:00   | 213,8          |
| Probenahme P1-3        | 12:10   | 183,7          |
| Probenahme P1-4        | 12:20   | 172,9          |
| Probenahme P1-5        | 12:35   | 141,6          |
| Probenahme P1-6        | 12:50   | 127,3          |
| Probenahme P1-7        | 13:10   | 104,9          |
| Probenahme P1-8        | 13:40   | 68,5           |
| Probenahme P1-9        | 14:25   | 57,8           |
| Probenahme P1-10       | 15:10   | 41,2           |

P-Konzentrationen im Überstand bei 2 Versuchen am 20.08.2019 und 27.08.2019 mit schneller Zugabe von technischem MgO in Suspension, Mg:P=1,3 und Rührerdrehzahl 56 rpm.

| <b>20.08.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:40   | 305,4          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 11:50   | 219,7          |
| Probenahme P1-2        | 12:00   | 185,5          |
| Probenahme P1-3        | 12:10   | 161,0          |
| Probenahme P1-4        | 12:20   | 141,5          |
| Probenahme P1-5        | 12:35   | 119,2          |
| Probenahme P1-6        | 12:50   | 100,6          |
| Probenahme P1-7        | 13:10   | 80,9           |
| Probenahme P1-8        | 13:40   | 65,7           |
| Probenahme P1-9        | 14:25   | 51,2           |
| Probenahme P1-10       | 15:10   | 34,8           |

| <b>27.08.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:50   | 355,1          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 12:00   | 240,2          |
| Probenahme P1-2        | 12:10   | 206,1          |
| Probenahme P1-3        | 12:20   | 177,2          |
| Probenahme P1-4        | 12:30   | 159,8          |
| Probenahme P1-5        | 12:45   | 131,1          |
| Probenahme P1-6        | 13:00   | 115,4          |
| Probenahme P1-7        | 13:20   | 95,5           |
| Probenahme P1-8        | 13:50   | 74,8           |
| Probenahme P1-9        | 14:35   | 54,4           |
| Probenahme P1-10       | 15:20   | 51,7           |

P-Konzentrationen im Überstand bei 2 Versuchen am 25.09.2019 und 18.10.2019 mit schneller Zugabe von Labor MgO in Suspension, Mg:P=2,0 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>25.09.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:15   | 268,9          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 12:25   | 3,6            |
| Probenahme P1-2        | 12:35   | 3,1            |
| Probenahme P1-3        | 12:45   | 2,4            |

| <b>18.10.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:50   | 331,8          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 13:00   | 3,6            |

P-Konzentrationen im Überstand bei 2 Versuchen am 06.11.2019 und 20.11.2019 mit schneller Zugabe von Amazon MgO in Suspension, Mg:P=2,0 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>06.11.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:50   | 263,9          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 13:00   | 2,1            |

| <b>20.11.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:50   | 325,4          |
| Ende MgO Zugabe        |         |                |
| Probenahme P1-1        | 13:00   | 1,9            |

P-Konzentrationen im Überstand bei 2 Versuchen am 04.12.2019 und 17.12.2019 mit schneller Zugabe von Amazon MgO in Suspension, Mg:P=1,3 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>04.12.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 12:25   | 293,8          |
| Ende MgO Zugabe        | 12:31   |                |
| Probenahme P1-1        | 12:35   | 43,9           |
| Probenahme P1-2        | 12:45   | 3,2            |

| <b>17.12.2019</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:30   | 293,8          |
| Ende MgO Zugabe        | 11:31   |                |
| Probenahme P1-1        | 11:30   | 43,9           |
| Probenahme P1-2        | 12:40   | 3,2            |

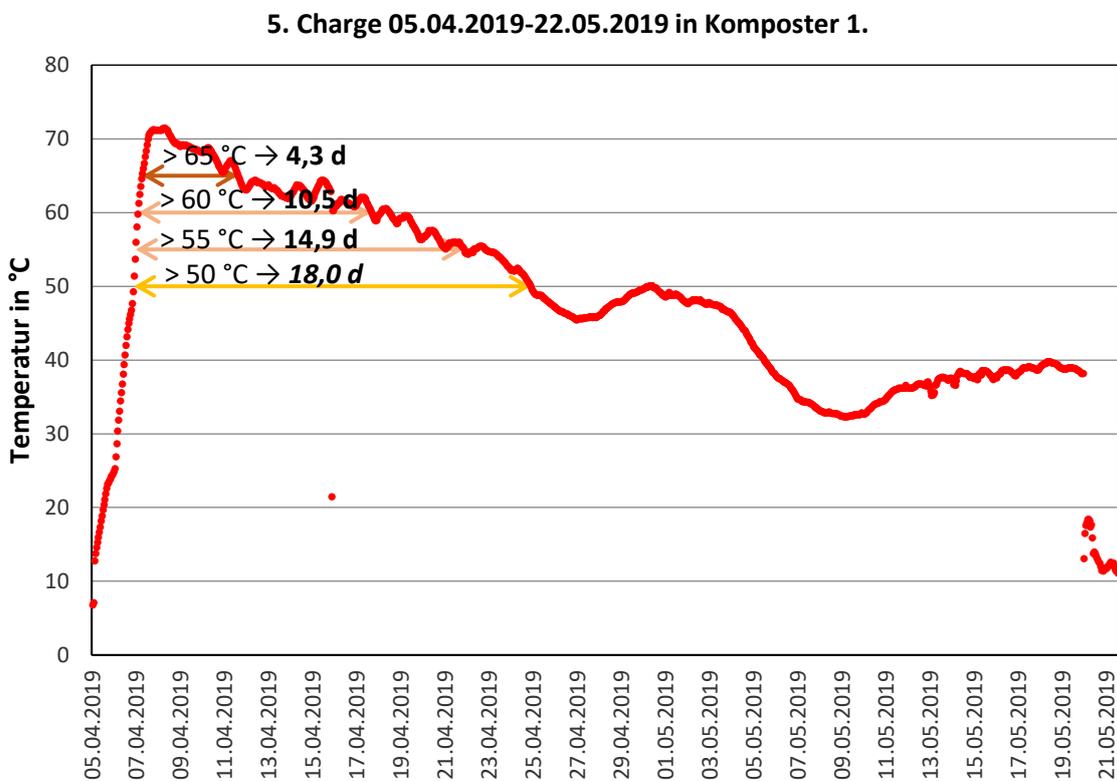
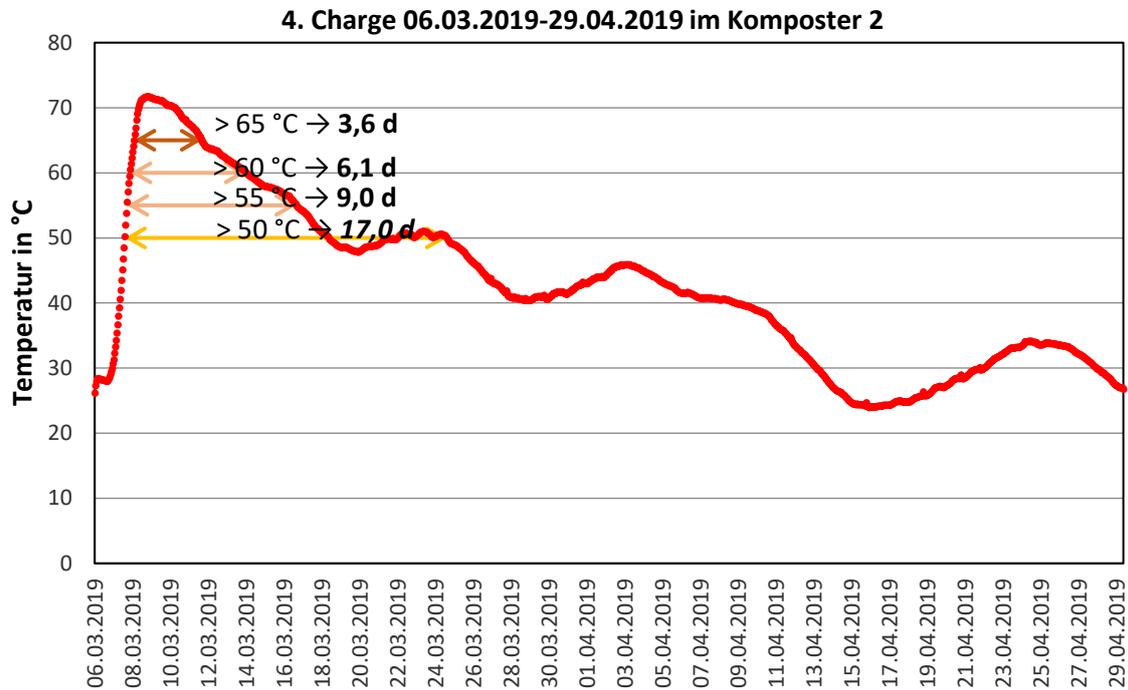
P-Konzentrationen im Überstand bei 2 Versuchen am 14.01.2020 und 21.01.2020 mit schneller Zugabe von Amazon MgO in Suspension, Mg:P=1,0 und Rührerdrehzahl 78 rpm.

| <b>14.01.2020</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:35   | 296,7          |
| Ende MgO Zugabe        | 11:36   |                |
| Probenahme P1-1        | 11:45   | 102,7          |
| Probenahme P1-2        | 11:55   | 61,9           |
| Probenahme P1-3        | 12:05   | 42,8           |
| Probenahme P1-4        | 12:15   | 34,7           |
| Probenahme P1-5        | 12:35   | 27,4           |
| Probenahme P1-6        | 13:05   | 22,7           |

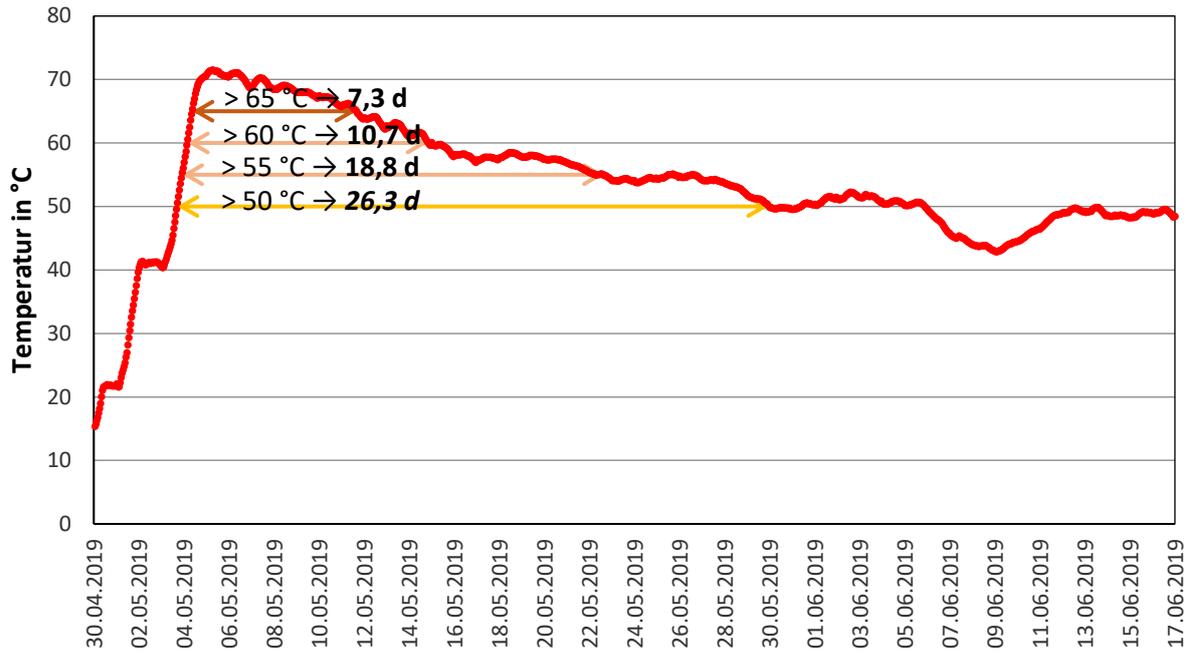
| <b>21.01.2020</b>      | Uhrzeit | P-Konz. [mg/L] |
|------------------------|---------|----------------|
| Anfang MgO Zugabe (P1) | 11:35   | 271,3          |
| Ende MgO Zugabe        | 11:36   |                |
| Probenahme P1-1        | 11:45   | 120,4          |
| Probenahme P1-2        | 11:55   | 79,8           |
| Probenahme P1-3        | 12:05   | 60,9           |
| Probenahme P1-4        | 12:15   | 47,9           |
| Probenahme P1-5        | 12:35   | 39,8           |
| Probenahme P1-6        | 13:05   | 38,9           |

## A11: Temperaturverlauf während Kompostierung in Komposter 1 und 2 in den unterschiedlichen Chargen

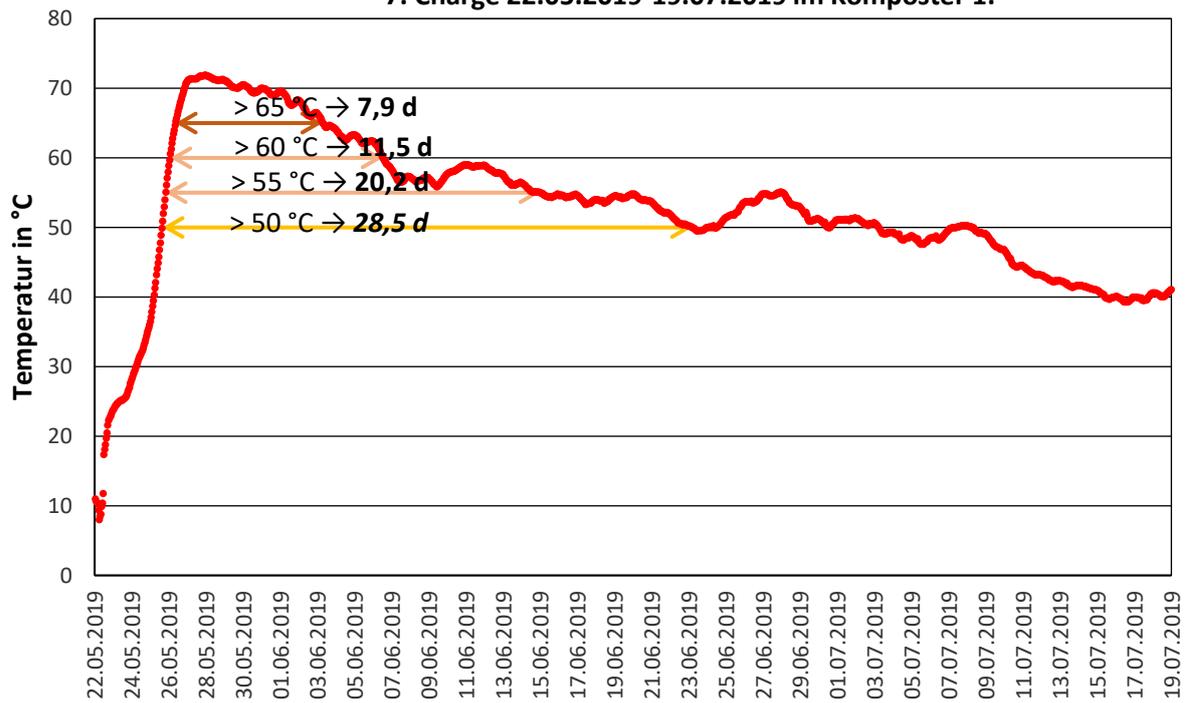
Der Temperaturverlauf der ersten bis dritte Charge ist im Kap. 3.5.2 in Abbildung 27 dargestellt.



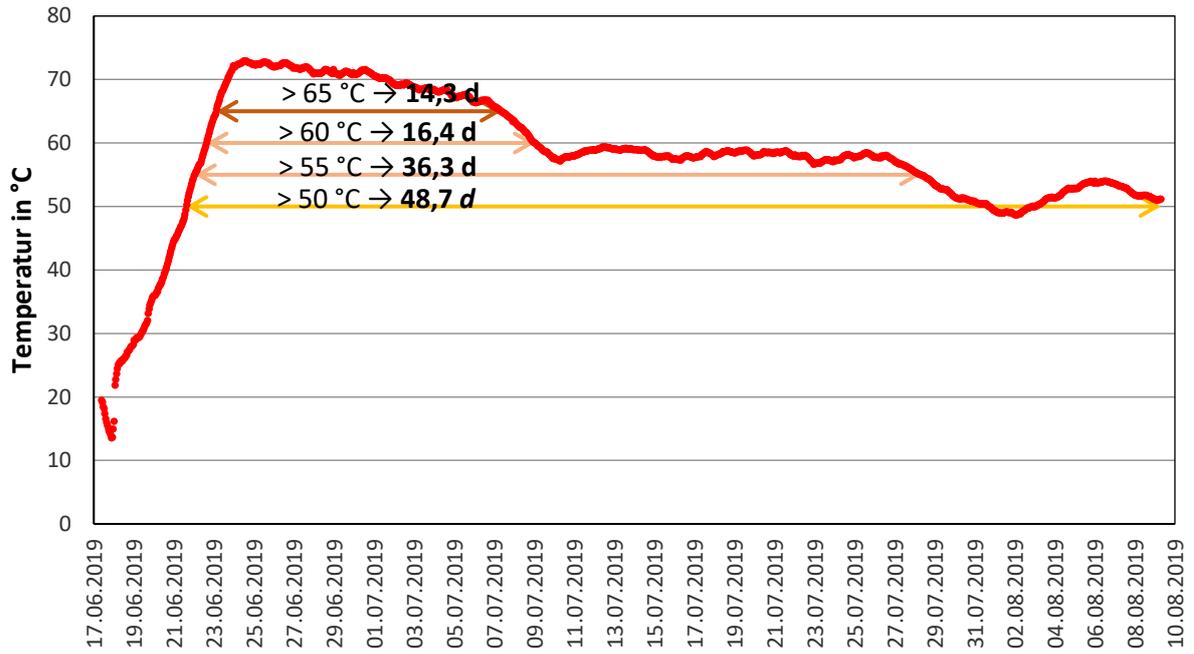
6. Charge 04.30.2019-17.06.2019 im Komposter 2.



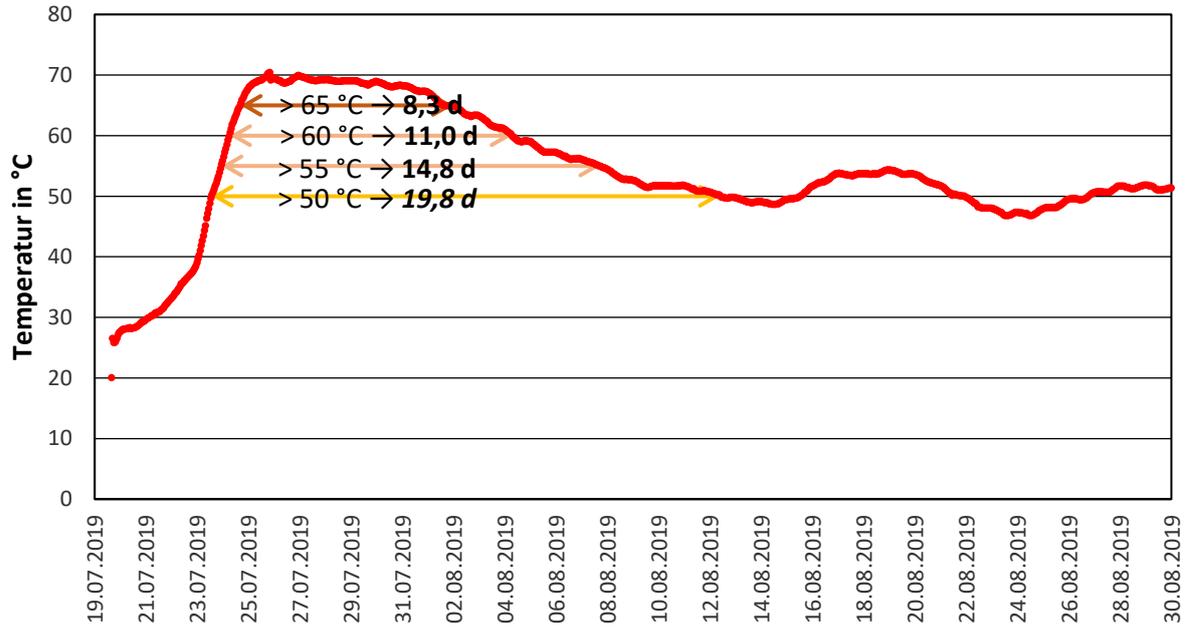
7. Charge 22.05.2019-19.07.2019 im Komposter 1.



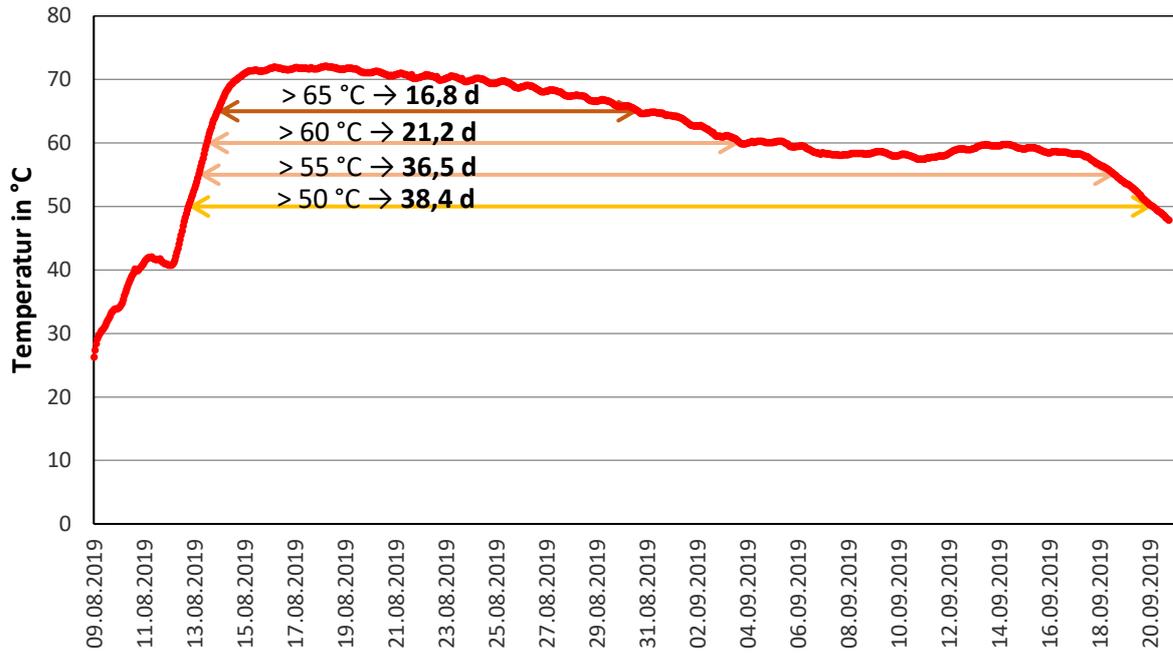
8. Charge 17.06.2019-09.08.2019 im Komposter 2.



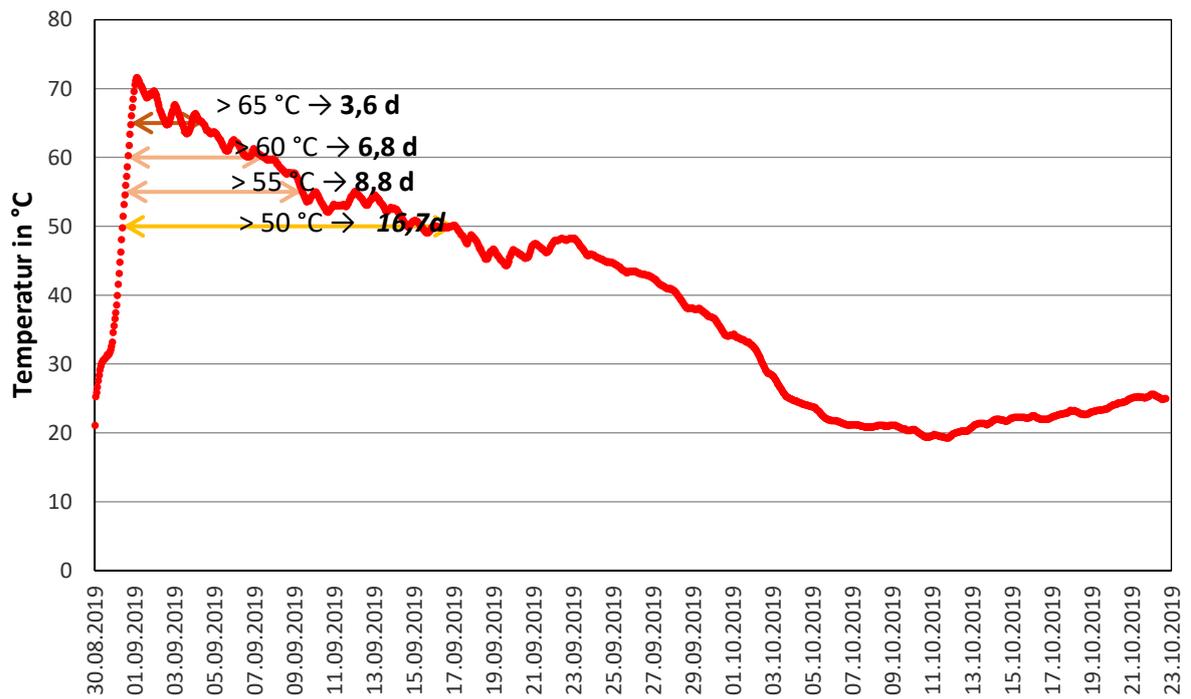
9. Charge 19.07.2019-30.08.2019 im Komposter 1.



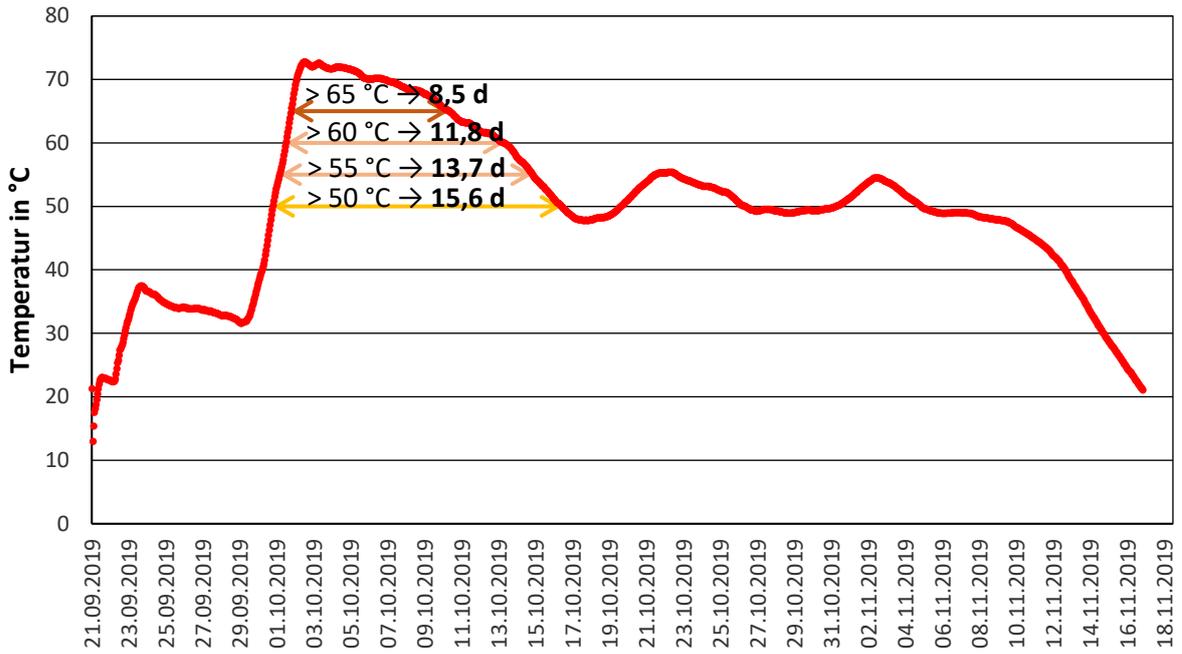
**10. Charge 09.08.2019-21.09.2019 im Komposter 2.**



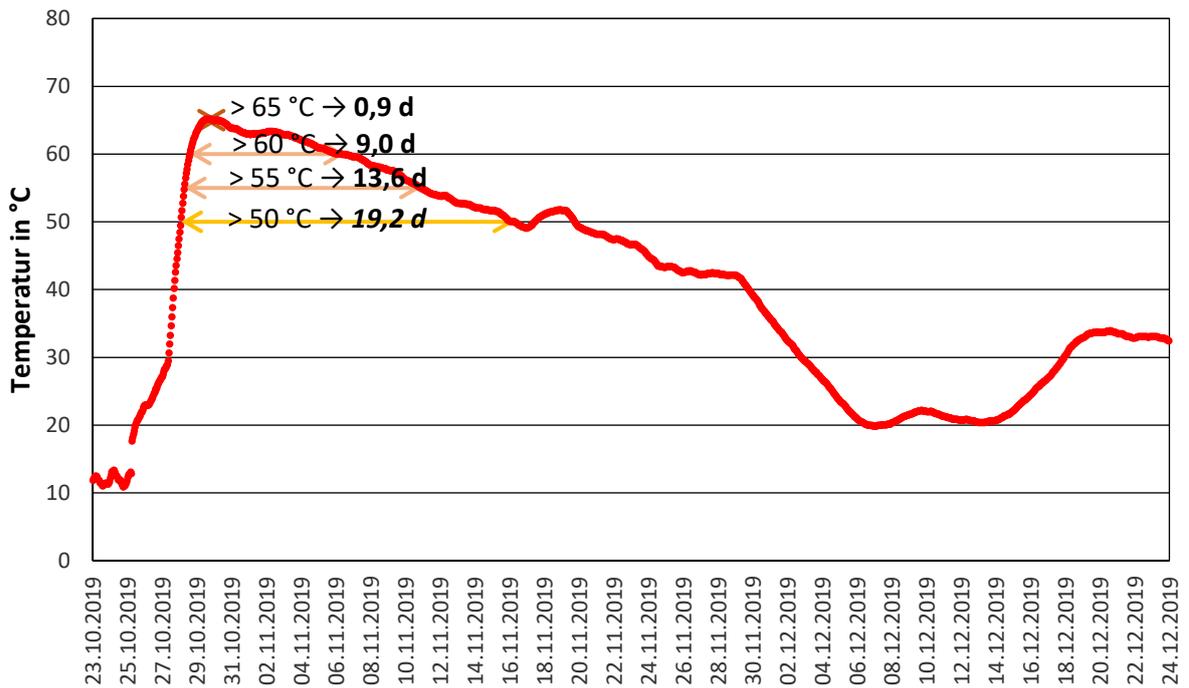
**11. Charge 30.08.2019-23.10.2019 im Komposter 1.**



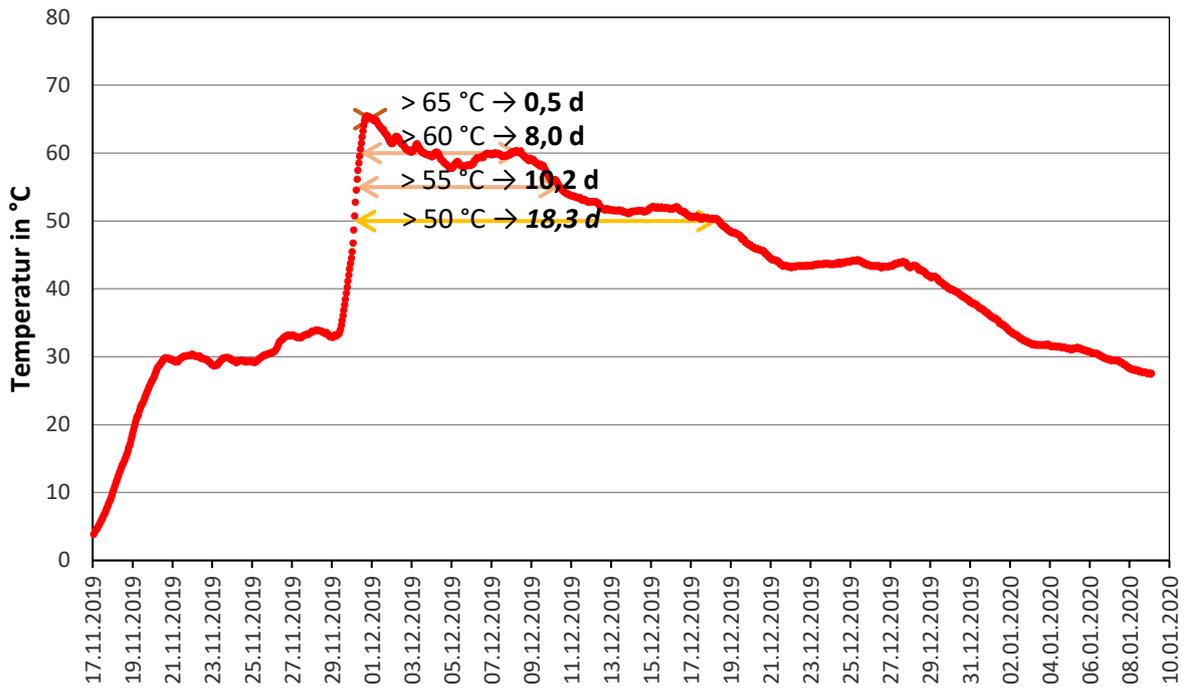
**12. Charge 21.09.2019-17.11.2019 in Komposter 2.**



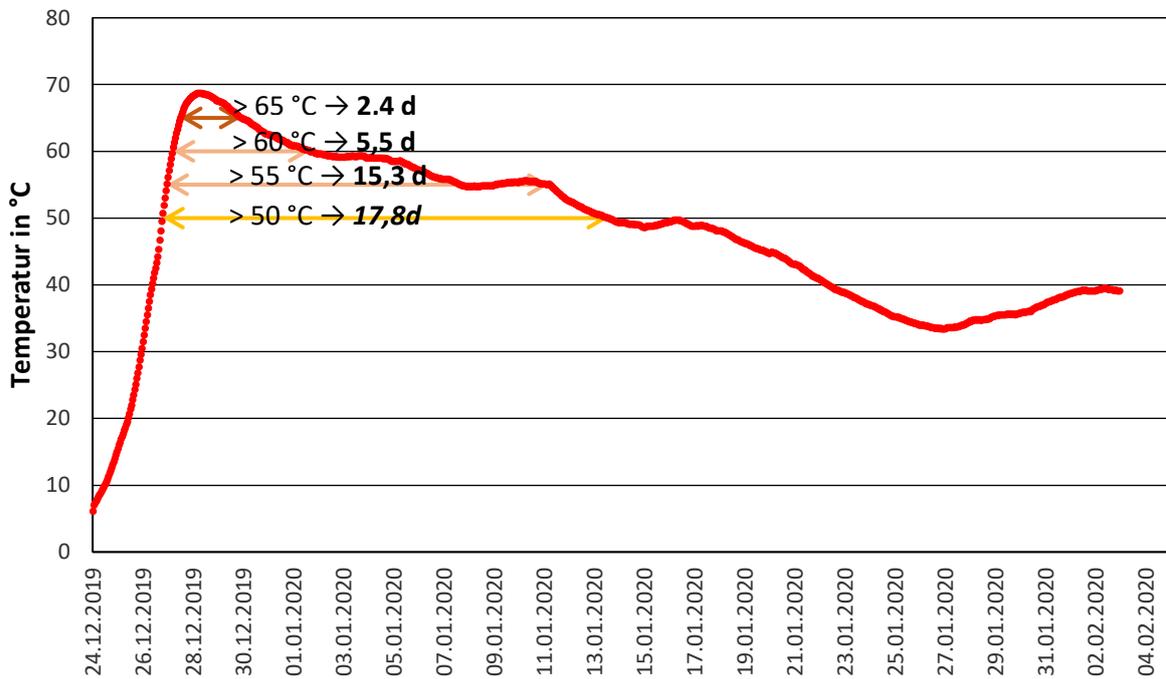
**13. Charge 23.10.2019-24.12.2019 im Komposter 1.**



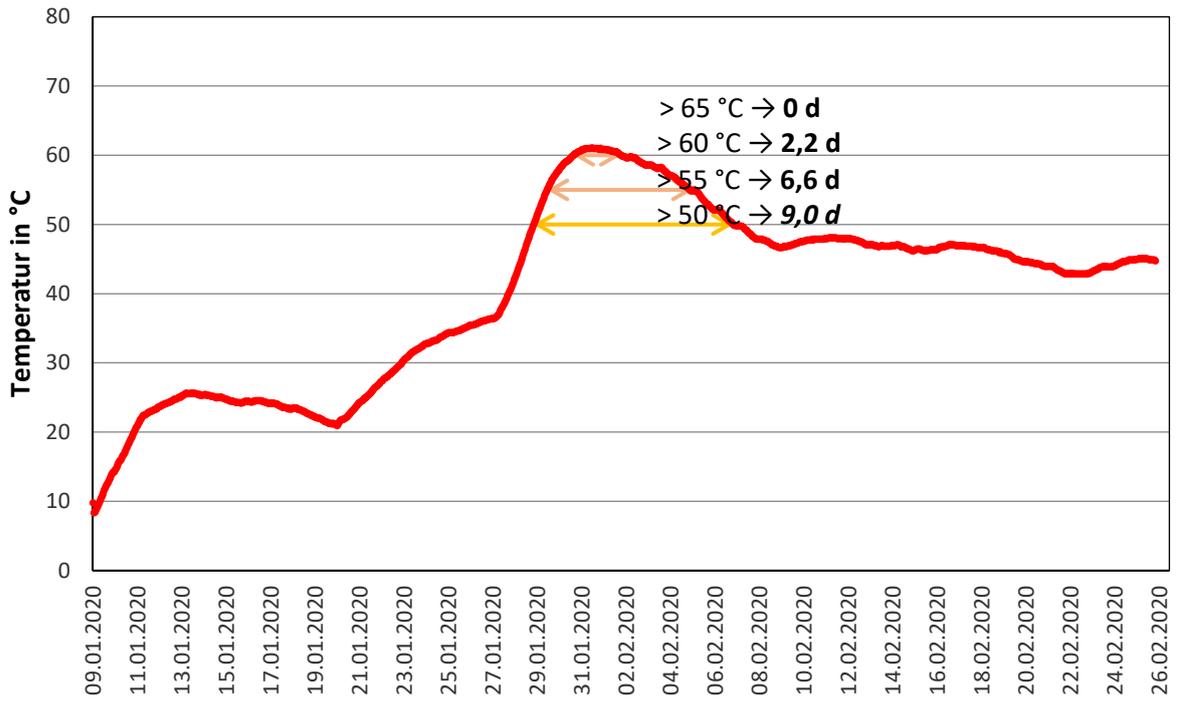
14. Charge 17.11.2019-09.01.2020 im Komposter 2.



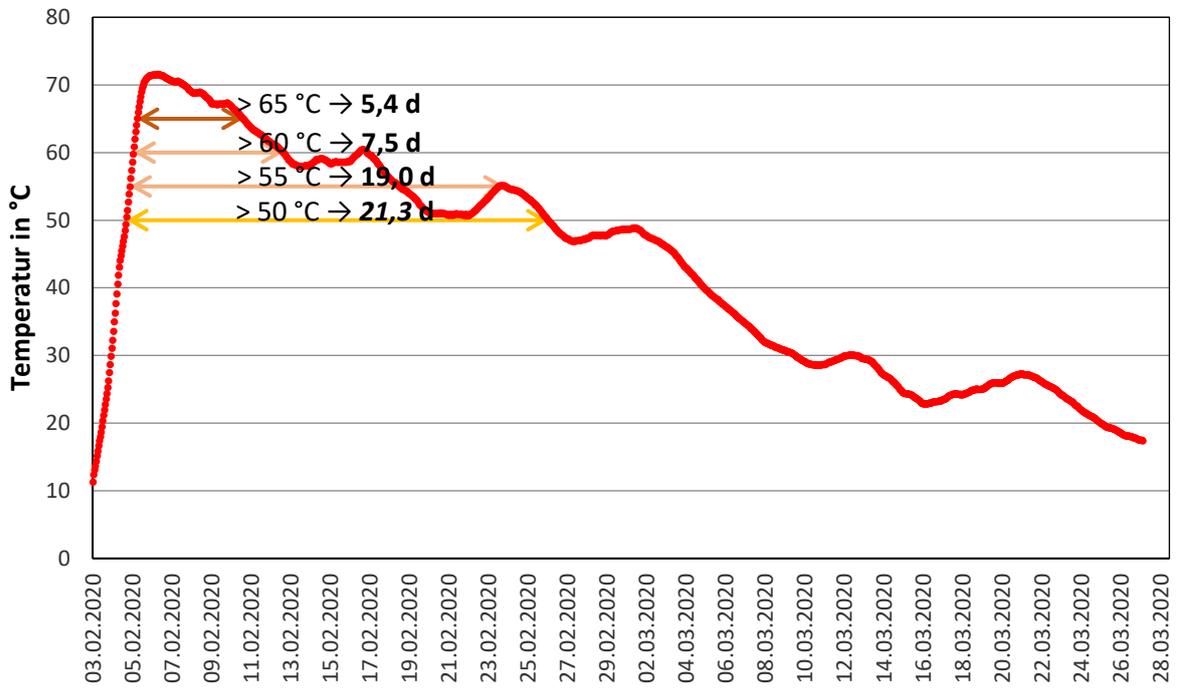
15. Charge 24.12.2019-03.02.2020 im Komposter 1.



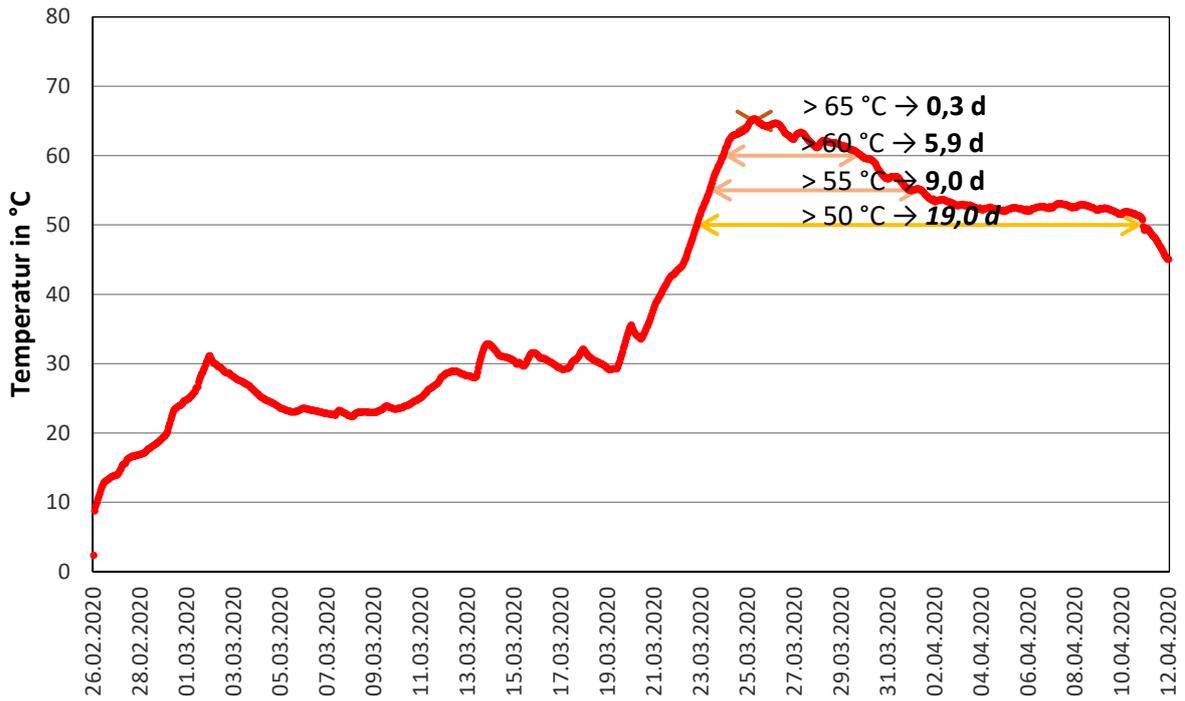
16. Charge 09.01.2020-26.02.2020 im Komposter 2.



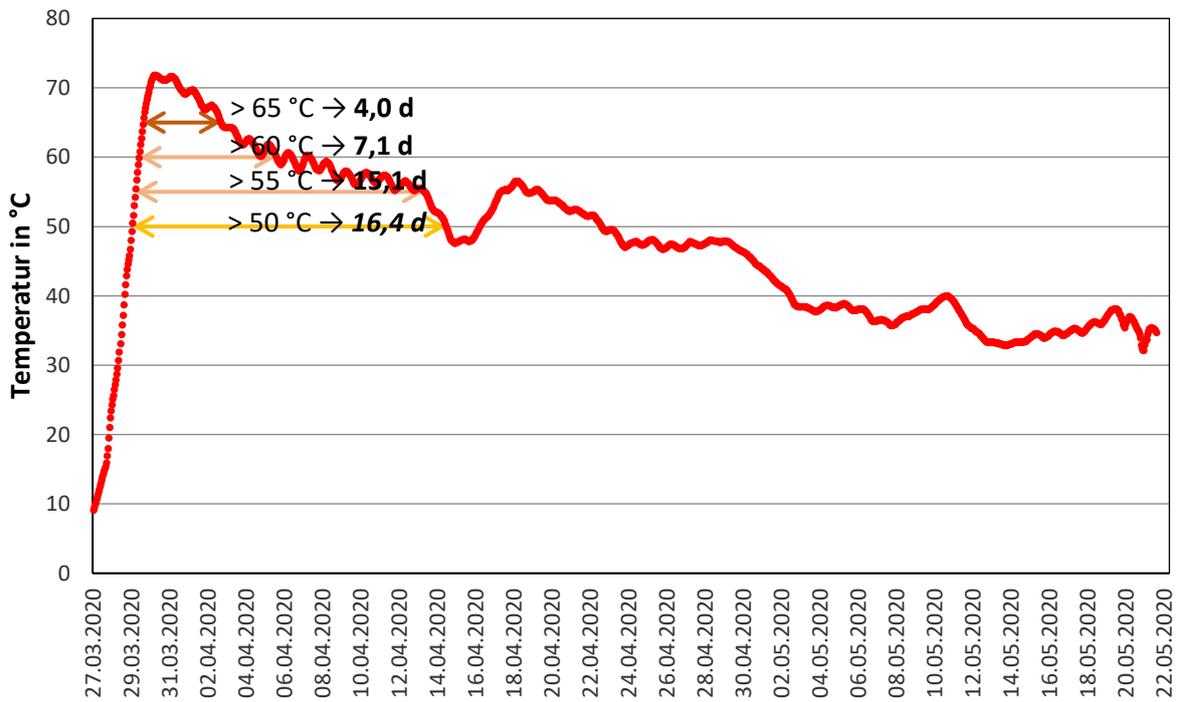
17. Charge 03.02.2020-27.03.2020 im Komposter 1.



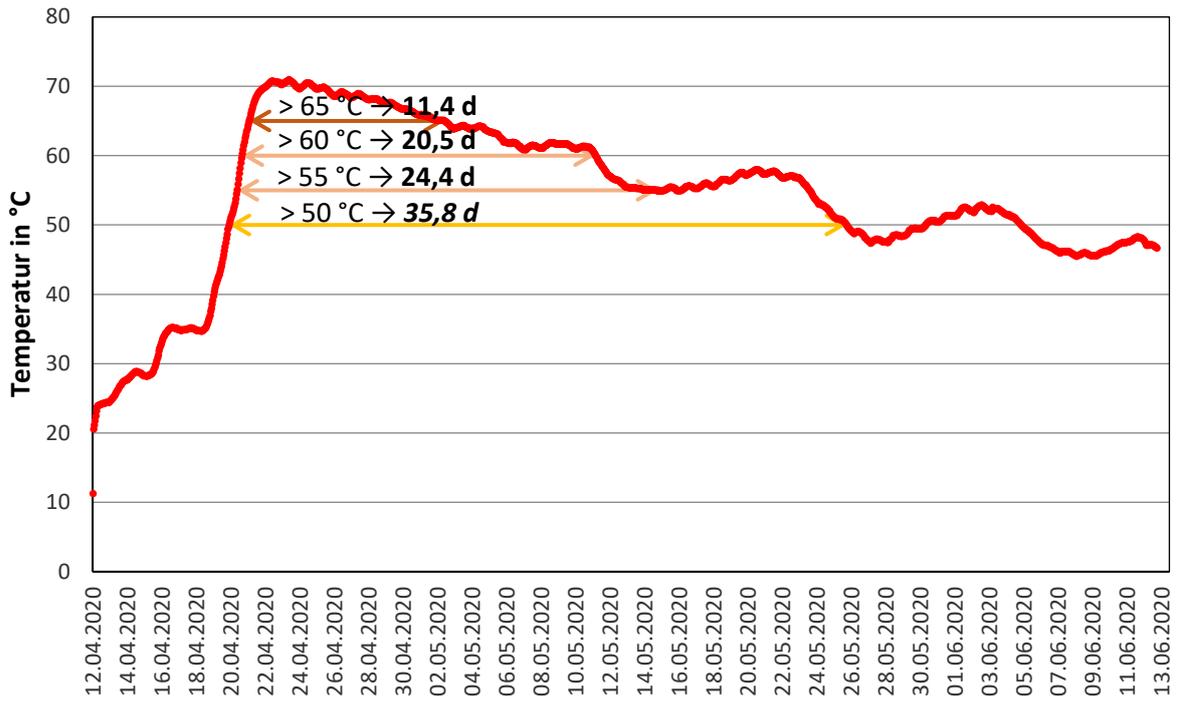
18. Charge 26.02.2020-12.04.2020 im Komposter 2.



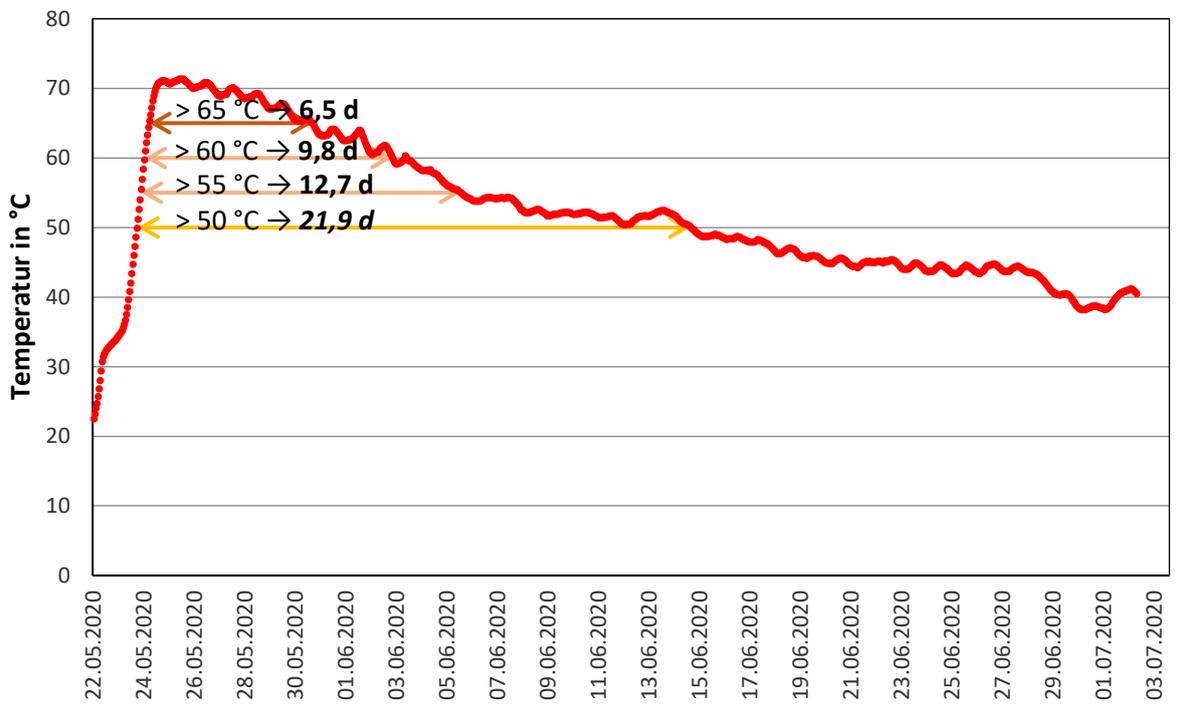
19. Charge 27.03.2020-22.05.2020 im Komposter 1.



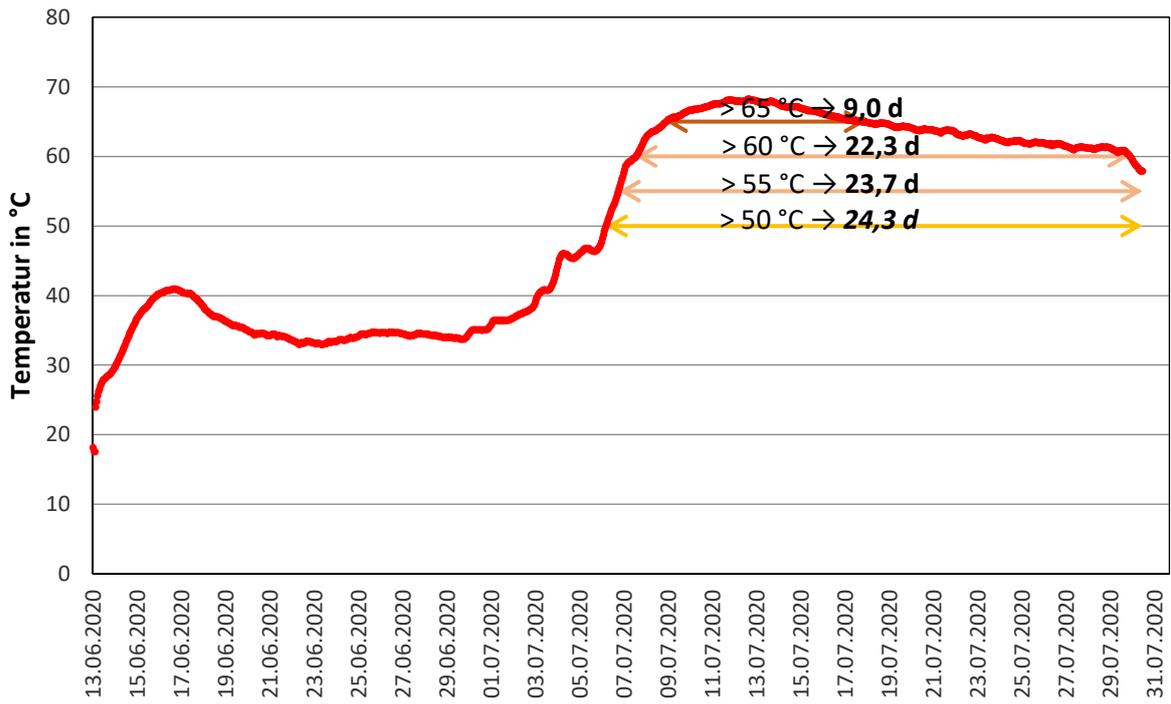
20. Charge 12.04.2020-13.06.2020 im Komposter 2.



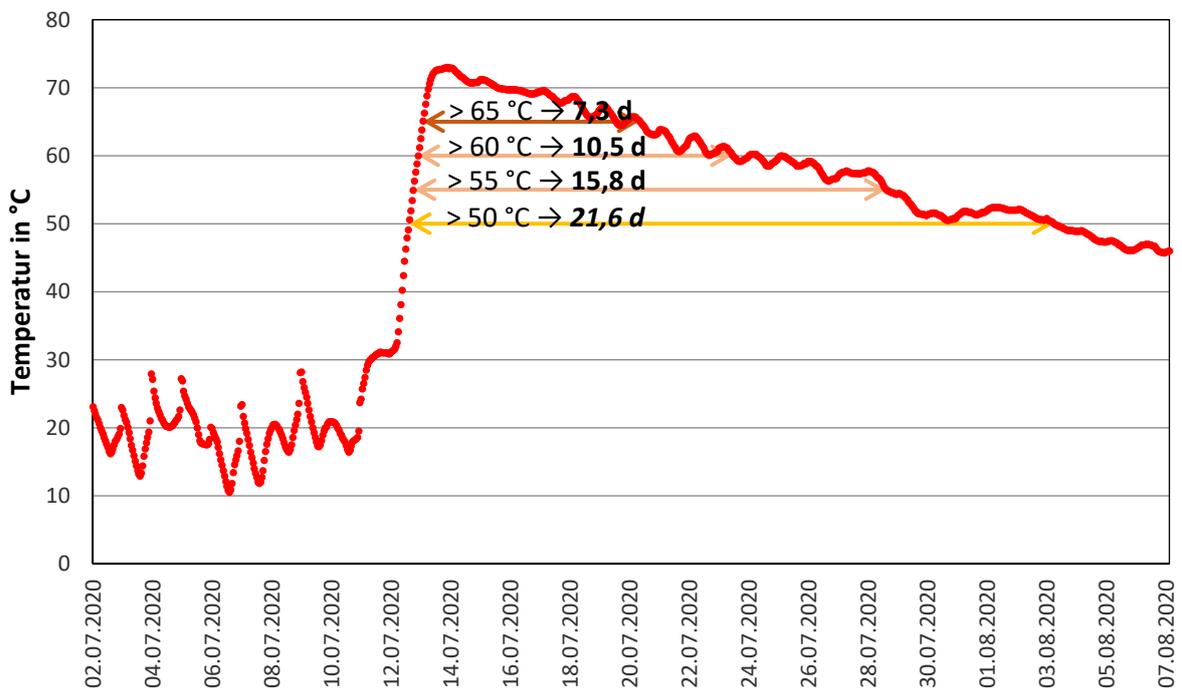
21. Charge 22.05.2020-02.07.2020 im Komposter 1.



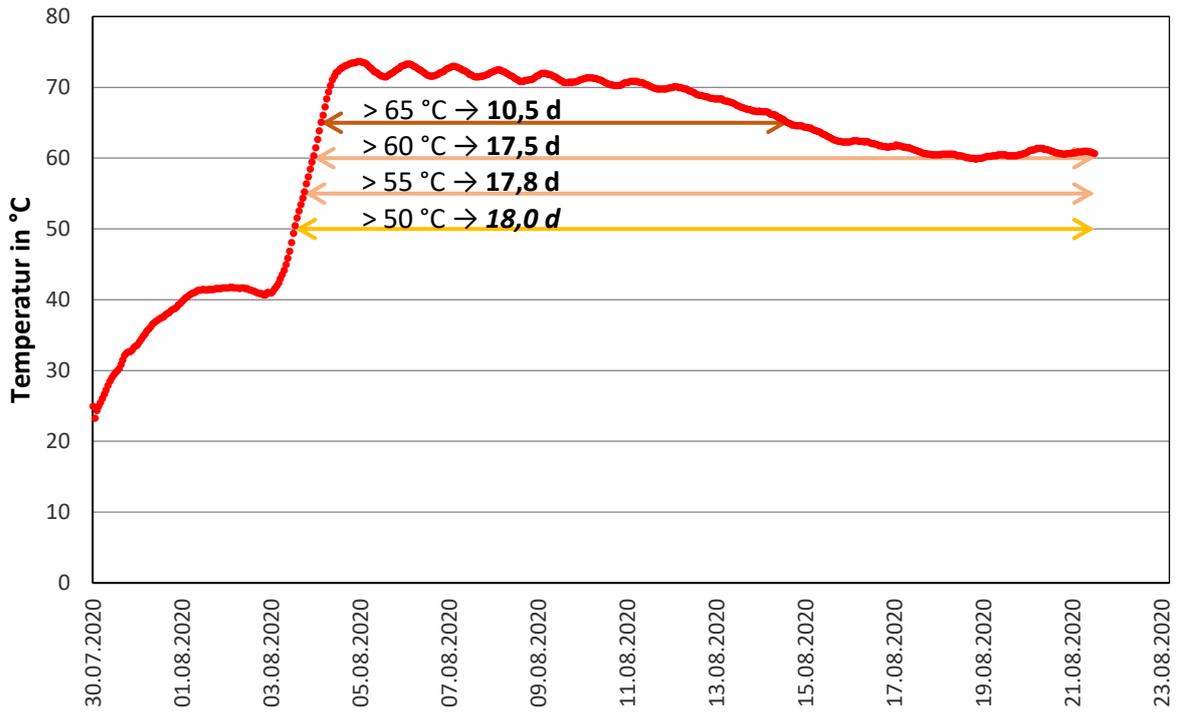
22. Charge 13.06.2020-30.07.2020 im Komposter 2.



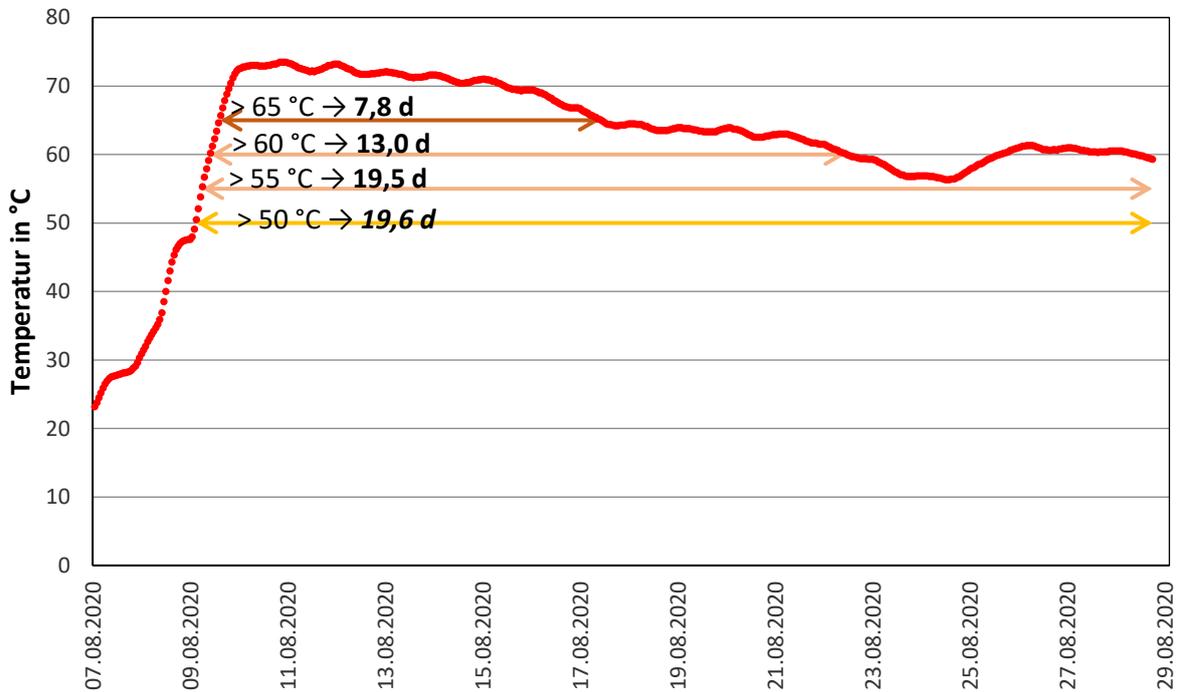
23. Charge 02.07.2020-07.08.2020 im Komposter 1.



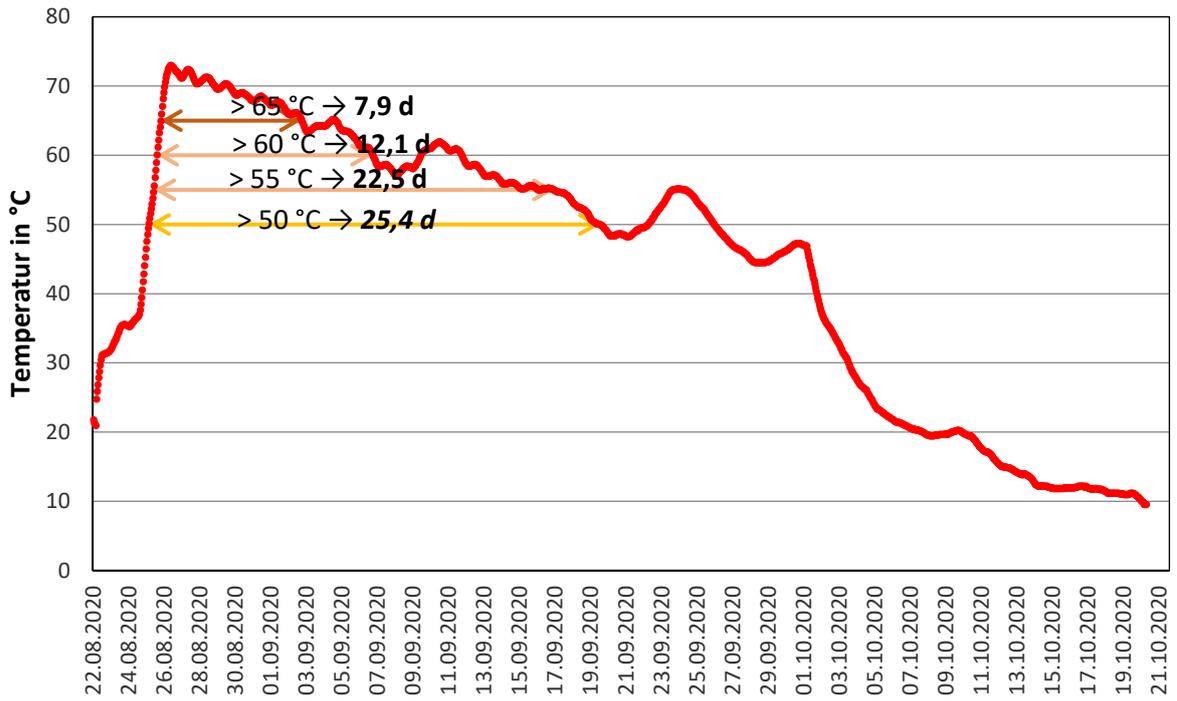
24. Charge 30.07.2020-22.08.2020 im Komposter 2.



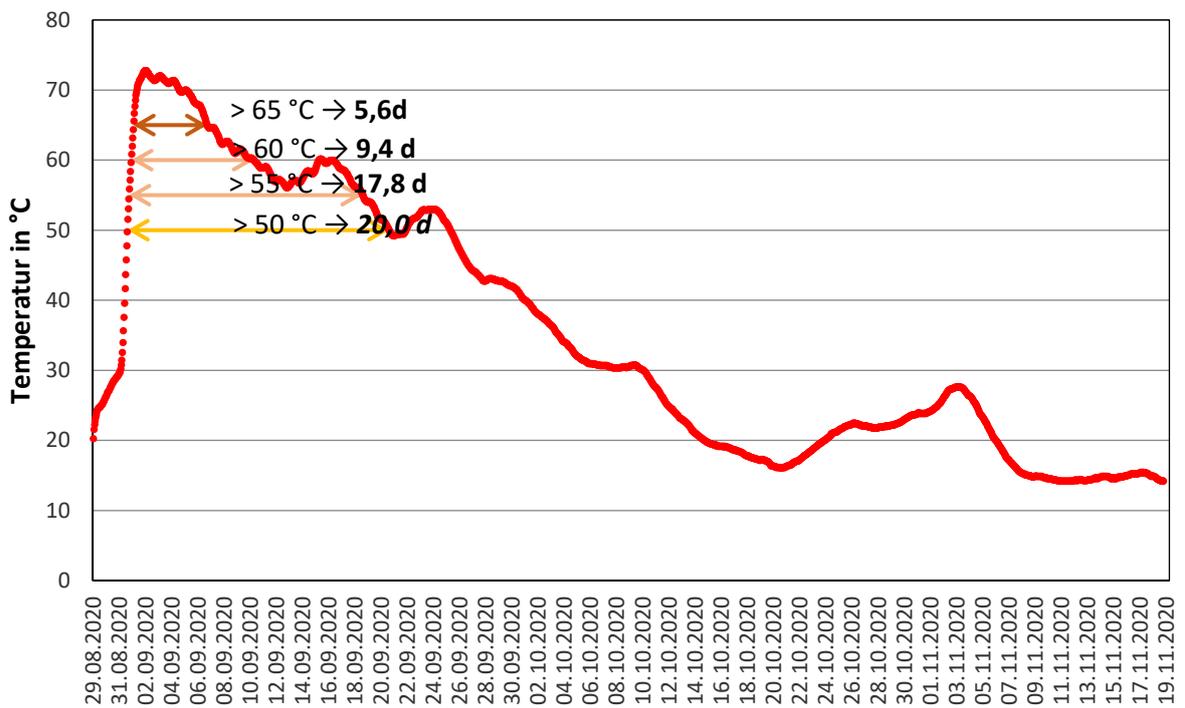
25. Charge 07.08.2020-29.08.2020 im Komposter 1.



**26. Charge 22.08.2020-20.10.2020 im Komposter 2.**



**27. Charge 29.08.2020-19.11.2020 im Komposter 1.**



## A12: Messprogramm zur Analytik von Keimbelastung und Spurenstoffen und Ergebnisse der Messungen

Tabelle A12.1: Messprogramm zur Analytik von Keimbelastung und Spurenstoffen

|   | Gesamt-keimzahl | E. coli und coliforme Keime | Enterokokken | somatische Coliphagen | Ausgewählte Spurenstoffe |
|---|-----------------|-----------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------|
| 1. Urin vor der Fällung                         | x               | x                           | x            | x                     | x                        |
| 2. Urinüberstand nach der Fällung               | x               | x                           | x            |                       | x                        |
| 3. Ablauf Spezialbodenfilter                    |                 | x                           | x            |                       | x                        |
| 4. Grauwasser                                   |                 | x                           | x            |                       | x                        |
| 5. Ablauf PKA (GW)                              |                 | x                           | x            | x                     | x                        |
| 6. frische Fäzes                                | x               | x                           | x            | x                     | x                        |
| 7. Schnellkompost                               | x               | x                           | x            |                       | x                        |
| 8. Nachkompost                                  | x               | x                           | x            | x                     | x                        |
| 9. Fällprodukt aus frischer Charge, ungewaschen | x               | x                           | x            |                       | x                        |
| 10. Fällprodukt aus frischer Charge, gewaschen  | x               | x                           | x            |                       | x                        |
| 11. gemischtes und getrocknetes Fällprodukt     | x               | x                           | x            | x                     | x                        |

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Analyse sind in Kap. 4.2.1, Tabelle 13 dargestellt

Tabelle A12.2: Messergebnisse zu Spurenstoffen: Probe vom 01.10.2020, Teil 1

| Substanzgruppe                                      | Einzelsubstanz   | P1-a  | P2-a | P3-a | P4-a   | P5-a   | P6-a  | P7-a  | P8-a  | P9-a  | P10-a | P11-a |
|---|--|-------|------|------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Genussmittel und Transformationsprodukte            | Coffein  | 1522  | 1374 | 58,4 | 158    | 2,86   | 42,0  | 0,31  | 6,31  | 4,03  | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Dimethylxanthin  | 2091  | 2187 | 30,1 | 0,41   | 0,03   | 23,3  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Nicotin  | 369   | 232  | 6,99 | 1,15   | 0,14   | 40,5  | < 0,1 | 2,17  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Cotinin  | 644   | 509  | 39,3 | 1,27   | 0,03   | 8,37  | < 0,1 | 1,04  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Cotinin, - trans-Hydroxy   | 320   | 229  | 0,13 | 0,02   | 0,01   | 1,73  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| Fäkalindikatoren                                    | Indol  | 5310  | 5685 | 47,9 | 13,5   | 0,05   | 29632 | 2119  | 35    | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Skatol   | 21,4  | 27,8 | 7,31 | 0,41   | < 0,01 | 42398 | 27,1  | 0,69  | 0,35  | 0,30  | 0,30  |
| Typische Urinhaltsstoffe (Aromatische Carbonsäuren) | Benzoessäure   | 7084  | 6359 | 435  | 10,63  | 4,19   | 2180  | 123   | 42,3  | 1,65  | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Phenyllessigsäure  | 5173  | 4800 | 1709 | 3,24   | 0,35   | 6210  | 217   | 21,5  | 1,41  | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Phenylpropansäure  | 676   | 594  | 91   | 0,08   | 0,01   | 1288  | 104   | 13,2  | 0,93  | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Anthranilsäure   | 457   | 468  | 21   | 1,37   | 0,04   | 657   | 44,3  | 8,51  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | p-Hydroxybenzoessäure  | 1941  | 1602 | 70   | 0,95   | 0,07   | 1015  | 112   | 18,4  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | m-Hydroxybenzoessäure  | 445   | 335  | 44   | 0,30   | 0,04   | 326   | 22,0  | 15,4  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | o-Hydroxybenzoessäure (Salicylsäure)                               | 1006  | 1024 | 238  | 0,85   | 0,06   | 535   | 131   | 9,27  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | 4-Hydroxy-3-methoxy-Benzoessäure                                   | 621   | 461  | 109  | 1,02   | 0,10   | 315   | 103   | 8,11  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | 4-Hydroxy-3-methoxy-Phenyllessigsäure                              | 1032  | 839  | 44   | 0,78   | < 0,01 | 428   | 88,0  | 2,34  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | 4-Hydroxy-3-methoxy-Phenylpropansäure                              | 1105  | 924  | 212  | 0,23   | < 0,01 | 598   | 225   | 16,1  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | 3-Indolessigsäure  | 1329  | 1130 | 47   | 4,81   | < 0,01 | 725   | 103   | 12,8  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 3-Indolpropansäure                                  | 911  | 851   | 57   | 1,23 | < 0,01 | 413    | 31,9  | 4,51  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |       |
| Typische Urinhaltsstoffe                            | Cholestanol  | 5,09  | 0,83 | 0,26 | 0,43   | 0,04   | 3452  | 2121  | 3159  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Cholesterol  | 15,9  | 8,63 | 1,33 | 5,86   | 0,28   | 4342  | 1631  | 1943  | 3,88  | 1,47  | 0,57  |
|   | N-Acetyl-S-[2-methyl-2-(carboxymethyl)ethyl]-l-cystein methylester | 129   | 64,9 | 5,21 | 0,05   | < 0,01 | 28,5  | 2,37  | 1,04  | 0,21  | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Phenol   | 7518  | 6536 | 1364 | 1,13   | 0,96   | 838   | 627   | 29,5  | 5,15  | < 0,1 | < 0,1 |
|   | Kresole  | 11017 | 8006 | 152  | 4,24   | 8,23   | 11400 | 68,0  | 3,22  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |

Tabelle A12.3: Messergebnisse zu Spurenstoffen: Probe vom 01.10.2020, Teil 2

| Substanzgruppe   | Einzelsubstanz  | P1-a   | P2-a   | P3-a   | P4-a   | P5-a   | P6-a  | P7-a  | P8-a  | P9-a  | P10-a | P11-a |
|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pharmazeutische Wirkstoffe und Transformationsprodukte | Aspirin   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Acetamidoantipyrin  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Formylaminoantipyrin  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | (2-Acetyl-2-Methyl-1-Phenylhydrazino)-oxoessigsäure (als Methylester) | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | 1-Methyl-2-Phenyl-Acetohydrazid                                       | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Carbamazepin  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Diclofenac  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Diclofenac, 3'-Hydroxy-   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Diclofenac, 5-Hydroxy-  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Diclofenac, 4'-Hydroxy-   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | 2,6-Dichloranilin   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Gabapentin  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Gabapentin, -Lactam   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Ibuprofen   | 523    | 398    | 133    | 5,58   | 1,16   | 1,90  | 0,24  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Ibuprofen, Hydroxy-   | 983    | 779    | 343    | 16,3   | 0,84   | 0,28  | 0,10  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Ibuprofen, Carboxy-   | 2145   | 1792   | 330    | 7,61   | 2,34   | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Lidocain  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Tramadol  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Tramadol, O-Desmethyl-  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Venlafaxin  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| Venlafaxin, Nor-                                       | < 0,01  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |       |

TabelleA12.4: Messergebnisse zu Spurenstoffen: Probe vom 01.10.2020, Teil 3

| Substanzgruppe                                 | Einzelsubstanz                         | P1-a   | P2-a   | P3-a   | P4-a | P5-a   | P6-a  | P7-a  | P8-a  | P9-a  | P10-a | P11-a |
|--|--|--------|--------|--------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Natürliche Hormone und Transformationsprodukte | Androstane-3,17-dione, (5.beta.)-      | 182    | 221    | 2,47   | 0,13 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | 3,33  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Androstane-3,17-dione, (5.alpha.)-     | 77,4   | 78,6   | 0,14   | 0,06 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | 1,99  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Androstane-3,11,17-trione, (5.beta.)-  | 344    | 348    | 7,76   | 0,27 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | 1,08  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Androstane-3,11,17-trione, (5.alpha.)- | 52,5   | 69,9   | 1,09   | 0,07 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | 0,06  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Prasteron                              | 10,5   | 8,62   | 0,21   | 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | 17 $\beta$ -Estradiol                  | 12,9   | 7,52   | 0,05   | 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Estron</i>                          | 40,0   | 31,4   | 0,23   | 0,06 | 0,01   | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| <i>Equilin</i>                                 | 41,0                                   | 31,2   | 0,32   | 0,02   | 0,07 | < 0,1  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |       |
| Duftstoffe und Repellentien                    | Eugenol                                | 357    | 25,4   | 152    | < 1  | < 1    | 7,66  | 1,50  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | DEET                                   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | 30,7 | 0,54   | < 0,1 | 10,3  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Menthol                                | 508    | 445    | 57,4   | 3,16 | 0,29   | 3,22  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |

Tabelle A12.5: Messergebnisse zu Spurenstoffen: Probe vom 20.11.2020, Teil 1

| Substanzgruppe                                       | Einzelsubstanz  | P1-b  | P2-b  | P3-b  | P4-b | P5-b   | P6-b  | P7-b  | P8-b  | P9-b  | P10-b | P11-b |
|--|---|-------|-------|-------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Genussmittel und Transformationsprodukte             | Coffein   | 1546  | 1370  | 23,0  | 62,6 | 0,17   | 57,4  | 23,76 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Dimethylxanthin</i>  | 2454  | 1530  | 31,1  | 0,32 | 0,04   | 27,2  | 12,41 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Nicotin   | 330   | 287   | 8,86  | 2,25 | 0,28   | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Cotinin</i>  | 961   | 399   | 44,7  | 6,94 | 0,07   | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Cotinin, - trans-Hydroxy</i>   | 145   | 90,1  | 9,85  | 0,10 | 0,03   | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| Fäkalindikatoren                                     | <i>Indol</i>  | 1787  | 1617  | 19,7  | 0,66 | 0,04   | 33579 | 2129  | 0,15  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Skatol</i>   | 32,0  | 24,6  | 1,31  | 0,02 | < 0,01 | 5987  | 174   | 1,14  | < 0,1 | < 0,1 | 0,30  |
| Typische Urininhaltstoffe (Aromatische Carbonsäuren) | <i>Benzoessäure</i>   | 48126 | 54959 | 3265  | 26,4 | 7,65   | 4255  | 126   | 2,99  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Phenylelessigsäure</i>   | 18928 | 34274 | 1872  | 0,96 | 1,65   | 5338  | 210   | 1,45  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Phenylpropansäure</i>  | 1877  | 1432  | 211   | 1,25 | 0,12   | 1215  | 88,3  | 0,38  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Anthranilsäure</i>   | 736   | 712   | 115   | 1,17 | 0,06   | 831   | 117   | 2,30  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>p-Hydroxybenzoessäure</i>  | 2345  | 2110  | 98,4  | 0,73 | 0,12   | 1158  | 154   | 1,41  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>m-Hydroxybenzoessäure</i>  | 436   | 390   | 31,2  | 0,06 | 0,09   | 227   | 73,2  | 0,97  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>o-Hydroxybenzoessäure (Salicylsäure)</i>                               | 1961  | 1722  | 46,1  | 0,12 | 0,11   | 314   | 64,8  | 1,25  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>4-Hydroxy-3-methoxy-Benzoessäure</i>                                   | 745   | 621   | 32,7  | 0,38 | 0,09   | 522   | 16,9  | 0,54  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>4-Hydroxy-3-methoxy-Phenylelessigsäure</i>                             | 2519  | 2440  | 52,0  | 0,52 | 0,14   | 1119  | 226   | 1,55  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>4-Hydroxy-3-methoxy-Phenylpropansäure</i>                              | 1376  | 1215  | 33,4  | 0,21 | 0,08   | 1580  | 195   | 0,98  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>3-Indolessigsäure</i>  | 1788  | 1627  | 104,0 | 0,94 | 0,05   | 2125  | 210   | 1,14  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| <i>3-Indolpropansäure</i>                            | 433   | 405   | 28,7  | 0,09  | 0,04 | 292    | 45,3  | 0,17  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |       |
| Typische Urininhaltstoffe                            | Cholestanol   | 1,23  | 1,35  | 0,18  | 0,44 | 0,03   | 5607  | 3824  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Cholesterol   | 8,4   | 5,33  | 1,02  | 4,57 | 0,20   | 3297  | 3880  | 7,94  | 3,20  | 4,51  | 0,57  |
|  | <i>N-Acetyl-S-[2-methyl-2-(carboxymethyl)ethyl]-L-cystein methylester</i> | 92,4  | 25,0  | 4,31  | 0,07 | 0,05   | 16,5  | 0,98  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Phenol</i>   | 4899  | 4549  | 88,9  | 7,04 | 0,42   | 4383  | 623   | 1,42  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | <i>Kresole</i>  | 10217 | 9376  | 44,8  | 7,51 | 1,05   | 12501 | 60,8  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |

Tabelle A12.6: Messergebnisse zu Spurenstoffen: Probe vom 20.11.2020, Teil 2

| Substanzgruppe   | Einzelsubstanz  | P1-b   | P2-b   | P3-b   | P4-b   | P5-b   | P6-b  | P7-b  | P8-b  | P9-b  | P10-b | P11-b |
|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pharmazeutische Wirkstoffe und Transformationsprodukte | Aspirin   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Acetamidoantipyrin  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Formylaminoantipyrin  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | (2-Acetyl-2-Methyl-1-Phenylhydrazino)-oxoessigsäure (als Methylester) | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | 1-Methyl-2-Phenyl-Acetohydrazid                                       | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Carbamazepin  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Diclofenac  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Diclofenac, 3'-Hydroxy-   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Diclofenac, 5-Hydroxy-  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Diclofenac, 4'-Hydroxy-   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | 2,6-Dichloranilin   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Gabapentin  | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Gabapentin, -Lactam   | < 0,1  | < 0,1  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Ibuprofen   | 41,3   | 21,5   | 15,3   | 0,61   | 0,04   | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Ibuprofen, Hydroxy-   | 128    | 110    | 33,7   | 2,96   | 0,04   | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Ibuprofen, Carboxy-   | 114    | 49,2   | 40,9   | 1,61   | 0,01   | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Lidocain  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Tramadol  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Tramadol, O-Desmethyl-  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| Venlafaxin   | < 0,01  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |       |
| Venlafaxin, Nor-                                       | < 0,01  | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |       |

Tabelle A12.7: Messergebnisse zu Spurenstoffen: Probe vom 20.11.2020, Teil 3

| Substanzgruppe   | Einzelsubstanz                         | P1-b   | P2-b   | P3-b   | P4-b   | P5-b   | P6-b  | P7-b  | P8-b  | P9-b  | P10-b | P11-b |
|--|--|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Natürliche Hormone<br>und Transformations-<br>produkte | Androstane-3,17-dione, (5.beta.)-      | 129    | 116    | 0,32   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | 3,33  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Androstane-3,17-dione, (5.alpha.)-     | 43,3   | 29,7   | 0,18   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | 1,99  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Androstane-3,11,17-trione, (5.beta.)-  | 96,5   | 61,2   | 1,44   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | 1,08  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Androstane-3,11,17-trione, (5.alpha.)- | 26,4   | 17,2   | 0,25   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | 0,06  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Prasteron                              | 18,8   | 12,5   | 0,30   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | 17β-Estradiol                          | 1,46   | 1,04   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Estron                                 | 6,65   | 4,77   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Equilin                                | 3,79   | 3,10   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| Duftstoffe und<br>Repellentien                         | Eugenol                                | 302    | 220    | 11,7   | < 1    | < 1    | 5,90  | 1,83  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | DEET                                   | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | 3,31   | 1,65   | 16,4  | 19,9  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
|  | Menthol                                | 302    | 285    | 14,2   | 1,55   | 0,24   | 0,47  | 6,45  | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |



