



Technische Universität Berlin
Fakultät III Prozesswissenschaften
FG Kreislaufwissenschaft und Recyclingtechnologie

Masterarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades Master of Science

Bewertung und Demonstration des Recyclingpotentials
menschlicher Fäkalien für die Quartiersbegrünung am
Beispiel eines Modellhauses des Ecovillage Hannover

eingereicht am 29.12.2022

von

Anna Möbus



Fachliche Betreuung Albrecht Fritze
TU Berlin, FG Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologien

Sarah Tietjen
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Erstgutachter*in Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter
TU Berlin, FG Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologien

Zweitgutachter*in Dr. Ariane Krause
Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V.

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Ort, Datum

Unterschrift

Abtretung der Nutzungsrechte

1. Ich, Anna Möbus, räume der Technischen Universität Berlin, Fakultät III, Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie, Leitung Frau Prof. Dr. Ing. Vera Susanne Rotter (nachfolgend Hochschule genannt) die zum Gebrauch meiner Arbeit mit dem Titel „Bewertung und Demonstration des Recyclingpotentials menschlicher Fäkalien für die Quartiersbegrünung am Beispiel eines Modellhauses des Ecovillage Hannover“ in Forschung und Lehre erforderlichen Nutzungsrechte ein, soweit die Hochschule zur Nutzung durch die gesetzlichen Schrankenbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes nicht ohnehin berechtigt ist.

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

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

Berlin, den 29.12.2022, _____

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei denen bedanken, die diese Arbeit möglich gemacht haben und mich auf meinem (etwas längeren) Weg unterstützt haben.

Allen voran Ariane Krause, die mich von Anfang bis Ende - von der Entwicklung des Themas, über den Gewächshausversuch, die Modellierung bis zur Korrektur - betreut hat und zu allen Themenbereichen mit ihrem beachtlichen Wissen fachlichen Input und Hilfestellungen gegeben hat.

Ein ganz lieber Dank geht auch an Sarah Tietjen, deren aufmunternde Worte mir in Zeiten großen Frustes immer wieder neue Kraft gegeben haben, die die Zeit im Gewächshaus noch ein bisschen sonniger gemacht hat und die mich aus jeder R-Sackgasse heraus manövriert hat.

In diesem Zuge möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des IGZ bedanken, bei den GärtnerInnen, die am Wochenende meine Blümchen nicht verdursten haben lassen und besonders Elke, die immer für ein Schwätzchen zu haben war. Und auch den anderen MitarbeiterInnen für die netten Mittagspausen draußen, egal ob Sonne oder Regen, und für die Hilfe bei der letzten Bonitur. Auch an die temporären IGZ-Mitarbeiter Alexia und Joss für die Unterstützung bei den endlosen Bonituren und beim Giessen.

Ich danke auch Albrecht für die unkomplizierten Verbindung zur Uni und für schnelle Hilfe bei Problemen bei der Modellierung der MFA und der Nutzung von STAN.

Ein Dank geht auch an das Team von Finizio, das meine Liebe zu Festivals mit der Liebe zur Bodenkunde verknüpft hat und durch die der Kontakt mit Ari zustande kam.

Aus meinem privaten Umfeld möchte ich meinen Mädels danken: Caro, Marie, Vicky, Selma und Chrissie, die immer eine Sektchen bereit hatten, wenn mir mal wieder die Decke auf den Kopf gefallen ist und für das richtige Maß an Ablenkung gesorgt haben, wenn ich mich in Kleinigkeiten verloren habe.

Und meinen Mitbewohnern Ella und Erwin, die mich immer wieder zum Lachen bringen mit ihren Albernheiten.

I also want to thank Seppi, for always knowing what to say when I was stressed and for making me feel very special. And of course for bringing my favorite dessert.

Danke auch an meine lieben Kollegen bei sglux dafür dass sie mich in den letzten Zügen der Arbeit vor der Vereinsamung bewahrt haben und an Tilman, der mich dazu gebracht hat diese Danksagung zu schreiben.

An dieser Stelle möchte ich noch einmal ausdrücklich Ari, Sarah und Albrecht danken, die mir meine Zeit gelassen haben, mich mit einer Engelsgeduld betreut haben und trotzdem immer schnell bei Problemen ansprechbar waren und mir geholfen haben.

Und ich danke Mutti, weil man Mutti zu selten „Danke“ sagt.

Abstract

The scope of the present work was to evaluate the recycling potential of nitrogen (N) and phosphorus (P) from urine and faeces.

A pot experiment with *Tagetes erecta* demonstrated which ratio of H.I.T. (ger.: Humusdünger aus Inhalten von Trockentoiletten) and NUF (nitrified urine fertilizer) produces the best plant growth. It was assessed via weekly survey of growth parameters.

To evaluate the recycling potential, a material flow analysis (MFA) was modeled using literature research. It was conducted on the substance levels of N and P over a year in a model house of the Ecovillage Hannover (evh) with 100 residents. The MFA included the collection of the faeces in urine-diverting dry toilets, the treatment of the solids via thermophilic composting and the stabilization of urine by nitrification and distillation.

The results of both methods formed the basis for the recommendation for the use of the produced fertilizers for neighborhood greening at evh.

The pot experiment revealed that a ratio of NUF:H.I.T. of 3:1, as well as sole fertilization with NUF produced the same statistical results as the mineral control fertilization in all properties examined.

The MFA showed that $322.9 \pm 25.7 \text{ kg N a}^{-1}$ and $32.46 \pm 2 \text{ kg P a}^{-1}$ are recycled in NUF and $78.84 \pm 19.6 \text{ kg N a}^{-1}$ and $27.26 \pm 4.6 \text{ kg P a}^{-1}$ in H.I.T.

These nutrient quantities are too high for sole use of neighborhood greening. Therefore, either legally approved soilless culture methods must be used or an exemption from the local authorities has to be sought.

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es das Recyclingpotential von Stickstoff (N) und Phosphor (P) aus Urin und Kot zu bewerten.

Ein Gefäßversuch mit *Tagetes erecta* demonstrierte welches Verhältnis von H.I.T: (Humusdünger aus Inhalten von Trockentoiletten) und NUF (engl.: nitrified urine fertilizer) das beste Pflanzenwachstum hervorbringt. Die Beurteilung erfolgte anhand einer wöchentlichen Bonitur.

Zur Bewertung des Recyclingpotentials wurde eine Materialflussanalyse (MFA) mittels Literaturrecherche auf den Substanzebenen von N und P über ein Jahr in einem Modellhaus des Ecovillage Hannover (evh) mit 100 Bewohnern modelliert. Die MFA umfasste die Sammlung der Fäkalien in Trockentrenntoiletten, sowie die Behandlung der Feststoffe mit thermophiler Kompostierung und der Aufbereitung des Urins durch Nitrifizierung und Destillation.

Die Ergebnisse beider Methoden bildeten die Grundlage für die Erstellung einer Nutzungsempfehlung der produzierten Düngemittel zur Quartiersbegrünung im evh.

Der Gefäßversuch ergab, dass ein Verhältnis von NUF:H.I.T. von 3:1, sowie alleinige Düngung mit NUF in allen untersuchten Eigenschaften statistisch gleiche Ergebnisse erbrachte wie die mineralische Kontrolldüngung.

Die MFA zeigte, dass bei der Fäkalienbehandlung $322,9 \pm 25,7 \text{ kg N a}^{-1}$, sowie $32,46 \pm 2 \text{ kg P a}^{-1}$ im NUF und $78,84 \pm 19,6 \text{ kg N a}^{-1}$ und $27,26 \pm 4,6 \text{ kg P a}^{-1}$ im H.I.T. enthalten sind.

Für die Verwendung der Düngemittel zur Quartiersbegrünung in gängiger Praxis sind diese Nährstoffmengen zu hoch. Daher müssen entweder rechtlich zugelassene bodenunabhängige Anbaumethoden angewendet oder eine Ausnahmegenehmigung der örtlichen Behörden angestrebt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hintergrund und Stand der Technik	2
2.1	Globale Nährstoffkrise	2
2.1.1	Nährstoffmanagement in Deutschland	4
2.2	Ressourcenorientierte Sanitärsysteme	7
2.2.1	Ecovillage Hannover	8
2.2.2	Rechtliche Einordnung des Nährstoffrecycling aus Fäkalien	9
2.3	Behandlung von Inhalten aus Trockentrenn toiletten	11
2.3.1	Thermophile Kompostierung von Inhalten aus Trockentoiletten	11
2.3.2	Nitrifizierung von Urin	12
3	Material und Methoden	15
3.1	Gefäßversuch	15
3.1.1	Verwendete Dünger	15
3.1.2	Physikalische Analysen der Dünger	16
3.1.3	Vorbereitung des Gefäßversuches	17
3.1.4	Durchführung	19
3.1.5	Statistische Auswertung	19
3.2	Materialflussanalyse	20
3.2.1	Zielstellung	20
3.2.2	Grundlagen der MFA	20
3.2.3	Systemdefinition	21
3.2.4	Vorgehen	21
4	Ergebnisse	23
4.1	Gefäßversuch	23
4.1.1	Wuchshöhe	23
4.1.2	Durchmesser	23
4.1.3	Anzahl der Zweige	24
4.1.4	Blüten	25
4.1.5	Biomasse	26
4.1.6	Zusammenfassung	26
4.2	Massenflussanalyse	27
4.2.1	Qualitatives Modell	27
4.2.2	Quantitatives Modell	30
4.3	Synthese	33
4.3.1	Mögliche Anbaumethoden	33
4.3.2	Quartiersbegrünung im evh	36
5	Diskussion	40
5.1	Düngerherstellung im evh	40
5.2	Skalierbarkeit des Gefäßversuches auf die Quartiersbegrünung im evh	43
6	Schlussfolgerung	47
A	Anhang	57

Abbildungsverzeichnis

2.1	Anthropogene N_r Produktion von 1860 bis 2000	3
2.2	Städtebaulicher Entwurf der Baufelder des evh	9
2.3	Aufbau C.R.O.P. Filter	14
4.1	Messung der Wuchshöhe aller Varianten	23
4.2	Mittlere Wuchshöhe bei Ernte	24
4.3	Messung der Pflanzendurchmesser aller Varianten	24
4.4	Anzahl der Zweige aller Varianten	25
4.5	Mittlere Anzahl an Zweigen bei Ernte	25
4.6	Anzahl der Blüten aller Varianten	26
4.7	Mittlere Anzahl an Blüten bei Ernte.	26
4.8	Qualitatives Modell der MFA evh	28
4.9	Subsysteme TTT und Verwertungshof im qualitativen Modell	29
4.10	Subsystem TTT auf Substanzebene von N und P	30
4.11	Subsystem Verwertungshof auf Substanzebene von N und P	31
4.12	Quantitatives Modell auf Substanzebene von N und P	32
4.13	Übersicht Bodenunabhängiger Kulturverfahren	33
4.14	Schemas vertikaler Kulturverfahren	34
4.15	Schemas verschiedener Fassadenbegrünungen	34
5.1	Wiederfindungsraten der Fäkalienbehandlung im Vergleich	42
5.2	Stresssymptome Keimlinge Woche 3 bei K_{org} und K_0	45
A.1	Temperaturverlauf und Füllstand des Hygienisierungscontainers	57
A.2	Temperaturen Mai 2021, Potsdam	59
A.3	Sonnenstunden Mai 2021, Potsdam	60

Tabellenverzeichnis

2.1	Globale Verteilung der Rohphosphatvorkommen	3
2.2	Nährstofffrachten Abwasserteilströme	8
2.3	Zusammensetzung der optimalen Kompostmiete	12
3.1	Übersicht der Dünger-Anteile der Varianten im Gefäßversuch	17
3.2	Düngemittelgabe der Gefäße nach Varianten	18
4.1	Biomasse bei Ernte.	27
4.2	Theoretische Anbauflächen von Gemüse im Freiland	37
4.3	Theoretische Anbauflächen von Zierpflanzen im Freiland	38
5.1	N/P-Verhältnis im Vergleich	43
A.1	Laborbefund der Flüssigdünger	57
A.2	Laborbefund Kompostanalysen	58
A.3	Eingabewerte in STAN	59

Abkürzungsverzeichnis

BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost
BNF	Biologische N-Fixierung
C.R.O.P.	Combined Regenerative Organic food Production
evh	ecovillage hannover
H.I.T.	Humusdünger aus Inhalten von Trockentoiletten
HyCo	Hygienisierungscontainer
IGZ	Leibnitz Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau
MFA	Materialflussanalyse
NUF	nitrifizierter Urin-basierter Flüssigdünger (<i>engl.: nitrified urine-based fertilizer</i>)
SFA	Substanzflussanalyse
TTT	Trockentrenntoiletten

Chemische Elemente und Moleküle

C	Kohlenstoff
N	Stickstoff
N _r	reaktiver Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium
N _{min}	pflanzenverfügbare, mineralischer Stickstoff
N _{tot}	gesamter Stickstoffgehalt
P	Phosphor

Düngevarianten des Gefäßversuchs

Variante	verwendeter Dünger
K ₀	Nullvariante ohne Düngung
K _{org}	konventioneller organischer Dünger (Vinasse)
K _{min}	konventioneller mineralischer Dünger (Osmocote exact)
A ₂₅	25% Aurin, 75% Fäkalkompost
A ₅₀	50% Aurin, 50% Fäkalkompost
A ₇₅	75% Aurin, 25% Fäkalkompost
A ₁₀₀	100% Aurin
C ₂₅	25% C.R.O.P., 75% Fäkalkompost
C ₅₀	50% C.R.O.P., 50% Fäkalkompost
C ₇₅	75% C.R.O.P., 25% Fäkalkompost
C ₁₀₀	100% C.R.O.P.
F ₁₀₀	100% Fäkalkompost

1. Einleitung

Wir leben in Zeiten ungleicher globaler Nährstoffverteilung. Während in Ländern des globalen Südens unzureichende Verfügbarkeit von Nährstoffen eine selbstbestimmte Ernährung erschwert [CEH 2013], führt das Überangebot synthetischer Düngemittel in Industrieländern zu schwerwiegenden Umweltproblemen durch hoch intensivierte Landwirtschaft [Cordell u. a. 2009]. Wegen der Einführung des Haber-Bosch-Verfahrens und dem Abbau geogener P-Reserven sind schnell pflanzenverfügbare Nährstoffe seit Mitte des 20. Jh. weiträumig kommerziell erwerblich [CEH 2013]. Durch diese Entwicklung in Kombination mit der Implementation zentraler Abwasserreinigungsanlagen zu Beginn des selben Jh. [Abellán 2017] sah man keine Notwendigkeit mehr Nährstoffkreisläufe, die seit Jahrhunderten bestand hatten, zu erhalten [CEH 2013]. Energieaufwendig verfügbar gemachte Nährstoffe werden in Deutschland am Ende der Nahrungskette in einem linearen System in Abwasserbehandlungsanlagen im Klärschlamm gebunden [UBA 2018] und zu ca. 80 % thermisch verwertet [destatis 2022].

In Zeiten von Ressourcenknappheit, Klimawandel und Energiekrise startet langsam ein Umdenken und es gibt mehr und mehr Forschung zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus menschlichen Fäkalien [Londong 2008]. Neuartige Sanitärsysteme (NASS) dienen dabei als Grundstein für die getrennte Erfassung von Fäkalien, um eine gezielte Stoffstrombehandlung zu ermöglichen [DWA 2015]. Doch bisher werden diese hauptsächlich im Rahmen kleinerer Projekte oder bei Veranstaltungen genutzt [Berger 2008]. Besonders die Einrichtung solcher Systeme in Alltagsbereich stößt immer noch auf Vorurteile aufgrund erwartetem geringeren Komforts bei der Nutzung [ebd.].

Der Neubau des Quartiers vom Ecovillage Hannover (evh) bietet eine Möglichkeit diese Ressentiments abzubauen und als Leuchtturmprojekt der Anwendung von NASS im Alltag, sowie der Aufbereitung der Stoffströme zu dienen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Recyclingpotential der Nährstoffe in menschlichen Fäkalien für die Quartiersbegrünung des evh bewertet. Dafür wurde die Sammlung und Behandlung der Fäkalien von 100 Bewohnern eines fiktiven Modellhauses über ein Jahr mittels einer Materialflussanalyse (MFA) modelliert. Zusätzlich fand die Demonstration des Recyclingpotentials anhand eines Gefäßversuches mit der Studentenblume (*Tagetes erecta*) statt, in dem das für das Pflanzenwachstum beste Verhältnis von Humusdünger aus Inhalten von Trockentoiletten (H.I.T.) und urinbasiertem Flüssigdünger (NUF, engl.: nitrified urine fertilizer) ermittelt wurde.

Anhand der Ergebnisse der Stoffstromanalyse und des Gefäßversuchs wurden mögliche Szenarien der Nutzung der Recyclingdünger zur Quartiersbegrünung im evh diskutiert und für Entscheidungsprozesse in der weiteren Planungsphase des Quartiers aufbereitet.

2. Hintergrund und Stand der Technik

In den folgenden Kapiteln werden die Hintergründe der vorliegenden Arbeit näher beleuchtet. Dabei wird zunächst auf den Status Quo der Nährstoffwirtschaft auf globaler Ebene und in Deutschland eingegangen und die sich daraus ergebende Relevanz des Nährstoffrecyclings. Anschließend werden Ansätze zur möglichen Kreislaufführung im Rahmen des Themenkomplexes dargestellt und das evh als Praxisobjekt für diese Arbeit vorgestellt, sowie rechtliche Grundlagen der Anwendung von Recycligdüngern.

Kapitel 2.3 beschreibt im Detail welche Aufbereitungsmethoden von Fäkalien in dieser Arbeit modelliert werden.

2.1 Globale Nährstoffkrise

Stickstoff (N) und Phosphor (P) zählen zu den Hauptnährelementen für das Pflanzenwachstum und sind damit von essentieller Bedeutung für Landwirtschaft und Gartenbau. Ca. 99% des globalen N-Vorkommens befindet sich als elementarer Distickstoff (N_2) in der Atmosphäre [Galloway u. a. 2003, dieser Vorrat ist für 99% der Organismen nicht verfügbar [ebd.] aufgrund seiner stabilen 3-fach Bindung und wird daher als nicht-reaktiv betrachtet. Die Überführung dieser Verbindung in reaktiven Stickstoff N_r erfordert eine große Menge Energie, die in natürlichen Systemen nur bei Prozessen unter hoher Temperatur und von wenigen N-fixierenden Mikroorganismen aufgebracht werden kann [ebd.].

Vier anthropogene Prozesse führen seit Mitte des 19. Jh. zu einem rapiden Anstieg von N_r auf globaler Ebene: der landwirtschaftliche Anbau von Leguminosen (biologische N-Fixierung), das Haber-Bosch-Verfahren (industrielle Fixierung von N_2 zu Ammonium, NH_3), die energetische Verwendung fossiler Rohstoffe (Freisetzung des darin enthaltenen N) und Verbrennungsprozesse (Konvertierung atmosphärischen N_2 in N_r) [UBA 2011; CEH 2013; Galloway u. a. 2003; Rockström u. a. 2009]. Durch diese Prozesse ist die Menge des umgesetzten N_r seit 1860 von 15 Tg N auf 165 Tg N a^{-1} im Jahr 2000 angestiegen [Galloway u. a. 2003] (siehe Abb. 2.1).

Während N in großen Mengen in der Atmosphäre anzufinden ist, ist man bei der Produktion von P-Düngern weitestgehend auf endliche, geogene Reserven angewiesen. In natürlichen Ökosystemen kommt P nicht elementar vor, sondern in gebundener Form als Rohphosphate [EcoSanRes 2008]. Der Abbau dieser nicht erneuerbaren Ressource stieg seit den 1950er Jahren aufgrund des zunehmenden weltweiten Nahrungsmittelbedarfs rapide an, laut IFA (2021) wird der globale Bedarf an P-Düngern bis 2026 erneut um 1-2% wachsen.

Die verbleibenden Rohphosphatreserven sind geografisch ungleichmäßig verteilt und werden von wenigen Ländern beherrscht, allen voran Marokko, Irak und China [CEH 2013; Stenzel u. a. 2019]. Allein China und Marokko sind für mehr als 50% der globalen P-Düngerproduktion [CEH 2013] verantwortlich (siehe Tab. 2.1).

Während manche Quellen von einer künftigen Verfügbarkeit dieser Reserven von 50-100 Jahren sprechen und zu einem nachhaltigem Umgang mit mineralischen P-Düngern aufrufen [Cordell u. a. 2009; EcoSanRes 2008], widersprechen Andere dieser Annahme, weil die Ausdehnung geogener Reserven nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden kann [Scholz u. a. 2013]. Im Falle einer Verknappung natürlicher Rohphosphatressourcen bestünde eine Gefahr für die künftige Nahrungsmittelsicherheit aufgrund steigender Düngemittelpreise und sinkender Düngerqualität, da vermehrt mit Schwermetallen verunreinigte Reserven verwendet werden müssten [EcoSanRes 2008]. Doch auch wenn keine Verknappung die-

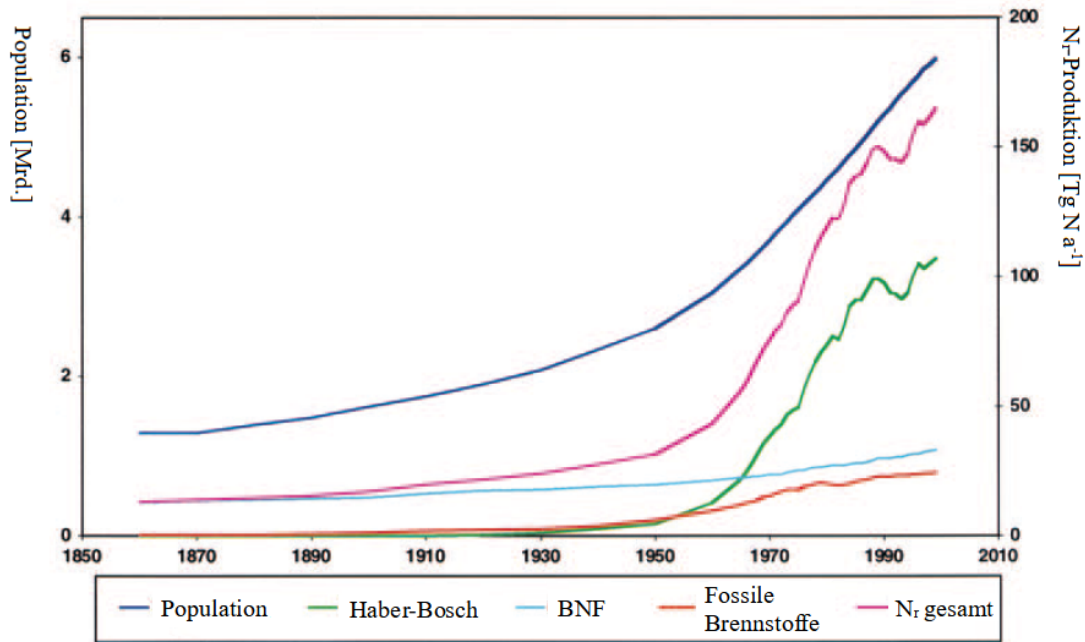


Abbildung 2.1: Anthropogene N_r Produktion von 1860 bis 2000 nach Galloway u. a. 2003. Die linke y-Achse bezieht sich auf die globale Population, die rechte auf die N_r -Produktion. „Haber-Bosch“ repräsentiert den durch das Haber-Bosch-Verfahren produzierte NH_3 , „BNF“ beschreibt die Biologische N-Fixierung durch landwirtschaftlichen Leguminosenanbau, „Fossile Brennstoffe“ stellt die N-Freisetzung durch die energetische Nutzung fossiler Rohstoffe dar.

Tabelle 2.1: Länder mit den weltweit größten Vorkommen von Rohphosphaten als P_2O_5 [CEH 2013]

Land/ Kontinent	P_2O_5 -Abbau (2011) [Mt]	P_2O_5 -Reserven [Mt]
Algerien	1,8	2.200
China	72,0	3.700
Irak	–	5.800
Marokko	27,0	50.000
Europa gesamt	–	–
weltweit	191,0	71.000

ser Ressource zu erwarten ist verstärkt die Weiterführung des Status Quo langfristig die negativen Umwelteinflüsse übermäßiger Düngemittelnutzung [Scholz u. a. 2013].

Rund 2% des globalen Energieverbrauchs wird für die Produktion von NH_3 aus unreaktivem N_2 mithilfe des Haber-Bosch-Verfahrens aufgewendet [CEH 2013]. Einmal in der Umwelt befindliches N_r kann in Atmo-, Hydro- und Biosphäre multiple negative Auswirkungen haben. Problematisch ist besonders, dass sich die schädlichen Folgen verschlimmern, während sich das N_r durch alle Umweltmedien bewegt, Galloway u. a. (2003) bezeichnet diesen Vorgang als „Stickstoff Kaskade“. Die genaue Herkunft des N_r ist bedeutungslos, sobald es sich erst einmal in der Kaskade befindet, je mehr N jedoch fixiert wird, desto stärker sind die negativen Umweltwirkungen.

So wird lediglich die Hälfte des in Agrarökosysteme eingebrachten N_r von Pflanzen aufgenommen, der Rest geht in die Atmosphäre aus oder erodiert in aquatische Ökosysteme. In der Atmosphäre führen diese N_r -Spezies durch die Bildung troposphärischen Ozons zu Atemwegsbeschwerden, Herzerkrankungen und einem erhöhten Krebsrisiko, in der Stratosphäre zur Ausdünnung der Ozonschicht. Atmosphärische Deposition von N_r führt zur Versauerung von Böden und Gewässern und damit einhergehend zu Biodiversitätsverlust

und Eutrophierung. Über Flüsse wird N_r in die Küstenregionen transportiert, wo es zu so genannten „Todeszonen“ aufgrund von Algenblüten durch Eutrophierung kommt [Galloway u. a. 2003].

Auch bei der Nutzung von P-Düngern kommt es durch Auswaschung aus agrarisch genutzten Böden zu Eutrophierung von Oberflächengewässern. So werden laut Cordell u. a. (2009) ca. 55% des in der Landwirtschaft genutzten mineralischen Düngers in Oberflächengewässer ausgewaschen [Cordell u. a. 2009]. Zusätzlich besteht die Problematik, dass bei der Produktion von 1 t Phosphat aus Rohphosphaten 5 t Phosphorgips entstehen [ebd.]. Die agrarische Nutzung dieses toxischen Nebenprodukts ist in vielen Ländern untersagt, da es in großen Mengen Radionuklide von Uran und Thorium enthält. Auch in den Düngern können geringe Mengen dieser Stoffe enthalten sein, die sich im Laufe der Zeit in landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzten Böden anreichern. Andere unerwünschte Stoffe in Rohphosphaten sind beispielsweise Cadmium und Arsen, die sich in der Nahrungskette anreichern, auch wenn sie nur in geringeren Mengen im Dünger enthalten sind [ebd.].

Da die globale Verteilung der Rohphosphatreserven ungleich ist, kommen zusätzlich lange Transportwege und damit einhergehender hoher Verbrauch an fossilen Brennstoffen hinzu. Bis 2025 werden weltweit voraussichtlich mehr als 50 Mio t P_2O_5 weltweit gehandelt [IFA 2021].

Im Hinblick auf diese problematischen Folgen der Nutzung mineralischer Dünger für Mensch und Umwelt muss ein Umdenken hin zur Kreislaufwirtschaft von essentiellen Pflanzennährstoffen erfolgen [Rockström u. a. 2009].

2.1.1 Nährstoffmanagement in Deutschland

Laut Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) bezeichnet Recycling *„jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden“* (§3 XXV KrWG).

Die Nährstoffzusammensetzung von Fäkalien¹ variiert je nach konsumierter Nahrung. Jedoch werden nahezu 100% der aufgenommenen Nährelemente vom Menschen wieder ausgeschieden [Jönsson und Vinnerås 2013], somit enthalten menschliche Ausscheidungen sämtliche Makro²- und Mikronährelemente³, die für das Pflanzenwachstum essentiell sind. Dadurch bilden Fäkalien ein gutes Ausgangsmaterial für eine stoffliche Verwertung, um Nährstoffdefizite nach der Ernte auf landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzten Flächen auszugleichen [Cordell u. a. 2009; EcoSanRes 2008, Jönsson, Stintzing u. a. 2004; Jönsson und Vinnerås 2013].

Im Durchschnitt scheidet der Mensch $1,4 \text{ L d}^{-1}$ Urin aus [DWA 2015], dieser besteht zu etwa 95 % aus Wasser, der Rest sind gelöste Salze [Friedler u. a. 2013]. Für die vorliegende Arbeit wurde von einem Anteil im Urin von etwa 86 % N und 63 % P ausgegangen und dem entsprechend von ca. 14 % N und 37 % P im Kot (siehe Tab. A.3). Von Natur aus enthält Harn kaum Pathogene, jedoch kommt es zu Kontamination durch Kontakt mit Kot [DWA 2008; Friedler u. a. 2013].

In Fäzes⁴ befinden sich neben wasserlöslichen auch nicht-wasserlösliche Stoffe, der Feststoffanteil beträgt ca. 23 % [Friedler u. a. 2013]. Kot weist im Vergleich zu Urin einen hohen Anteil an Organik auf, jedoch eine geringere Nährstoffdichte. Die am Tag ausgeschiedene Fäzesmenge hängt unter anderem stark von Nahrung, Klima und Gesundheitszustand der

¹Fäkalien beinhaltet flüssige (Urin) und feste (Kot) Ausscheidungen

²Die mineralischen Makronährelemente sind Stickstoff, Phosphor, Kalium, Schwefel, Calcium und Magnesium [Jönsson, Stintzing u. a. 2004]

³Mikronährelemente umfassen Bor, Kupfer, Eisen, Chlor, Mangan, Molybden und Zink [Jönsson, Stintzing u. a. 2004]

⁴Fäzes bezeichnet nur die festen Ausscheidungen (Kot)

Person ab, Friedler u. a. (2013) gehen von einem Richtwert von 200 g FM p⁻¹ d⁻¹ aus. Neben essentiellen Pflanzennährstoffen enthalten Fäkalien jedoch auch Stoffe, die bei der stofflichen Verwertung unerwünscht sind. Besonders hervorzuheben ist die Pathogenlast⁵ von Kot, die bei ungeschützter Handhabung zu Krankheiten führen kann. Daher muss Grundlage des Nährstoffrecyclings aus menschlichen Fäkalien stets eine ausreichende Hygienisierung sein. Urin enthält von Grund auf keine schädlichen Krankheitserreger [Etter und Udert 2016].

Menschliche Ausscheidungen enthalten zusätzlich Arzneimittelrückstände und Hormone. Bisherige Studien beschäftigen sich jedoch vorrangig mit den Konzentrationen im Rahmen der konventionellen Abwasserreinigung (also in Siedlungsabwassern, Klärschlämmen und Gewässern) als mit den Gehalten der einzelnen Abwasserströme, daher ist eine Bewertung der Humanarzneimittellast in Fäkalien nach aktuellem Kenntnisstand schwierig [UBA 2018]. Hinzu kommt die Tatsache, dass ein Nachweis einzelner Substanzen aufgrund der Fülle an zugelassenen Wirkstoffen nicht realisierbar ist. So stieg laut UBA (2018) der Verbrauch der 1.200 in Deutschland zugelassenen pharmazeutischen Wirkstoffe mit möglicher Umweltrelevanz von 6.200 t im Jahr 2002 in 10 Jahren auf 8.120 t, was einem Anstieg von 30 % entspricht.

Fäkalien enthalten ebenso eine geringe Menge Schwermetalle, einige dieser gelangen als Mikronährstoffe über die Nahrung in das menschliche System (siehe Fussnote S. 4) und sind in dementsprechend geringen Konzentrationen vorhanden [Jönsson, Stintzing u. a. 2004]. Jedoch können auch erhöhte Gehalte vorhanden sein, so reichert sich Cadmium beispielsweise durch Verunreinigungen von mineralischen Phosphordüngern in der Nahrungskette an [EcoSanRes 2008]. Kupfer und Zink sind Mikronährelemente, jedoch können aufgrund der verwendeten Baumaterialien bei sanitären Hausinstallationen, wie zum Beispiel Rohrleitungen, erhöhte Werte in Menschlichen Ausscheidungen beobachtet werden [UBA 2018]. Im Allgemeinen sind die in Fäkalien nachweisbaren Schwermetallgehalte jedoch geringer als in konventionellen organischen Recyclingdüngern, wie zum Beispiel Gülle, Mist oder Klärschlamm [DWA 2008; Jönsson, Stintzing u. a. 2004; UBA 2018].

Insgesamt bietet die stoffliche Verwertung von Nährstoffen aus menschlichen Fäkalien eine Möglichkeit die Primärproduktion konventioneller, mineralischer Düngemittel zu reduzieren und Nährstoffkreisläufe auf lokaler Ebene zu schaffen. Die in Kapitel 2.1 genannten negativen Folgen des Gebrauchs mineralischer Dünger können auf diese Weise vermindert werden.

Konventionelle Abwasserbeseitigung

Die Aufgabe der kommunalen Abwasserbeseitigung ist laut Wasserhaushaltsgesetz (WHG) das Sammeln und Ableiten von Schmutzwasser, sowie die Behandlung zur Reduzierung unerwünschter Schad- und Nährstoffe zum Schutz der menschlichen Gesundheit, der Gewässer und deren Bioszönose [UBA 2017].

Bei der konventionellen Abwasserableitung in Deutschland werden neben Fäkalien auch andere Abwasserströme erfasst. Die durchschnittliche Menge häuslichen Abwassers beläuft sich auf 148 L p⁻¹ d⁻¹, wovon ca. 73 % auf Grauwasser entfallen. Dieses umfasst Wasser aus Dusche oder Badewanne (28 %), Küchenspüle (17 %), Waschmaschine (16 %), Badezimmerwaschbecken (10 %) und Geschirrspüler (2 %). Die restlichen 27 % bestehen aus Schwarzwasser⁶ [Friedler u. a. 2013]. Zusätzlich werden in kommunalen Klärwerken auch gewerbliche Abwässer, deren Zusammensetzung je nach angesiedelten Betrieben stark variieren kann und im Falle einer Mischkanalisation Regenwasser eingeleitet [UBA 2018].

⁵Pathogene in Fäzes sind vor allem Bakterien, Viren, Protozoen (=tierische Einzeller) und Helminthen (=Würmer)

⁶Schwarzwasser = Braunwasser (Kot, Toilettenpapier und Spülwasser) + Gelbwasser (Urin und Spülwasser) [DWA 2008]

Die Aufbereitung des Abwassers geschieht in 3 Schritten, der mechanischen, biologischen und chemischen Behandlung. Bei der mechanische Aufbereitungsstufe werden große Gegenstände (5 - 20 mm), mineralische Feststoffe (z.B. Sand $>0,1$ mm), aufschwimmende Stoffe (z.B. Fette) und sedimentierende Feststoffe aus dem Zulauf entfernt. In der biologische Behandlungsstufe werden biologisch abbaubare Verbindungen durch Mikroorganismen verstoffwechselt, zusätzlich wird der enthaltene Stickstoff zunächst Nitrifiziert⁷, und dann Denitrifiziert⁸. Die chemische Abwasserbehandlung dient der Fällung von P mit anorganischen Stoffen. Das behandelte Abwasser wird nach der Reinigung über den Ablauf in Oberflächengewässer geleitet, übrig bleibt Klärschlamm, in dem sich diverse Schadstoffe anreichern, wie im folgenden Kapitel beschrieben [BLfU 2013; UBA 2017].

Die Anforderungen an das gereinigte Wasser richten sich nach der Größe der Kläranlage und müssen dem aktuellen Stand der Technik entsprechen [BLfU 2013].

Der nach der Abwasseraufbereitung übrig bleibende Klärschlamm enthält neben einem Teil der Nährstoffe aus dem Klärwerkszulauf eine Vielzahl unerwünschter Stoffe, wie zum Beispiel Arzneimittelrückstände, Schwermetalle, Kunststoffe, organische Verbindungen und Pathogene [UBA 2018; BLfU 2013].

Im Jahr 2021 fielen in öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen in Deutschland ca. 1,7 Mio t TM Klärschlamm an [destatis 2022] davon wurden etwa 20 % stofflich in der Landwirtschaft verwertet [ebd.].

Nährstoffe im Klärschlamm entstammen hauptsächlich aus Fäkalien (siehe Kap. 2.1.1), doch auch Detergenzien und unsachgemäße Entsorgung von Nahrungsmitteln leisten einen Beitrag zur Nährstofffracht [UBA 2018].

Arzneimittelrückstände gelangen einerseits durch menschliche Ausscheidung in den Klärschlamm, andererseits durch fälschlich in Sanitäranlagen entsorgte Medikamente [DVGW 2015]. Während über deren Gehalte in Oberflächengewässern und im Ablauf von Klärwerken eine breite Datenlage existiert, ist der Chemismus von Medikamentenrückständen im Klärschlamm bisher kaum untersucht [UBA 2018]. In einer Studie von Stenzel u. a. (2019) wurden in Schlämmen maximale Antibiotikakonzentrationen von bis zu 21 mg kg^{-1} nachgewiesen, Östrogene wurden bis zu $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$ gefunden. Des Weiteren konnten relevante Gehalte an Antiepileptika und Lipidsenker nachgewiesen werden.

Schwermetalle im Klärschlamm stammen sowohl aus häuslichen und gewerblichen Abwassern, sowie vom Oberflächenabfluss von Niederschlägen. Laut UBA (2018) sinken die Schwermetallgehalte seit 1977 stetig, so reduzierte sich durch die Einführung bleifreien Benzins die Bleikonzentration bis 2015 um 86,1 % auf $30,6 \text{ mg kg}^{-1}$. Durch die Nutzung von Amalgamabscheidern in Zahnarztpraxen sank die Quecksilberkonzentration um 91,8 % auf $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$. Die Konzentrationen von Zink ($713 - 800 \text{ mg kg}^{-1}$) und Kupfer ($292 - 309 \text{ mg kg}^{-1}$) zeigten seit 2000 wieder einen leichten Anstieg und pendelten sich seitdem auf einem konstanten Niveau ein, was auf einen vermehrten Einsatz zink- und kupferhaltiger Baustoffe zurückzuführen ist [UBA 2018].

Klärschlamm besteht zu einem Großteil aus Organik (45 - 90 % TS) [UBA 2018], jedoch rücken organische Schadstoffe aufgrund der immer neuen verwendeten Stoffe in Industrie und Haushalt immer mehr in den Mittelpunkt, da sie teilweise schwer abbaubar sind und sich in Umweltkompartimenten anreichern können. Organische Schadstoffe stammen aus verschiedenen Quellen, dazu gehören beispielsweise Reinigungsmittel, Körperpflegeprodukte und Heimwerkerchemikalien (Holzschutzmittel, Lacke, Oberflächenbeschichtungen, etc.), hinzu kommen diffuse Einträge aus Verbrennungsprozessen und gezielt eingesetzte Stoffe aus industrieller Produktion. Ein Nachweis aller potentiell schädlicher Substanzen ist auch hier aufgrund des großen Stoffspektrums nicht möglich, daher müssen nur einige Stoffe stellvertretend für ganze Stoffgruppen im Klärschlamm

⁷Mikrobiologische Umwandlung von Ammonium zu Nitrat

⁸Mikrobiologische Umwandlung von Nitrat zu Luftstickstoff

untersucht werden, sowie hoch toxische Einzelsubstanzen. So wurden in europäischen Klärschlämmen beispielsweise 200 - 400 mg AOX⁹ kg⁻¹ TS [ebd.] nachgewiesen und 5 - 100 ng PCDD/F¹⁰ kg⁻¹ TS [ebd.]. Der Grenzwert von AOX liegt laut AbfKlärV bei 400 mg kg⁻¹ TS, der von PCDD/F nach DüMV bei 30 ng kg⁻¹ TS.

Kunststoffe sind im Abwasser in verschiedenen Größen auffindbar: Makro- (>25 mm), Meso- (5 - 25 mm) und Mikroplastik (<5 mm) [UBA 2018]. Mikroplastik stammt unter anderem aus Kosmetika, Detergenzien und von Abrieb von Textilien beim Waschen, auch diffuse Einträge aus der Mischkanalisation im urbanen Raum sind möglich (z.B. Reifenabrieb, Feinstaub oder weggeworfener Müll). Im Abfluss von Kläranlagen werden laut Liebmann (2015) kaum Kunststoffe nachgewiesen, jedoch reichern sie sich im Rechengut (Makro- und Mesoplastik) und im Klärschlamm (Mikroplastik) an, so wurden im Klärschlämmen bis zu 20.000 Partikel kg⁻¹ nachgewiesen. Der Nachweis von Kunststoffen wird durch die morphologische Bandbreite der Partikel erschwert, daher existieren bisher keine einheitlichen Beprobungs- und Untersuchungsmethodiken oder Grenzwerte [Liebmann 2015].

Pathogene gelangen hauptsächlich über Fäkalien ins Abwasser. Durch die Schadstoffe im Klärschlamm (Schwermetalle, Arzneimittelrückstände, Desinfektionsmittelreste) entsteht jedoch ein Selektionsdruck für Mikroorganismen, der das Wachstum antibiotikaresistenter Keime befördert, sodass sich deren Anteil an der Bakterienpopulation erhöht. Hinzu kommt, dass durch das nährstoffreiche Milieu der Metabolismus von Mikroorganismen angeregt und der horizontale Genaustausch von Resistenzen begünstigt wird. Auf diese Weise können sich in nicht hygienisierten Klärschlämmen multiresistente Keime bilden [Wolters u. a. 2022; UBA 2018].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Zusammensetzung von Klärschlämmen je nach Ort des Anfalls, Einzugsgebietsgröße und einleitenden Gewerben starken Schwankungen unterliegt und eine stoffliche Verwertung von Klärschlamm konstanter Überwachung und Dokumentation unterliegen muss, um schädliche Wirkungen auf agrarisch genutzten Flächen auszuschließen.

2.2 Ressourcenorientierte Sanitärsysteme

Neuartige Sanitärsysteme (NASS), auch Ressourcenorientierte Sanitärsysteme, bieten die Möglichkeit Abwasserteilströme getrennt zu erfassen und zielgerichtet zu behandeln [DWA 2008; Horn u. a. 2013; Kelova u. a. 2021; UBA 2017]. Es existieren eine Vielzahl an Alternativen zum konventionellen Wasserklosett. Diese lassen sich beispielsweise nach Art der Speicherung (Trocken-, Chemikalien-, Verbrennungs-, Verpackungs- oder Gefriertoiletten), Spüleinrichtung (ohne Spülung, Ein- und Zweimengenspülung) oder Art der Ableitung (Vakuumsystem, Schwerkraftentässerung, Behältersysteme) einteilen [DWA 2008].

Laut DWA (2008) zeichnen sich NASS besonders durch ihren ressourcenorientierten Ansatz aus: die Erfassung separater Stoffströme erleichtert durch gezielte Behandlung die Wiederverwendung von Wasser sowie die Verwertung von Nährstoffen aus den Abwasserteilströmen.

Laut Udert, Larsen u. a. (2006) steuert Urin im konventionellen Abwassersystem die höchste Menge Nährstoffe bei, besitzt jedoch eine sehr niedrige Schadstofflast sowie ein geringes Volumen (siehe Tab. 2.2). Die Trennung dieses Abwasserstroms vom Siedlungsabwasser bedeute daher eine starke Entlastung der zentralen Abwasserbehandlung. Nach Jönsson und Vinnerås (2013) könnte eine komplette Entkopplung der Fäkalien von der zentralen Abwasserbehandlung die Nährstoffeliminierung im Klärwerk obsolet machen.

⁹Adsorbierbare organische Halogenverbindungen [UBA 2018]

¹⁰Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane [ebd.]

Tabelle 2.2: Volumenstrom und Nährstofffrachten von Abwasserteilströmen. Quellen der Teilströme Urin und Fäzes sind Tab. A.3 zu entnehmen, Daten für Grauwasser nach DWA (2008)

Parameter	Einheit	Urin	Fäzes	Grauwasser
Volumen	L E ⁻¹ d ⁻¹	1,41	0,14	108
N	g E ⁻¹ d ⁻¹	10,34	1,73	1,0
p	g E ⁻¹ d ⁻¹	0,99	0,58	0,5

Im Jahr 2019 betrug die Anschlussrate an das Abwassernetz in Deutschland 99,4 % [BDEW 2021], das von Jönsson und Vinnerås (2013) beschriebene Szenario wird daher so in absehbarer Zukunft nicht umsetzbar sein. Die zentrale Abwasserbehandlung ist wenig flexibel, besonders im Hinblick auf den demografischen Wandel kann dies zu Problemen führen: in ruralen Gebieten sinken die Einwohnerzahlen, sodass Klärwerke dort bald finanziell nicht mehr tragbar sein können, während der urbane Raum wächst, ohne dass sich die Kapazitäten der Abwasserbehandlungsanlagen erweiterbar sind [Londong 2008]. NASS bieten in Ballungsgebieten bei Neubau oder Grundsanierung von Stadtquartieren aufgrund ihres dezentralen und kleinräumigen Charakters eine Entlastung, bzw. Ergänzung, zum derzeitigen System [DWA 2008; Horn u. a. 2013]. Zusätzlich werden Oberflächengewässer durch die Nutzung von NASS entlastet, da in Fäkalien enthaltene Mikroverunreinigungen (Arzneimittel) in Klärwerken unzureichend entfernt werden und über das gereinigte Abwasser in aquatische Ökosysteme gelangen [Jönsson und Vinnerås 2013; Udert, Larsen u. a. 2006]. Eine gezielte Behandlung von Urin und Fäzes kann dem entgegen wirken, des weiteren besteht die Möglichkeit Nährstoffe aus getrennt erfassten Fäkalien ortsnahe zu rezyklieren und Nährstoffkreisläufe lokal zu schließen [DWA 2008; Kelova u. a. 2021; Londong 2008]. Die Implementierung von NASS erfordert einen hohen Planungs- und Investitionsaufwand (z.B. beim Leitungs-, Speicher- oder Abfuhrsystem) [Horn u. a. 2013], daher existieren bisher kaum alltagstaugliche Praxisprojekte, die Erfahrungswerte liefern [Horn u. a. 2013; Londong 2008]. Die Verwendung von Trockentoiletten beschränkt sich bisher auf wenige Objekte, die vorwiegend im Freizeitbereich anzuordnen sind (besonders Kleingärten [Berger 2008] oder Veranstaltungen [Finizio 2021b]). Die Einrichtung von NASS im Ecovillage Hannover (evh, siehe Kap. 2.2.1), sowie der notwendigen Infrastruktur zur hygienischen Verwertung der Endstoffe dient somit als Leuchtturmprojekt für eine praxistaugliche Kreislaufwirtschaft der Nährstoffe in menschlichen Fäkalien.

2.2.1 Ecovillage Hannover

Das *ecovillage hannover* (evh) ist ein genossenschaftlich organisiertes Stadtquartier im Stadtteil Kronsberg in Hannover, Niedersachsen [evh 2019; evh 2022].

2019 wurde die Wohnungsbaugenossenschaft *ecovillage hannover eG* gegründet mit dem Ziel bezahlbaren, selbst organisierten Wohnraum zu schaffen, ein Jahr später erfolgte der Erwerb des Baugrundstücks. Bereits im Frühjahr 2021 fand der symbolische „erste Spatenstich“ für ein Modulpilotgebäude statt [evh 2021; evh 2022]. Die Grundsätze des Zusammenlebens beruhen auf den Prinzipien Gleichheit, Gemeinschaft, Nachhaltigkeit und Vielfalt. Im Zusammenhang mit dem evh wurden neben der Wohnungsbaugenossenschaft der *Dorfleben ecovillage hannover eV* gegründet, der sich um gemeinnützige und integrative Projekte kümmert und ein aktives Dorfleben fördert, sowie eine Schnittstelle zum Informationsaustausch zwischen Initiativen mit ähnlichem Wertekanon darstellt [evh 2022]. Zusätzlich erfolgte die Gründung der Dienstleistungsgenossenschaft *ecotopia hannover eG*, deren Aufgabe darin besteht dem evh Dienstleistungen und Infrastruktur bereitzustellen und dadurch vor Ort Arbeitsplätze zu schaffen, deren wirtschaftliche Erträge dem evh

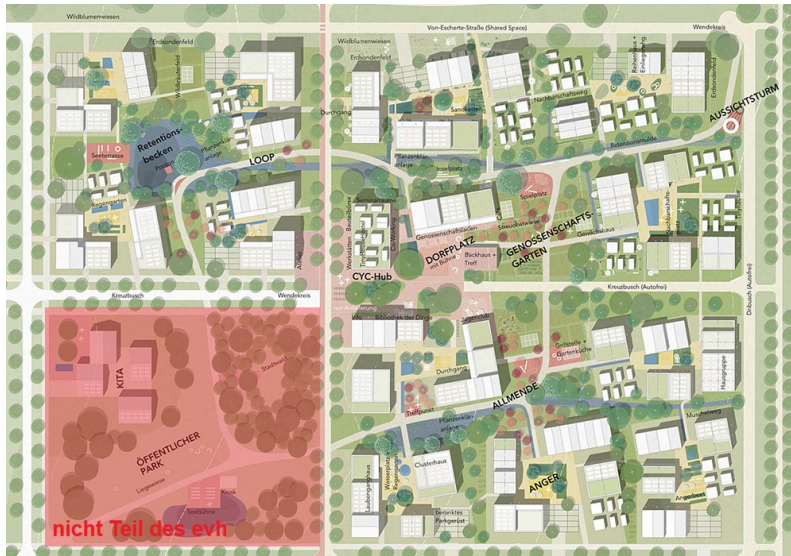


Abbildung 2.2:
Städtebaulicher Entwurf der Baufelder des ecovillage hannover. Das rot markierte Feld ist nicht Teil des evh [cityfoerster 2022]

zugute kommen.

Das Baugrundstück ist in drei Teilflächen untergliedert und umfasst insgesamt 49.300 m³, auf denen ca. 500 Wohneinheiten für etwa 800 Menschen entstehen sollen, zusätzlich stellt das evh Stellplätze für 70 Tiny-Häuser bereit [evh 2022]. Das Zentrum der Siedlung bildet der Dorfplatz mit diversen Gemeinschaftseinrichtungen und einer Fläche für Veranstaltungen als gemeinschaftlicher Aufenthaltsort (siehe Abb. 2.2). Um diesen herum verläuft die Allmende mit Pflanzenkläranlage und Genossenschaftsgärten [cityfoerster 2022].

Entsprechend dem Grundsatz der Nachhaltigkeit existieren für das evh Konzepte für einen ökologischen und ökonomischen Umgang mit Ressourcen: eine 100%ige Energieversorgung aus erneuerbaren Energien, Autofreiheit im Stadtquartier, Lebensmittelversorgung aus ökologischer Landwirtschaft, ressourcenschonendes Bauen, sowie eine Reduktion von Abfall, Abwasser, Energieverbrauch und Emissionen. Dem entsprechend wurde ein Wasserkonzept erstellt, das durch ortsnahe Versickerung und Verdunstung von Regenwasser auf die Einbettung in den natürlichen Wasserkreislauf abzielt und den Wasserverbrauch des gesamten Quartiers durch sparende Sanitäreinrichtungen, sowie Aufbereitung und Wiederverwendung des Schmutzwassers reduziert. Da die Baufelder abwassertechnisch bereits erschlossen sind ist eine komplette Entkopplung vom öffentlichen Abwassernetz nicht angestrebt, jedoch ist die Nutzung von diversen nachhaltigen Sanitärsystemen (NASS) in den verschiedenen Wohngebäuden geplant [evh 2022].

Hier lässt sich die vorliegende Arbeit in den Kontext des evh einordnen: durch die Nutzung von Trockentrenntoiletten (TTT) in einem Modellhaus des Quartiers wird Wasser eingespart und durch das geplante Nährstoffrecycling der anfallenden Fäkalien erfolgt eine Reduzierung der negativen Umwelteinwirkungen bei der Verwendung konventioneller mineralischer Dünger (siehe Kap. 2.1) [evh 2022].

2.2.2 Rechtliche Einordnung des Nährstoffrecycling aus Fäkalien

In Deutschland regelt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) die Behandlung von Abfällen. Darunter fallen auch Klärschlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen, welche in der untergeordneten Klärschlammverordnung (AbfKlärV) behandelt werden. Sie regelt die Ausbringung von Klärschlammprodukten¹¹ auf landwirtschaftlich, gartenbaulich und forstwirtschaftlich genutzten Flächen, sowie im privaten Bereich (Haus-, Nutz-, Kleingarten).

¹¹Die AbfKlärV nennt Klärschlamm, Klärschlammgemische und Klärschlammkomposte. Im weiteren Verlauf wird der Einfachheit halber der Begriff Klärschlamm verwendet

Zusätzlich werden Untersuchungspflichten der Klärschlammerzeuger, sowie die notwendigen Bodenuntersuchungen vor der Ausbringung geregelt [Harlow 2019; UBA 2018]. Ein weiterer wichtiger Punkt im Hinblick auf Nährstoffrecycling, der in der 2017 novellierten AbfKlärV genannt wird ist die „*Rückgewinnung von Phosphor [...] in den Wirtschaftskreislauf*“ (§3 I AbfKlärV), diese ist ab 2032 für alle Abwasserbehandlungsanlagen obligatorisch bei einem P-Gehalt im Klärschlamm ab 2 % oder 20 g P kg⁻¹ TM [UBA 2018]. Laut UBA (2018) entfällt ab dem Jahr 2032 zusätzlich die Erlaubnis zur bodenbürtigen Ausbringung von Klärschlämmen aus Abwasserbehandlungsanlagen ab einer Größe von 50.000 Einwohnern¹².

Generell gelten bei der bodenbürtigen Verwertung von Klärschlämmen neben der AbfKlärV die Bestimmungen des Düngerechts¹³, sowie die Vorsorgewerte für Böden der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) [UBA 2018].

Harlow (2019) beschäftigt sich ausführlich mit der Frage der rechtlichen Rahmenbedingungen zur Verwendung von trocken erfassten Fäkalien u.A. in Deutschland. Sie kommt zu dem Urteil, dass diese abfallrechtlich nicht eingeordnet sind. Die AbfKlärV befasst sich mit „*Abfall aus der abgeschlossenen Behandlung von Abwasser in Abwasserbehandlungsanlagen*“ (§2 II AbfKlärV), also mit Klärschlämmen, welche sich maßgeblich bezüglich der Inhaltsstoffe und Eigenschaften von getrennt erfassten Fäkalien unterscheiden (siehe Kap. ??). Die bodenbürtige Ausbringung anderer behandelter Abfälle wird in der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) rechtlich definiert. Auch hier sind menschliche Fäkalien nicht aufgeführt, wodurch eine Aufbereitung und Inverkehrbringung behandelter Produkte nach deutschem Recht nicht möglich ist.

Nach DWA (2008) ist eine gesetzliche Einordnung als Düngemittel erwünscht, diese werden durch die DüMV definiert. Die Verordnung stellt eine Positivliste für Ausgangsstoffe¹⁴ von Düngemitteln¹⁵ dar. Jedoch sind auch hier trocken erfasste menschliche Fäkalien nicht aufgeführt [DWA 2008; Harlow 2019; Korduan 2020]. Ähnlich verhält es sich mit der Bioabfallverordnung (BioAbfV), diese regelt die Behandlung, Untersuchung und Verwertung von Bioabfällen „*als Düngemittel auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte[n] Böden*“ (§1 I 1 BioAbfV), wiederum ohne menschliche Fäkalien einzubeziehen [Harlow 2019; Korduan 2020]. Die deutsche Gesetzgebung sieht also derzeit keine Optionen für eine geregelte Behandlung oder das Inverkehrbringen von Recyclingdüngern aus getrennt erfassten menschlichen Fäkalien vor.

Eine Möglichkeit der Nutzung zeigt jedoch §5 V 1 DüngG auf: hier wird eine Ausnahme zugunsten von „*Forschungs- und Versuchszwecken*“ aufgeführt, die für die Verwendung der im evh anfallenden Fäkalien infrage kommt [Harlow 2019; Korduan 2020]. Des weiteren existieren einzelne Ausnahmen auf Landesebene, so erhielt der Ökohaus e.V. Rostock nach einer Pilotphase die Genehmigung des örtlichen Gesundheitsamtes Kompost aus den eigenen Komposttoiletten an Interessierte zu verteilen [Berger 2008; Ökohaus o.J.]. Das Projekt erhielt zunächst für sieben Jahre eine Genehmigung für die Verwendung der Komposttoiletten, nach Ablauf dieser Phase (im Jahr 2002) erfolgte der Nachweis zur hygienischen Unbedenklichkeit des Kompostes. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse in der Pilotphase entstand ein Bewirtschaftungskonzept, das von geschultem Personal durchgeführt wird, um eine korrekte Behandlung der Fäkalien zu garantieren. Der entstandene Kompost darf nicht verkauft werden, da er sonst unter das DüMV fällt [Berger 2008]. Korduan (2020) erwähnt weitere Ausnahmeregelungen durch einzelne Umweltämter von Produkten aus NASS im Zierpflanzenbau, ohne jedoch konkrete Projekte zu nennen.

¹²Ab dem Jahr 2029 dürfen bereits keine Klärschlämme aus Anlagen ab 100.000 Einwohnern ausgebracht werden [UBA 2018]

¹³Düngegesetz (DüngG), Düngeverordnung (DüV) und Düngemittelverordnung (DüMV) [UBA 2018]

¹⁴Hauptbestandteile und Nebenbestandteile (§1 I ff DüMV)

¹⁵Neben „Düngemitteln“ sind nach DüMV auch Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel aufgeführt.

Bundesweit existieren zwar einige Gebäude und Quartiere, bei denen behördliche Genehmigungen zur Nutzung von Komposttoiletten erteilt wurden, jedoch bislang ohne eine amtliche Zulassung zur Verwendung des entstandenen Kompostes [Berger 2008].

Generell existiert keine bundeseinheitliche Regelung zur Einordnung von Produkten aus NASS. Getrennt erfasste menschliche Fäkalien sind bisher weder im Düng- noch im Abfallrecht aufgeführt, daher muss eine gartenbauliche Nutzung der behandelten Produkte jeweils im Einzelfall von den örtlichen Behörden entschieden oder von bodenbürtiger Ausbringung abweichende Nutzungsformen angewendet werden.

2.3 Behandlung von Inhalten aus Trockentrenntoiletten

In den folgenden Kapiteln wird der Stand der Technik in der Aufbereitung von menschlichen Fäkalien aus TTT vorgestellt. Die vorgestellten Prozesse bilden nur ein Ausschnitt der möglichen Methoden ab, sie werden bereits konkret in der Praxis erprobt und könnten so auch im evh zur Anwendung kommen.

2.3.1 Thermophile Kompostierung von Inhalten aus Trockentoiletten

Kompostierung ist ein aerober, mikrobiologischer Prozess, in dem festes, heterogenes, organisches Material durch Mineralisierung und Humifizierung stabilisiert wird. Das Ziel der Kompostierung ist die Gewinnung von hygienisiertem, reifem Kompost, der sich sowohl positiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt als auch eine langfristige Düngewirkung zeigt [Christensen 2011; Onwosi u. a. 2017].

Die thermophile Kompostierung unterteilt sich in drei Phasen: In der mesophilen Phase bauen mesophile Mikroorganismen (Bakterien, Aktinomyzeten, Pilze) leicht verfügbare, lösliche Stoffe ab. Durch die starke biologische Aktivität kommt es in dessen Verlauf zur Hitzeentwicklung im Kompost mit Temperaturen von bis zu über 70 °C. In der zweiten Phase dominieren daher thermophile Mikroorganismen (thermophile Phase), diese bauen Polysaccharide, Fette und Proteine ab. Aufgrund der hohen Temperaturen erfolgt zusätzlich eine Elimination von Pathogenen (Hygienisierung). Die aus der Hygienisierung resultierende geringere biologische Aktivität sorgt wiederum für die Abkühlung des Komposts. Bei der darauf folgenden Phase der Reifung wird schwer abbaubare Organik hauptsächlich von Aktinomyzeten und Pilzen mineralisiert und lange Polymere (Lignin, Zellulose, Pektine, etc.) werden humifiziert. Je nach Ausgangsmaterial kann dieser Prozess bis zu mehreren Wochen andauern [Christensen 2011; Onwosi u. a. 2017].

Die Kompostierung von Inhalten aus Trockentoiletten der Firma Finizio GmbH verläuft ebenfalls nach diesem Prozess. Die Besonderheit besteht in der Verwendung eines so genannten Hygienisierungscontainers (HyCo), also einem geschlossenen, elektronisch belüfteten Container, in dem die thermophile Phase vonstatten geht [Finizio 2021b]. Im Inneren des HyCo wird der Kompost bei Temperaturen über 50 °C hygienisiert. Die Verwendung eines geschlossenen Systems hat den Vorteil, dass der Temperaturgradient vom Kern des Komposts zum Rand hin geringer ist als in einem offenen Container und so eine schnellere Hygienisierung des Materials erfolgt [Christensen 2011]. Ein weiterer Vorteil ergibt sich darin, dass die Gefahr einer Übertragung von Krankheitserregern reduziert wird, da das noch pathogenbelastete, zu kompostierende Material gegenüber einem Zugriff von außen abgeschirmt ist und der Gasaustausch¹⁶ mit der Umgebung verringert wird [Vinnerås 2002]. Die Kerntemperatur im HyCo wird konstant überwacht und aufgezeichnet (siehe Abb. A.1). Bei der Befüllung des Containers werden Zuschlagsstoffe zur Unterstützung des Kompostierungsprozesses beigemischt (siehe Tab. 2.3). Diese Hilfsstoffe sorgen durch ein

¹⁶Sorgt für geringere Geruchs- und Treibhausgasemission, sowie weniger Wasserverlust

ausgewogenes C/N-Verhältnis¹⁷ für ein besseres Wachstum der Mikroorganismen, sowie für eine bessere Belüftung, um der Entstehung von anaeroben Verhältnissen vorzubeugen, außerdem wird überschüssige Feuchtigkeit aufgesaugt [Jönsson, Stintzing u. a. 2004; Onwosi u. a. 2017].

Nach mindestens sieben Tagen im HyCo wird der Kompost zu Mieten¹⁸ aufgeschüttet, in denen die Reifung stattfindet. Das Material wird mit einem Kompostwender (Sandberger ST 300, H*B: 1,5*2m) zu Beginn täglich, später in länger werdenden Abständen, gewendet bis die Reifung abgeschlossen ist [Finizio 2021b]. Das Wenden sorgt für eine schnellere Abkühlung, sowie eine bessere Sauerstoffversorgung auch im Kern der Mieten, zusätzlich wird das Material homogenisiert [Christensen 2011; Onwosi u. a. 2017]. Durch Abdecken der Mieten mit handelsüblichem Kompostvlies wird der Stoffaustausch mit der Umgebung (Sickerwasser, Ausgasung) verringert. Der Wendeturnus richtet sich nach der Temperatur im Kern der Mieten, diese sollen 65 °C nicht überschreiten. Das stabile Material darf sich nicht mehr erhitzen, die Differenz zur Außentemperatur muss unter 5 °C liegen [Hildebrandt 0.J.]. Der fertige Kompost wird abschließend gesiebt, um große Fremdstoffe, sowie Fehlwürfe (z.B. nicht kompostierbare Hygieneartikel) zu entfernen und dann offen auf dem Betriebsgelände der Finizio GmbH gelagert.

Bei der Kompostierung von Fäzes kommt es zu N-Verlusten durch Ausgasung und Denitrifikation, die in kleinräumigen anaeroben Zonen trotz günstiger Belüftung vorstatten geht. Auch die Bildung nährstoffhaltigen Sickerwassers kann durch die Verwendung von Kompostvlies nicht komplett unterbunden werden [Christensen 2011]. Mit der Schaffung eines günstigen C/N-Verhältnisses um 30, eines gleichmäßigen Feuchtigkeitsgehaltes von 50-60 % und einer konstanten Sauerstoffversorgung kann die biologische Aktivität der Mikroorganismen positiv beeinflusst und die Verluste somit reduziert werden [Hildebrandt 0.J.].

2.3.2 Nitrifizierung von Urin

Das Ziel der Aufbereitung durch Nitrifizierung ist die N-Stabilisierung im separat erfassten Urin. Beim im folgenden Teil vorgestellten VUNA-Prozess erfolgt zusätzlich eine Hygienisierung und Volumenreduzierung durch Destillation. Das Endprodukt ist ein mineralischer Flüssigdünger (NUF, engl.: nitrified urine fertilizer) [Etter, Gounden u. a. 2015; Etter und Udert 2016]. Der Prozess wurde im Rahmen des Projektes VUNA, einer Kollaboration des schweizerischen Forschungsinstitutes EAWAG und EThekwini Water and Sanitation, des Wasserversorgers der südafrikanischen Gemeinde Durban, entwickelt und wird bereits in mehreren Pilotprojekten erprobt [Etter und Udert 2016].

Obwohl Urin an sich fast frei von Mikroorganismen ist, kommt es durch Kreuzkontamination mit Fäzes und im Aufbau des Urin-Trennsystems (in Leitungen und Auffangbehältern) zur Besiedlung mit Urea-hydrolysierenden Bakterien. Diese bauen das zum Großteil in Harnstoff (Urea) vorhandene N je nach pH-Wert zu Ammoniak (NH₃) oder Ammonium

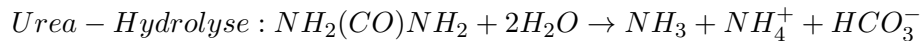
Tabelle 2.3: Zusammensetzung der optimalen Kompostmiete

Zuschlagstoff	Anteil [Vol-%]
Fäzes	25
Strohmehl	20
Rasen-/Wiesenschnitt	15
Grünschnitt	15
Fertigkompost	10
Tonminerale	10
Pflanzenkohle	5

¹⁷Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis: C dient Mikroorganismen als Energiequelle und N wird für den Aufbau von Biomasse benötigt [Onwosi u. a. 2017], optimal für die Kompostierung ist ein Verhältnis von 30 [Hildebrandt 0.J.].

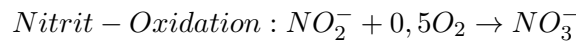
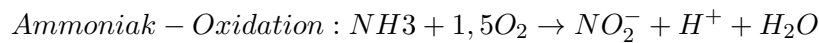
¹⁸Mieten sind längliche pyramidenförmige Haufen, hier mit den Maßen (H*B*L) 1*2*30 m

(NH_4^+) ab [Friedler u. a. 2013; Jönsson und Vinnerås 2013; Udert, Larsen u. a. 2006].



Nach diesem Vorgang sind 90 % des gesamten N im gelagerten Urin in Form von NH_3 und NH_4^+ vorhanden. Aufgrund des durch die Reaktion gestiegenen pH-Wertes, jedoch hauptsächlich als NH_3 . Wird der Urin nun weiterhin gelagert kann es zu hohen N-Verlusten durch Ausgasung kommen [Udert, Larsen u. a. 2006].

Bei der Urin Aufbereitung nach VUNA wird der gesammelte Urin zunächst in einen Bewegtbettfilter (moving bed biofilm reactor - MBBR) geleitet, welcher mit Kunststoff-Trägern gefüllt ist, auf denen die für die Nitrifizierung notwendigen Mikroorganismen angesiedelt sind [Etter, Gounden u. a. 2015; Etter und Udert 2016]. Der erste Schritt der Nitrifizierung wird von Ammoniak-oxidierenden Mikroorganismen vorgenommen, dabei entsteht Nitrit (NO_2^-), welches dann wiederum von Nitrit-Oxidierern in Nitrat (NO_3^-) nach folgenden Reaktionen umgewandelt wird [Etter, Gounden u. a. 2015]:



Zusätzlich zu diesen Organismen befinden sich auf den Trägern noch heterotrophe Mikroorganismen, die 90 % der organischen Substanzen abbauen, die für den unangenehmen Geruch des gelagerten Urins sorgen [Etter, Gounden u. a. 2015; Etter und Udert 2016]. Durch die Nitrifizierung sinkt der pH-Wert der Lösung von 9,1 auf 6,5 und es wird 50 % des NH_3 zu NO_3^- oxidiert. Das restliche NH_3 liegt aufgrund des verringerten pH-Wertes gelöst als NH_4^+ vor und gasst somit nicht mehr aus [Etter, Gounden u. a. 2015; Maurer u. a. 2006].

Während des Nitrifizierungsprozesses kommt es nicht zu einer Reduzierung der möglicherweise im Urin enthaltenen pharmazeutischen Rückstände. Um dies zu erreichen kann optional eine Aktivkohlefiltration zwischengeschaltet werden, diese entfernt bis zu 100 % der Medikamentenrückstände im Urin [Köpping u. a. 2020].

Der stabilisierte Urin wird nun aufgrund der diskontinuierlichen Betriebsweise des Destillators in ein Zwischenlager geleitet. Bei der Destillation wird die Lösung für mind. 30 min auf ca. 80 °C erhitzt und so 95-97 % des enthaltenen Wassers entfernt [Etter und Udert 2016], sämtliche Nährstoffe bleiben bis auf geringe Verluste im Konzentrat enthalten. Endprodukte des Destillationsvorganges sind Wasser und Aurin [Etter, Gounden u. a. 2015; Etter und Udert 2016]. Die Destillation ist für die Pflanzenverfügbarkeit der im Urin enthaltenen Nährstoffe zwar nicht relevant, jedoch hat sie den positiven Effekt, dass durch die Temperaturerhöhung eine Hygienisierung erfolgt. Des Weiteren kann der entstandene NUF durch die Volumenreduktion besser gelagert werden und das Destillat kann in der Bewässerung zur Anwendung kommen, da hier nur Spuren organischer Stoffe vorhanden sind [Etter und Udert 2016]. Die N-Verluste durch Ausgasung während des Erhitzens belaufen sich auf weniger als 1,5 % des im nitrifizierten Urin befindlichen NH_4^+ [Etter, Gounden u. a. 2015; Etter und Udert 2016]. Aurin wird von der VUNA GmbH produziert, es ist in der Schweiz und Österreich bereits als Flüssigdünger zugelassen und wird dort vertrieben [BAG 2019].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde neben Aurin ein zweiter NUF verwendet: C.R.O.P. (Combined Regenerative Organic-food Production) vom Deutschen Verband für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die Herstellung dieses NUF unterscheidet sich vor allem im Reaktor: während die Nitrifizierung bei Aurin in einem MBBR mit Kunststoffträgern vonstatten geht, wird bei C.R.O.P. ein Tropffilter (fixed bed biofilm reactor - FBBR) mit porösem Lavagestein verwendet. Dies bietet den Vorteil, dass sich im Filter neben aeroben auch anaerobe Räume bilden. Dadurch ist das System flexibler, da sich eine größere mikrobiologische Vielfalt ausbilden kann, um einen Abbau eines weiteren Stoffspektrums zu gewährleisten.

Beimpft wurde der Filter mit Gartenerde aus dem Garten des DLR in Köln [Bornemann u. a. 2018]. Zwischen den beiden Tropffiltern mit Lavagestein ist ein Brückenstück eingebaut. Dieses ist gefüllt mit ganzen Miesmuschelschalen (Füllhöhe 70-80%) in einem handelsüblichen Netztopf für Hydroponik. Eine Zentrifugalpumpe für Aquarien gewährleistet die Kreislaufführung des Filtrats [Bornemann u. a. 2018].

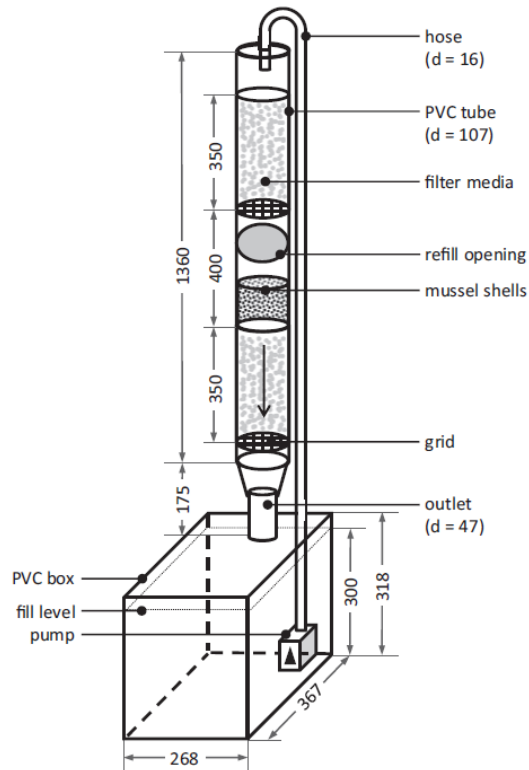


Abbildung 2.3: C.R.O.P. Filter es DLR, Maße angegeben in [mm]. Die PVC-Rohre sind mit rotem Lavagestein gefüllt [Bornemann u. a. 2018]

3. Material und Methoden

3.1 Gefäßversuch

Um das Düngepotential fäkalienbasierter Recyclingdünger zu ermitteln wurde im Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren (IGZ) ein Gefäßversuch mit der Studentenblume (*Tagetes erecta*) vorgenommen. Ziel war es herauszufinden, welches Verhältnis von H.I.T. und NUF das beste Pflanzenwachstum hervorbringt.

3.1.1 Verwendete Dünger

Für den Gefäßversuch wurden die Recyclingdünger H.I.T., Aurin und C.R.O.P. verwendet und zur Kontrolle die konventionellen Dünger Osmocote Exact und Vinasse. In den folgenden Abschnitten werden kurz die verwendeten Dünger im Detail vorgestellt und die Probenahme für die in den externen Laboren durchgeführten Analysen erörtert.

Fäkalkompost

Der für den Gefäßversuch verwendete Kompost wurde von der Firma Finizio GmbH, Ostender Höhen 70, D-16225 Eberswalde, hergestellt. Die Fäkalien wurden auf verschiedenen Musikfestivals in Norddeutschland in Trockentoiletten unter Zugabe von Strohmehl zur Geruchsneutralisierung gesammelt. Am Boden der Behälter erfolgt die Drainage der freien Flüssigkeit. Auf der betriebseigenen Verwertungsanlage wurden noch weiteres Strohmehl, Pflanzenkohle, Tonminerale, Rasen- und Grünschnitt zu den Feststoffen hinzugefügt im Verhältnis wie in Tabelle 2.3 ersichtlich.

Der Zeitraum der Füllung des HyCos dauerte ca. vier Wochen, sieben Tage nach der letzten Füllung folgte das Aufsetzen der Miete (siehe Abbildung A.1). In den ersten zehn Tagen wurde die Miete täglich gewendet, anschließend verlängerte sich der Wendeturnus. Acht Wochen nach dem Aufsetzen der Miete wurde der Kompost gesiebt und danach offen auf dem Betriebshof gelagert.

Die Beprobung des Komposts erfolge am 31.3.2021 nach den Empfehlungen aus der DIN SPEC 91421:2020-12 (Anhang B): aus dem im Haufen gelagerten Kompost wurden 13 Einzelproben mit einer handelsüblichen Schaufel entnommen und anschließend manuell auf einer Kunststoffplane so lang verjüngt bis eine Mischprobe von ca. 12-14 L entstand. Nach dem Verstauen der Proben in handelsüblichen 3 L Kunststoff-Verschlussbeuteln folgte die Lagerung in Kühlboxen bis zum Verschicken an das externe Labor. Die Analysen führte die AGROLAB Agrar und Umwelt GmbH, Breslauer Str. 60, D-31157 Sarstedt, aus, sie entsprachen ebenfalls der DIN SPEC 91421: 2020-12 (siehe Tab. A.2).

Urinbasierte Flüssigdünger

In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene nitrifizierte Urin-basierte Flüssigdünger (NUF) verwendet: Aurin, zur Verfügung gestellt von der VUNA GmbH, Kriesbachtr. 42, CH-8600 Dübendorf, und C.R.O.P., vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Linder Höhe, D-51147 Köln.

Die Herstellung von Aurin entsprach dem in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Prozess. Entgegen der Beschreibung aus Bornemann u. a. (2018) wurde der FBBR bei der Herstellung des C.R.O.P. kontinuierlich betrieben: jeden Tag wurden 0,5 L des Filtrats entnommen und der Filter mit synthetischem Urin wieder aufgefüllt, Verdunstungsverluste wurden mit

voll entsalztem Wasser (VE-Wasser) ausgeglichen. Das Rezept des synthetischen Urin entspricht dem im Artikel von Feng u. a. (2006). Aurin wurde in 500 mL-Flaschen geliefert und C.R.O.P. in einem 300L Intermediate Bulk Container. Zusätzlich zu den Nährstoffangaben der Hersteller erfolgte die Analyse der N-Gehalte der Flüssigdünger von der Eurofins Agraranalytik GmbH Deutschland, Löbstedter Str. 78, D-07749 Jena (siehe A.1). Dafür wurden die Dünger manuell homogenisiert und jeweils 200 mL in sterile Kunststoffflaschen gefüllt.

Konventionelle Kontrolldünger

Für die Kontrollvarianten des Gefäßversuchs wurden konventionelle Dünger verwendet. Die organische Kontrolle K_{org} wurde mit Provita[®] Vinasse der Firma BECKMANN & BREHM GmbH, Hauptstraße 4, D-27243 Beckeln, und die mineralische Kontrolle K_{min} mit dem Mehrnährstoffdünger Osmocote[®] Exact der Firma ICL SF Germany & Austria, Veldhauser Straße 197, D-48527 Nordhorn, gedüngt. Aufgrund der Variabilität organischer Dünger wurde die Vinasse ebenfalls von Eurofins Agraranalytik auf die konkreten Nährstoffgehalte geprüft (siehe A.1). Bei Osmocote Exact handelt es sich um einen synthetisch hergestellten Feststoffdünger, daher wurde auf eine zusätzliche Analyse der relevanten Inhaltstoffe verzichtet und für die Berechnung der Düngergabe die Produktdeklaration zu Rate gezogen.

3.1.2 Physikalische Analysen der Dünger

Für den Versuch wurden einige physikalische Eigenschaften des Grundsubstrates am IGZ bestimmt. Die genaue Mischung und Zusammensetzung des Grundsubstrates wird in Kapitel 3.1.3 beschrieben.

Rohdichte

Da die Substrate nicht getrocknet waren, musste für das Füllen der Gefäße sowohl die Rohdichte RD_{FM} des Grundsubstrates, als auch die Trockenrohddichte TRD des Grundsubstrates und des Komposts ermittelt werden. Diese wurden auf Grundlage des *Methodenbuch zur Analyse von Kompost* (1994) der Bundesgütegemeinschaft Kompost bestimmt.

Ein Teil der Proben wurde für die Bestimmung der TRD über Nacht bei 105 °C getrocknet. Davon und von der frischen Probe wurden jeweils in fünffacher Wiederholung die Masse m_P eines definierten Volumens V_P von 200 ml bestimmt und anschließend die RD_{FM} , bzw. die TRD , anhand folgender Gleichung berechnet.

$$RD_{FM} = \frac{m_P}{V_P} * 1000$$

Maximale Wasserhaltekapazität

Um eine gleichmäßige Wasserversorgung der *Tagetes* zu gewährleisten wurde die Wasserhaltekapazität WHK_{max} des Grundsubstrates, sowie der Variante F₁₀₀ (siehe 3.1.3) bestimmt, das Vorgehen richtete sich ebenfalls nach dem *Methodenbuch zur Analyse von Kompost* der Bundesgütegemeinschaft Kompost.

In mit Filterpapier ausgelegten 2,5 L Kunststoff Blumentöpfen (mit dem Gewicht m_{tara}) wurde jeweils in dreifacher Wiederholung eine definierte Menge getrockneten Grundsubstrates m_{tr} (Trocknung über Nacht bei 105 °C), sowie der Substrat-Kompost-Mischung der Variante F₁₀₀, für zwei Stunden mit Wasser überstaut. Daraufhin wurden die Gefäße zum Abtropfen auf ein Kiesbett gestellt und alle zwei Stunden gewogen bis die Gewichtskonstanz erreicht war. Die Gefäße wurden daraufhin ein letztes Mal gewogen m_{ges} . Da entgegen dem Vorgehen des BGK *Methodenbuches* für den Versuch die WHK_{max} in Massen-% relevant war, wurde abweichend nach folgender Gleichung gerechnet:

$$WHK_{max} = \frac{m_{ges} - m_{tr}}{m_{tr} - m_{tara}} * 100$$

Trockensubstanzgehalt

Um den Nährstoffgehalt des frischen Komposts korrekt zu bestimmen, musste direkt vor dem Mischen der Substrate der aktuelle Trockensubstanzgehalt TS ermittelt werden. Da die TRD des Komposts bereits bekannt war, musste nur erneut die RD bestimmt werden, um die TS mit folgender Gleichung zu ermitteln:

$$TS = \frac{TRD}{RD} * 100$$

3.1.3 Vorbereitung des Gefäßversuches

Düngevarianten

Um das Düngepotential der verwendeten Recyclingdünger zu bestimmen, wurden die zwei verschiedenen NUF und H.I.T. in unterschiedlichen Verhältnissen zur Düngung der Versuchspflanzen verwendet. Als Grundlage der Höhe der Düngemittelgabe diente der spezielle N-Bedarf der Studentenblume (*Tagetes erecta*), dieser wurde in einer Literaturrecherche bestimmt. Die Bezeichnungen der Varianten, sowie die Anteile der verschiedenen Dünger sind in Tab. 3.1 dargestellt. Als Kontrolle wurden jeweils ein konventioneller organischer und mineralischer Dünger verwendet, sowie eine Nullvariante ohne Düngung (siehe Kap. 3.1.1).

Tabelle 3.1: Übersicht der im Gefäßversuch verwendeten Düngemittel-Varianten (Var.). Grundlage der Höhe der Düngemittelgabe ist der spezielle N-Bedarf der *Tagetes erecta*.

Var.	Anteil Düngemittel	
K ₀	–	
K _{org}	100 % Provita Vinasse	
K _{min}	100 % Osmocote Exact	
A ₂₅	25 % Aurin	75 % H.I.T.
A ₅₀	50 % Aurin	50 % H.I.T.
A ₇₅	75 % Aurin	25 % H.I.T.
A ₁₀₀	100 % Aurin	
C ₂₅	25 % C.R.O.P.	75 % H.I.T.
C ₅₀	50 % C.R.O.P.	50 % H.I.T.
C ₇₅	75 % C.R.O.P.	25 % H.I.T.
C ₁₀₀	100 % C.R.O.P.	
F ₁₀₀	100 % H.I.T.	

Berechnung der Düngemittelgabe

Die verabreichten Düngermengen m_{DM} wurden anhand des speziellen N-Bedarfs der *Tagetes erecta* N_{Te} aus Literaturwerten von Wartenberg (2008) und Ehmann u. a. (2019) berechnet und mit der Anzahl der Pflanzen in den Gefäßen n_P multipliziert. Er beträgt 220 mg je Pfl., da in jedem Gefäß drei Pflanzen wuchsen lag die Höhe der Düngemittelgabe bei 660 mg je Topf. Da der Gefäßversuch nur drei Monate dauerte, wurde von einer unvollständigen Mineralisierung des H.I.T. und der Vinasse ausgegangen, der Faktor der Mineralisierung F_{Min} beider Düngemittel beruht auf Daten von Sradnick und Feller (2020). Aufgrund von Erfahrungswerten aus dem IGZ wurde beim H.I.T. auf den Wert von Schweine-

mist zurückgegriffen, für Vinasse sind konkrete Date vorhanden. Bei den NUF und dem mineralischen Mehrnährstoffdünger wurde von einer N-Verfügbarkeit von 100% ausgegangen. Für die Varianten mit Flüssigdünger wurden die Anteile der jeweiligen Düngemittel F_{DM} (siehe Tab. 3.2) mit der von den externen Laboren bestimmten totalen N-Konzentration C_{Nt} und der Dichte der Dünger ρ_{DM} verrechnet.

$$m_{DM} = \frac{N_{Te} * n_P * F_{DM}}{C_{Nt} * F_{Min} * \rho_{DM}}$$

Beim Kompost erfolgte die Berechnung anhand des aktuellen Trockensubstanzgehaltes TS_K .

$$m_{DM} = \frac{N_{Te} * n_P * F_{DM}}{C_{Nt} * F_{Min} * TS_K}$$

Tabelle 3.2: Düngemittelgabe nach speziellem N-Bedarf der Versuchspflanze *Tagetes erecta*, sowie Darstellung des Mineralisierungsrate F_{min} und des totalen N-Gehalts N_t der Düngemittel (DM)

N-Bedarf je Pflanze: 220 mg			Pflanzen je Gefäß: 3		
DM	Aurin	C.R.O.P.	H.I.T.	Osmocote	Vinasse
F_{min}	1	1	0,25	1	0,54
N_t	[g l ⁻¹] 49,4	[g l ⁻¹] 7,1	[g kg _{TM}] 15,2	[g l ⁻¹] 45,3	[g kg _{TM}] 160,0
	[ml Topf ⁻¹]	[ml Topf ⁻¹]	[g Topf ⁻¹]	[g Topf ⁻¹]	[ml Topf ⁻¹]
K_0	-	-	-	-	-
K_{min}	-	-	-	4,1	-
K_{org}	-	-	-	-	27
A_{25}	3,3	-	225	-	-
A_{50}	6,7	-	150	-	-
A_{75}	10,0	-	75	-	-
A_{100}	13,4	-	-	-	-
C_{25}	-	23,2	225	-	-
C_{50}	-	46,5	150	-	-
C_{75}	-	69,7	75	-	-
C_{100}	-	93,0	-	-	-
F_{100}	-	-	300	-	-

Vorzucht der Pflanzen

Am 28.04.2021 wurden die *Tagetes erecta* Samen in handelsüblichen Saatschalen mit Pikiererde der Einheitserdewerke Uetersen, Werner Tantau GmbH & Co. KG, Am Stichhafen, D-25435 Uetersen, ausgesät. Das Saatgut stammte von der Bingenheimer Saatgut AG, Kronstraße 24, D-61209 Echzell-Bingenheim, verwendet wurde die Sorte B414, "Hohe Polsterstudentenblume". Bis zum 12.05.2021 befanden sich die Saatschalen unter einem Vliestunnel in der Gefäßversuchsanlage des IGZ Großbeeren, einem an der Seite offenen Gewächshaus, sie wurden während dieser Zeit konstant mit vollentsalztem Wasser (VE-Wasser) feucht gehalten. Nach 14 Tagen, als sich die meisten *Tagetes* nach der BBCH Skala im Stadium 12 befanden [Meier 2001], wurden jeweils drei Pflanzen in die größeren Gefäße pikiert.

Vorbereitung der Gefäße

Das Grundsubstrat für den Gefäßversuch bestand aus Quarzsand und Nullerde (bestehend aus 100% Hochmoortorf), ebenfalls von den Einheitserdewerken Uetersen, im Verhältnis 1:1. Vor dem Füllen der Töpfe erfolgte das Mischen der Substrate in einer 70 L Kunststoffwanne, dafür wurden mit 5 L Messbechern gleiche Volumina des Sandes und der Nullerde manuell homogenisiert.

Um den Austrag der Erde aus dem Ablauf der Töpfe zu verhindern, wurden die unteren Löcher mit Zeitungspapier abgedeckt. Die 10 L Kunststoff Pflanzgefäße wurden dann mit ca. 8 L des Grundsubstrates befüllt, um einen Überstand für das Giesswasser zu gewährleisten, der einen oberflächlichen Abtrag des Substrates beim Giessen verhindert. Laut Jönsson, Stintzing u. a. sollten fäzesbasierte Recyclingdünger vor der Kultivierung in die Erde gemischt werden. Daher wurden bei den Varianten mit Feststoffdünger (H.I.T. und Osmocote) zunächst 3 L des Grundsubstrates in den Gefäße gefüllt, dann die zuvor errechnete Düngermenge in die nächsten 3 L gemischt und anschließend die restlichen 2 L mit dem Grundsubstrat aufgefüllt. Das verhindert, dass die Jungpflanzen dieser Varianten einen Wachstumsvorteil gegenüber den Flüssigdünger-Varianten bekommen.

Im Anschluss an das Befüllen der Gefäße wurde deren Gewicht bestimmt, um den Wasserverlust während des Versuches gravimetrisch bestimmen und ausgleichen zu können.

3.1.4 Durchführung

Ablauf Gefäßversuch

In jedes 10 L Pflanzgefäß wurden jeweils drei *Tagetes* gepflanzt, das Pikieren erfolgte 14 Tage nach dem Säen am 12.05.2022. Die zwölf Düngewarianten wurden in fünf Wiederholungen im randomisierten Blockdesign in der Gefäßversuchsanlage aufgestellt. Zwei Wochen nach dem Pikieren erfolgte die Flüssigdüngergabe, die Dünger wurden zusammen mit dem Giesswasser verabreicht.

Für die Dauer des Versuchs wurde in den Gefäßen ein Wassergehalt von ca. 80 % eingestellt [Eman 2021; Souri u. a. 2018]. Zu Beginn erfolgte die Ermittlung des Wasserverlusts exemplarisch an fünf zufällig ausgesuchten Töpfen, da dies klimatische Randeffekte wie z.B. Sonnen- und Windexposition nicht ausreichend darstellte, wurden im weiteren Verlauf ein bis zwei Mal die Woche alle Gefäße gewogen und der Verlust mit VE-Wasser ausgeglichen, das Gewicht der Pflanzen wurde dabei geschätzt.

Jede Woche fand die Bonitur aller Pflanzen statt, dafür wurden die Pflanzenhöhe und der -durchmesser an der weitesten Stelle gemessen, sowie die Anzahl der Zweige und später Blüten bestimmt. Zusätzlich zur Bonitur wurde der Versuch fotografisch Dokumentiert. Nach 11 Wochen wurden die *Tagetes* geerntet. Es erfolgte eine letzte Bonitur bei der zusätzlich die Frischmasse der *Tagetes* bestimmt wurde. Die Trockenmasse wurde topfweise bei drei von fünf Wiederholungen ermittelt.

3.1.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit der Software R, Version 4.1.2 (2021-11-01) der The R Foundation for Statistical Computing durchgeführt. Verwendet wurden die packages *data.table*, *car*, *psych*, *multcomp*, *emmeans*, *tidyverse*, *DescTools* und *rstatix*.

Je Wuchsparameter wurden für jede Düngerbehandlung 15 Werte aufgenommen, bei Variante K_{org} starb zu Beginn des Versuchs eine Pflanze ab, weshalb hier nur 14 Wiederholungen gemessen werden konnten. Je Variante erfolgte die Ermittlung der Trockenmasse bei drei Gefäßen. Die Daten der Wuchshöhe wurden einer einfaktoriellen Anova unterzogen und signifikante Unterschiede durch den Tukey-HSD-Test ermittelt. Wegen der nicht-parametrischen Verteilung der restlichen untersuchten Eigenschaften wurde bei diesen der

Kruskal-Wallis-Test angewendet, die Ermittlung der signifikanten Unterschiede der Behandlungen geschah mit dem Games-Howell-Test. Identische Signifikanzlevel sind in den jeweiligen Graphen durch gleiche Buchstaben gekennzeichnet. Allen Tests lag ein Signifikanzniveau von $\alpha < 0,05$ zugrunde.

3.2 Materialflussanalyse

Eine Materialflussanalyse (MFA) dient der Bewertung und Quantifizierung von Güterflüssen und -beständen in einem definiertem System. Durch eine umfassende Verknüpfung von Quellen, Wegen und Senken (mittel- und langfristige) von Materialien in klar gesetzten räumlichen und zeitlichen Grenzen ist sie ein gängiges Instrument für Entscheidungsfindungen in Ressourcen, Abfall- und Umweltmanagement [Brunner u. a. 2017].

3.2.1 Zielstellung

Ziel dieser MFA war es zu simulieren welche Mengen N und P in einem Modellhaus bei der Nutzung von TTT aus den gesammelten Fäkalien in Form von NUF und H.I.T. zurückgewonnen werden können. Dabei wurde ausschließlich die Substanzebene von elementarem N und P betrachtet, da die Simulation auf Güterebene den Umfang dieser Arbeit überzogen hätte. Durch das im Gefäßversuch mit *Tagetes erecta* ermittelte optimale Verhältnis von NUF und H.I.T. sollen anschließend Szenarien zur Quartiersbegrünung des evh erstellt werden.

3.2.2 Grundlagen der MFA

Grundlage für die Modellierung einer MFA bildet der Massenerhaltungssatz [Brunner u. a. 2017], unbekannte Größen können so anhand von Massenbilanzen identifiziert werden [Cencic u. a. 2008].

Um eine MFA transparent und reproduzierbar zu gestalten wurden von Brunner u. a. einheitliche Termini eingeführt:

System beinhaltet mindestens einen Prozess und ist räumlich und zeitlich durch Systemgrenzen definiert.

Prozesse umfassen Transformation, Transport und Lagerung von Materialien.

Materialien beschreiben sowohl Substanzen, als auch Güter. Substanzen bestehen aus einem einzelnen Element (z.B. Stickstoff, Phosphor, etc.) oder Molekül (z.B. Nitrat, Phosphat, etc). Güter umfassen neben Substanzen auch Substanzgemische (z.B. Kompost, Fäkalien, Grünschnitt, etc.). Immaterielle Güter (z.B. Dienstleistungen, Informationen, etc.) werden in einer MFA nicht betrachtet.

Flüsse verbinden die Prozesse innerhalb des Systems miteinander, gehen die Flüsse über die Systemgrenze hinaus gelten sie als Importe, bzw. Exporte. Sie werden in Masse je Zeit oder Masse je Zeit und Querschnitt angegeben.

Lager beschreiben Materialsinken innerhalb eines Prozesses. Angegeben werden Lager in Masse.

3.2.3 Systemdefinition

Im Folgenden wird das System und die enthaltenen Prozesse definiert, die Bezeichnungen der Prozesse und Flüsse im Modell sind kursiv dargestellt.

Das betrachtete System umfasst die Sammlung der Fäkalien von 100 Menschen über einen Zeitraum von einem Jahr in *TTT*, die Zwischenlagerung (*L*) bis zum Transport zur Kompostierung auf dem Verwertungshof (*VH*) und zur Nitrifizierung und Destillation des Urins mit dem *VUNA* Prozess.

Importflüsse werden mit *I* abgekürzt, zu diesen gehören gezielt eingesetzte Hilfsstoffe für die Kompostierung, aber auch Produkte, die bei der Nutzung der *TTT* anfallen, sowie unerwünschte Fehlwürfe in die Toiletten. Die Exportflüsse werden mit *E* abgekürzt, sofern sie unerwünscht sind, wie zum Beispiel gasförmige (*Eg*), sowie flüssige Emissionen (*Ef*) und feste Stoffe (*Es*) und mit *P*, sofern es sich um erwünschte Produkte der Prozesse handelt. Innerhalb des Systems existieren zwei Arten von Flüssen: Feststoffflüsse (*F*), die der Kompostierung zugeführt werden, und flüssige Ströme (*U*), bestehend aus Urin für die Nitrifizierung.

Da die Trennung der Fäkalien in den *TTT* nicht zu 100% gewährleistet ist, existiert in diesem Prozess ein Subsystem, das die Fehleinleitungen von Urin in den Fäzesbehälter berücksichtigt. Auch der Verwertungshof ist ein Subsystem, der die Transformationsprozesse in Hygienisierungscontainer und Kompostmiete von dem Sieben der Grobstoffe unterscheidet.

3.2.4 Vorgehen

Die MFA wurde mit der Software STAN (subSTance flow ANalysis), Version 2.7.101, des Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft der Technischen Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien, durchgeführt. Durch eine Literaturrecherche erfolgte die Erstellung des qualitativen Modells mit allen relevanten Prozessen, Flüssen und Vereinfachungen. Dieses wurde dann in STAN erstellt, darauf folgte die Datensammlung in LibreOffice Calc, der Tabellenkalkulation des open source Programms LibreOffice, Version 7.2.2.2 (x64). Anschließend erfolgte die Berechnung des quantitativen Modells, ebenfalls in STAN.

Für die Literaturrecherche wurden Sekundärquellen zurate gezogen, ergänzt durch Expertenmeinungen. Besonders bei der Kompostierung nach DIN SPEC 91421 wurde auf die Erfahrungswerte der Firma Finizio zurückgegriffen, da deren Vorgehen bei der Verwertung der Fäkalien im evh potentiell zur Anwendung kommen könnte. Ebenso wurden Herstellerangaben von Inhaltsstoffen bestimmter Produkte, die für die Kompostierung verwendet werden, genutzt.

Bei der Datensammlung wurde von normalverteilten Parametern ausgegangen, die Berechnung der Fehler (Δx) der Input-Daten für STAN erfolgte nach Brunner u. a. (2017) über die Standardabweichung ($SD_{\bar{x}}$) der Varianz (s^2) der arithmetischen Mittelwerte ($\bar{x}$) der Literaturdaten (x_i). Der Stichprobenumfang betrug n .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n x_i$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$\Delta x = SD_{\bar{x}} = \sqrt{s^2}$$

In STAN erfolgte nach Eingabe der Daten die Datenrekonziliation, sowie die Berechnung unbekannter Flüsse und die Visualisierung der Stoffströme durch Sankey-Pfeile. Die Fehler

der Wiederfindungsraten von N und P bei der Aufbereitung wurden mittels der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet.

Die Beurteilung der Ströme geschah nach ebenfalls Brunner u. a. (2017) anhand der relativen Fehler (RU, englisch: *relative uncertainty*) nach der Gleichung:

$$RU = \frac{\Delta x}{\bar{x}}$$

Die Bewertung der Fehler bei den Importströmen erfolgte nach dem Vorgehen von Krause u. a. (2017) durch eine Einteilung der Ströme nach Höhe der RU in „geringe“ (± 25 %), „mittlere“ (± 50 %) und „hohe“ (± 90 %) Unsicherheit.

4. Ergebnisse

4.1 Gefäßversuch

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse des Gefäßversuches mit *Tagetes erecta* im IGZ Großbeeren vorgestellt. Die Bestimmung der Wuchshöhen, der Pflanzendurchmesser, der Anzahl der Zweige und der Blütenzahl erfolgte wöchentlich über den gesamten Versuchszeitraum. Die Biomasse wurde bei der Ernte bestimmt.

4.1.1 Wuchshöhe

Die Wuchshöhe der *Tagetes* unterschied sich zu Beginn des Versuchs kaum. Ab dem Zeitpunkt der Flüssigdüngergabe waren erste Unterschiede bei der Wachstumsgeschwindigkeit zu erkennen. Alle Pflanzen wiesen ab der dritten Woche ein deutlich schnelleres Wachstum auf als K_0 und F_{100} (siehe Abb. 4.1). Neben dem Höhenwachstum stieg im Laufe des Versuchs auch die Variabilität innerhalb der Behandlungen.

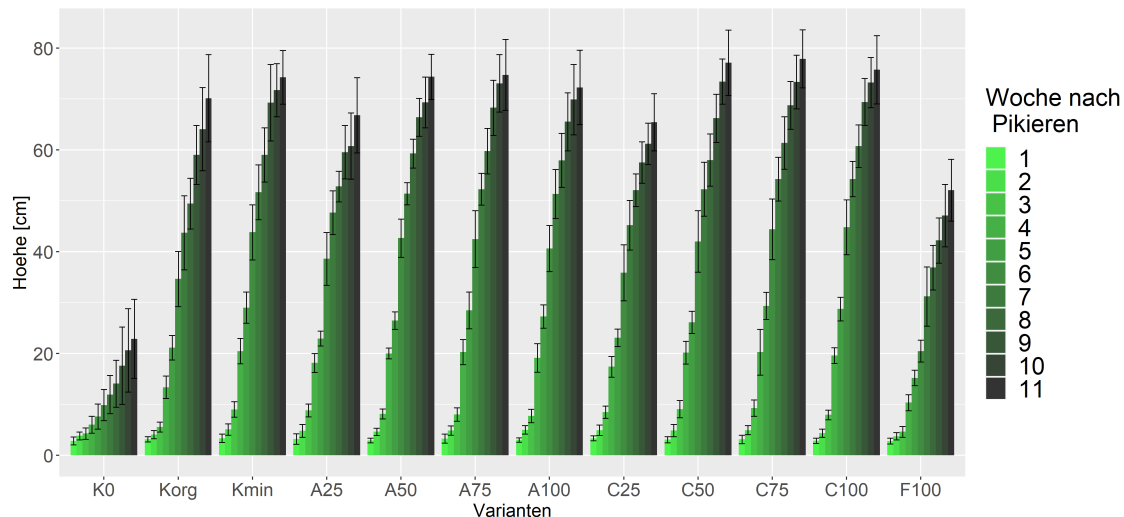


Abbildung 4.1: Messung der Wuchshöhe nach n Wochen nach Pikieren. Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen

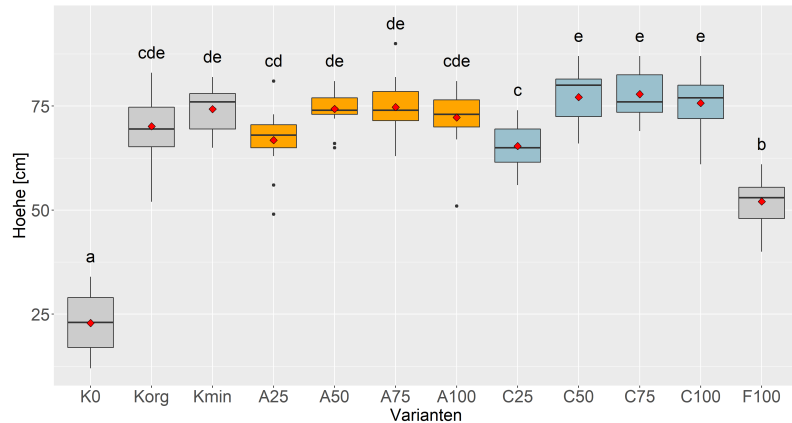
Graph 4.2 zeigt die bei der Abschlussbonitur ermittelte Wuchshöhe. K_0 und F_{100} waren mit 22,9 cm und 53,1 cm signifikant kleiner als die restlichen Varianten, die nächst höheren Werte lieferten A_{25} (66,8 cm) und C_{25} (65,4 cm), diese beiden lagen auf dem gleichen Signifikanzniveau wie die organische Kontrolle K_{org} (70,1 cm). Den besten Wuchs wies C_{75} mit 77,9 cm auf, jedoch unterschied sich diese Variante nicht statistisch signifikant von den gedüngten Kontrollen K_{org} und K_{min} , sowie von den NUF-behandelten Gefäßen A_{50} , A_{75} , A_{100} , C_{50} und C_{100} .

Der Levene-Test ($\alpha < 0,05$) zeigte für alle Stichproben Varianzhomogenität mit einem p-Wert von 0,51.

4.1.2 Durchmesser

Die gemessenen Durchmesser der Versuchspflanzen stiegen bis zur vierten Woche nach dem Umtopfen deutlich an, danach ließ das Breitenwachstum nach und war teilweise rückläufig (siehe Abb. 4.3).

Abbildung 4.2: Mittlere Wuchshöhe bei Ernte. Mittelwerte sind rot markiert, Varianten, die mit NUF behandelt wurden sind farblich hervorgehoben. Gleiche Buchstaben über den Boxen signalisieren gleiche Signifikanzniveaus



Da die Daten aufgrund dessen nicht aussagekräftig waren wurde hier auf eine zusätzliche Auswertung des bei der Ernte ermittelten Durchmessers verzichtet. Dennoch war erkennbar, dass die Varianten K_0 und F_{100} fast durchgängig einen kleineren Wuchs aufwiesen als die restlichen Töpfe.

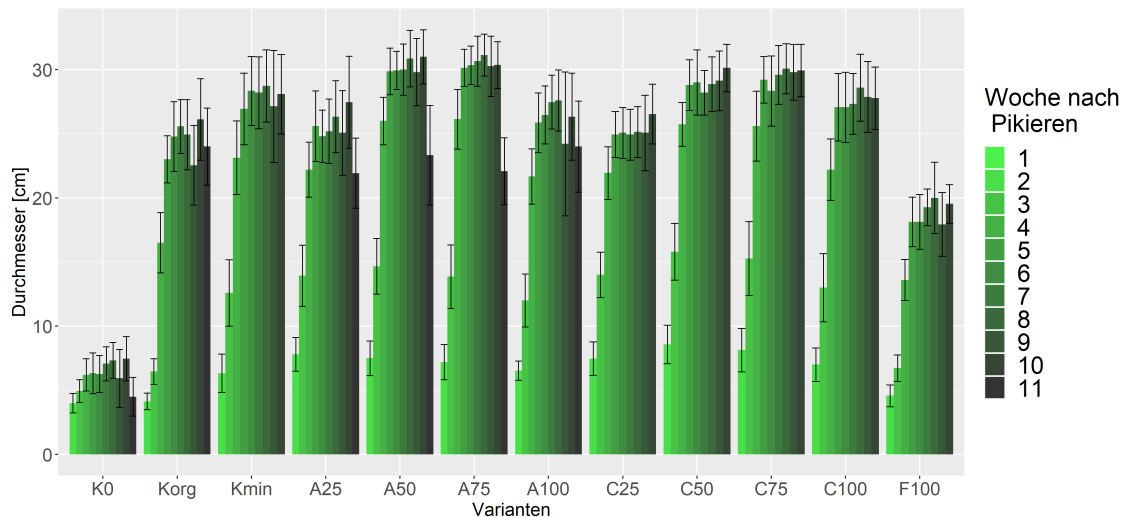


Abbildung 4.3: Messung der Pflanzendurchmesser nach n Wochen nach Pikieren. Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen

4.1.3 Anzahl der Zweige

Die Anzahl der Zweige stieg ebenso wie die Wuchshöhe und der Durchmesser der Tagetes nach Woche drei bis vier zunächst stark an und ließ bei allen Varianten, außer K_0 und F_{100} , gegen Ende des Versuchs nach (siehe Abb. 4.4). Beide genannten Behandlungen wiesen bis zur Ernte eine langsame, aber gleichmäßige Zunahme der Zweige auf.

Die Flüssigdüngervarianten und organische Kontrolle zeigten ein rückläufige Zweigzahl, da im Laufe des Versuchs immer mehr der alten Zweige abtrockneten.

K_0 und F_{100} hatten mit durchschnittlich 12,9 und 32,7 Zweigen bei der Ernte die niedrigsten Mittelwerte (siehe Abb. 4.5). A_{25} und C_{25} wiesen mit 71,1 und 73,5 eine signifikant geringere Anzahl an Zweigen auf als die organische Kontrolle K_{org} (105,4), alle weiteren NUF-Varianten hatten jedoch mindestens das gleiche Signifikanzniveau oder ein höheres als K_{org} . Den besten Wuchs zeigte hier die Variante C_{100} mit 173,3 Zweigen, darauf folgte K_{min} mit 166,5. Die mineralische Kontrolle wies jedoch eine so weite Standardabweichung auf, dass sie sich nicht signifikant von den NUF-Varianten A_{50} , A_{75} , A_{100} , C_{50} , C_{75} , C_{100}

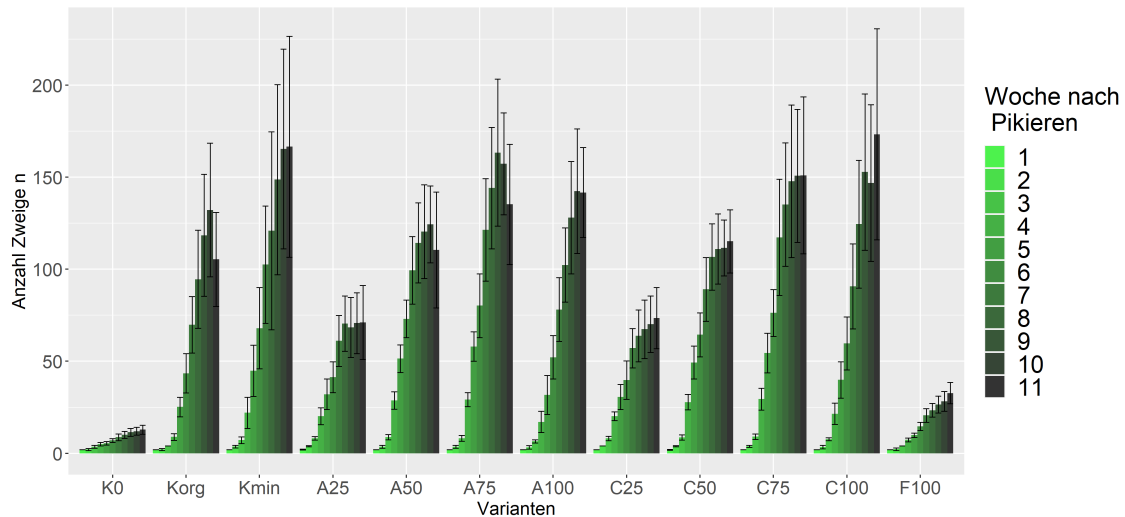


Abbildung 4.4: Anzahl der Zweige nach n Wochen nach Pikieren. Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen

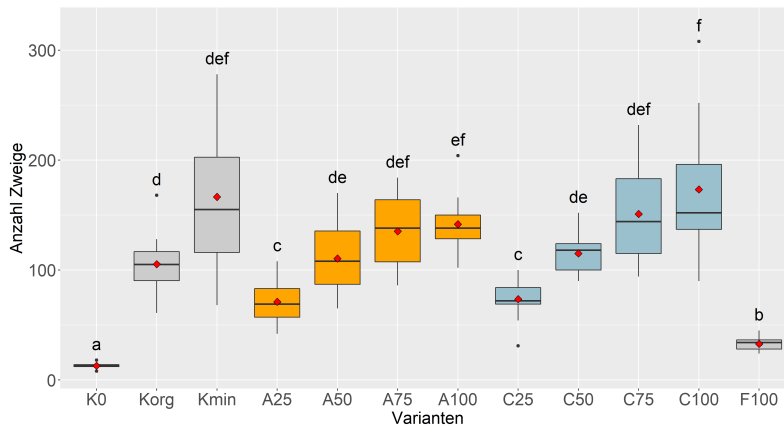


Abbildung 4.5: Mittlere Anzahl an Zweigen bei Ernte. Mittelwerte sind rot markiert, Varianten, die mit urinbasiertem Flüssigdünger behandelt wurden sind farblich hervorgehoben. Gleiche Buchstaben über den Boxen signalisieren gleiche Signifikanzniveaus

und der Kontrolle K_{org} unterschied. Innerhalb der Aurin- und C.R.O.P.-Behandlungen war ersichtlich, dass mit steigender Flüssigdüngergabe die Anzahl der Zweige stieg, wobei es keine Unterschiede zwischen den 75er- und 100er-NUF-Varianten gab.

4.1.4 Blüten

Wie in Abb. 4.6 ersichtlich wuchsen die ersten Blüten ab der sechsten Woche nach dem Pikieren der Keimlinge bei den Varianten K_{min} , C_{50} und C_{75} . In der darauf folgenden Woche waren bereits bei allen Behandlungen, bis auf K_0 , erste Blüten sichtbar. Bis zum Ende des Versuchs wuchsen bei allen Tagetes stetig mehr Blüten, wobei auch hier die Variabilität innerhalb der Varianten im Verlauf stieg. Die später gewachsenen Blüten waren deutlich kleiner als die ersten, auch die Knospen wuchsen bei allen Behandlungen kleiner nach als zu Beginn des Versuchs.

Die meisten Blüten bildeten mit 11,7 die Gefäße der C_{100} Varianten aus, gefolgt von K_{min} mit 10,5 und A_{75} mit 10,3. Schlusslicht bildeten wie bei allen anderen Wuchsparametern auch K_0 (0,3) und F_{100} (1,5). Die Varianten A_{75} , A_{100} , C_{75} und C_{100} lagen im gleichen Signifikanzniveau wie die konventionellen Kontrollen. Aufgrund der weiten Spanne der Werte existierten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen K_{org} und sämtlichen NUF-Behandlungen und der Kompostvariante.

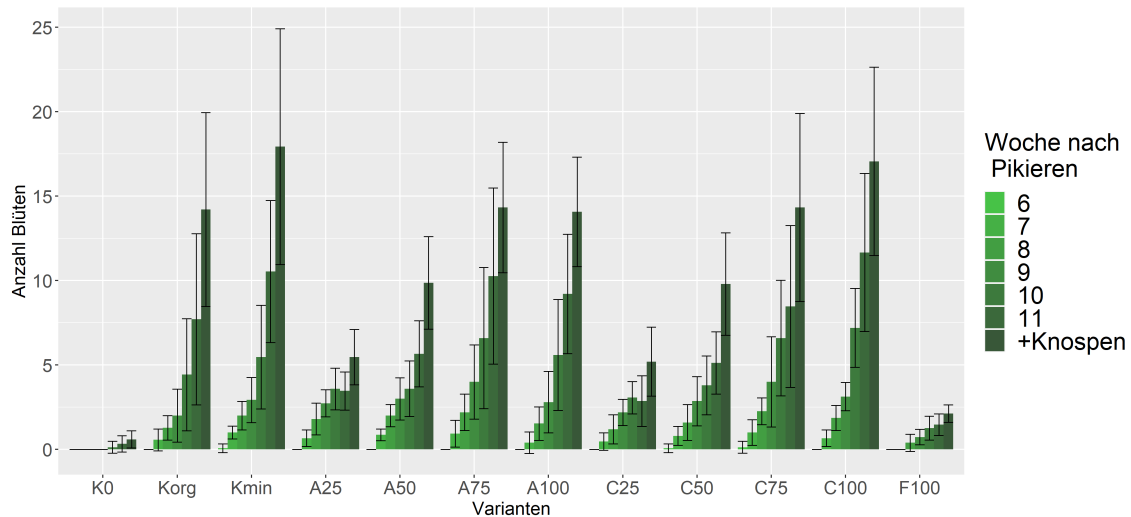
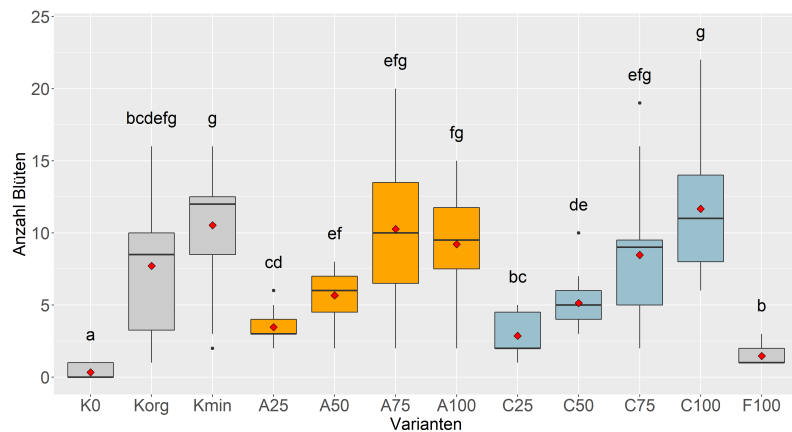


Abbildung 4.6: Anzahl der Blüten nach n Wochen nach Pikieren und Knospen bei der Ernte. Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen

Abbildung 4.7: Mittlere Anzahl an Blüten bei Ernte. Mittelwerte sind rot markiert, Varianten, die mit urinbasiertem Flüssigdünger behandelt wurden sind farblich hervorgehoben. Gleiche Buchstaben über den Boxen signalisieren gleiche Signifikanzniveaus



4.1.5 Biomasse

Die meiste Frischmasse je Pflanze hatte Variante A_{75} mit durchschnittlich 66,9 g (siehe Tab. 4.1), sie unterschied sich damit jedoch nicht signifikant von K_{min} (48,1 g). Bis auf die Varianten A_{25} und C_{25} wuchsen alle NUF-Gefäße mindestens genau so gut oder besser als die konventionell gedüngten Kontrollen. Die geringste Biomasse wurde mit 1,3 g bei K_0 gemessen.

Die Trockenmasse wies im Allgemeinen keine sehr große Variabilität auf. Obwohl der Games-Howell-Test signifikante Unterschiede aufzeigt folgen diese keinem der Muster, die bei den Ergebnissen der Bonitur zu beobachten waren. So wies zum Beispiel die Variante A_{25} mit 30,3 % die größte Trockenmasse auf, obwohl diese Behandlung bei allen zuvor untersuchten Wachstumsparametern innerhalb der NUF-Varianten mitunter am schlechtesten abschnitt.

4.1.6 Zusammenfassung

Bei allen untersuchten Eigenschaften konnte man erkennen, dass eine höhere Gabe NUF zu einem besseren Wachstum führte. Dabei existierten keine statistischen Unterschiede zwischen den Varianten A_{75} , A_{100} , C_{75} und C_{100} . Die konventionell gedüngten Kontrollen K_{min} und K_{org} unterschieden sich statistisch aufgrund der großen Spannweite der Daten von K_{org} nicht voneinander, jedoch waren die Mittelwerte der K_{min} -Varianten durchge-

Tabelle 4.1: Biomasse der Varianten (Vars.) bei Ernte. Die Frischmasse (FM) wurde von allen Pflanzen bestimmt, die Trockenmasse (TM) gefäßweise bei drei Wiederholungen. Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen. Gleiche Buchstaben signalisieren gleiche Signifikanzniveau

Vars.	FM [g]	TM [%]
K ₀	1.3 ± 0.5 a	26.5 ± 0.7 ab
K _{org}	48.1 ± 15.3 d	26 ± 1 abc
K _{min}	58.5 ± 22.5 de	27.3 ± 0.6 a
A ₂₅	26.6 ± 4.5 c	30.3 ± 0.6 f
A ₅₀	52 ± 12.7 de	29 ± 1 def
A ₇₅	66.9 ± 11.9 e	29.3 ± 1.5 ef
A ₁₀₀	46.1 ± 9.6 d	28 ± 0 bcde
C ₂₅	27.1 ± 8.2 c	28 ± 0 bcde
C ₅₀	47.5 ± 8.3 d	28.7 ± 1.2 cde
C ₇₅	63.5 ± 18.1 de	27.7 ± 0.6 bcd
C ₁₀₀	52.7 ± 18.2 de	27.3 ± 0.6 abc
F ₁₀₀	9.1 ± 2.5 b	27.5 ± 0.7 abcd

hend höher als die von K_{org}. Die Gefäße der Kompostbehandlung F₁₀₀ wuchsen zwar besser als die von K₀, blieben jedoch weit hinter den NUF-Varianten zurück. K₀ zeigte das schlechteste Wachstum.

Die 75er und 100er NUF-Varianten unterschieden sich in allen untersuchten Parametern nicht von der mineralischen Kontrolle, hinsichtlich der Anzahl der Zweige waren sie sogar besser als K_{min}. Daher kann man sagen, dass NUF eine gleichwertige Alternative zu konventionellen Düngern bilden.

4.2 Massenflussanalyse

Die folgenden Kapitel zeigen die Ergebnisse der MFA der Fäkalienbehandlung von Inhalten aus TTT im evh. Im qualitativen Modell werden die relevanten Ströme und Prozesse auf Güterebene aufgezeigt, die angenommenen Vereinfachungen werden anhand von Literaturangaben begründet. Anschließend erfolgt die Darstellung des quantitativen Modells mit den berechneten Mengen an NUF und H.I.T. auf der Substanzebene von N und P. Die für die Datenrecherche verwendeten Quellen sind in Tab. A.3 aufgeführt.

4.2.1 Qualitatives Modell

Abb. 4.8 zeigt das qualitative Modell zur Herstellung von fäkalienbasiertem Recyclingdünger im evh.

In die TTT wird neben Fäkalien Toilettenpapier zur Genitalhygiene und Strohmehl zur Geruchsminderung und Feuchtigkeitsreduktion gegeben. Entgegen der Betriebsweise der meisten Trockentoiletten wird hier mit Stroh als Hilfsstoff zur Geruchsneutralisierung gearbeitet, da dieses bei der Kompostierung im Gegensatz zu Sägespänen aufgrund des günstigeren C/N-Verhältnisses besser abbaubar ist [Christensen 2011; Onwosi u. a. 2017]. Zusätzlich kommt es bei der Nutzung der TTT zu unerwünschten Fehlwürfen, die nicht kompostierbar sind, wie zum Beispiel Feuchttücher und Damenhygieneprodukte (Tamppons, Binden).

Bei der Urinseparierung wird von einer Fehleinleitungsrate von 10 ± 5% von Urin in den Fäzesbehälter ausgegangen, diese Werte beruhen auf Eigenversuchen von der Finizio GmbH. Um das in der Nährstoffbilanz der MFA zu berücksichtigen wurde bei der

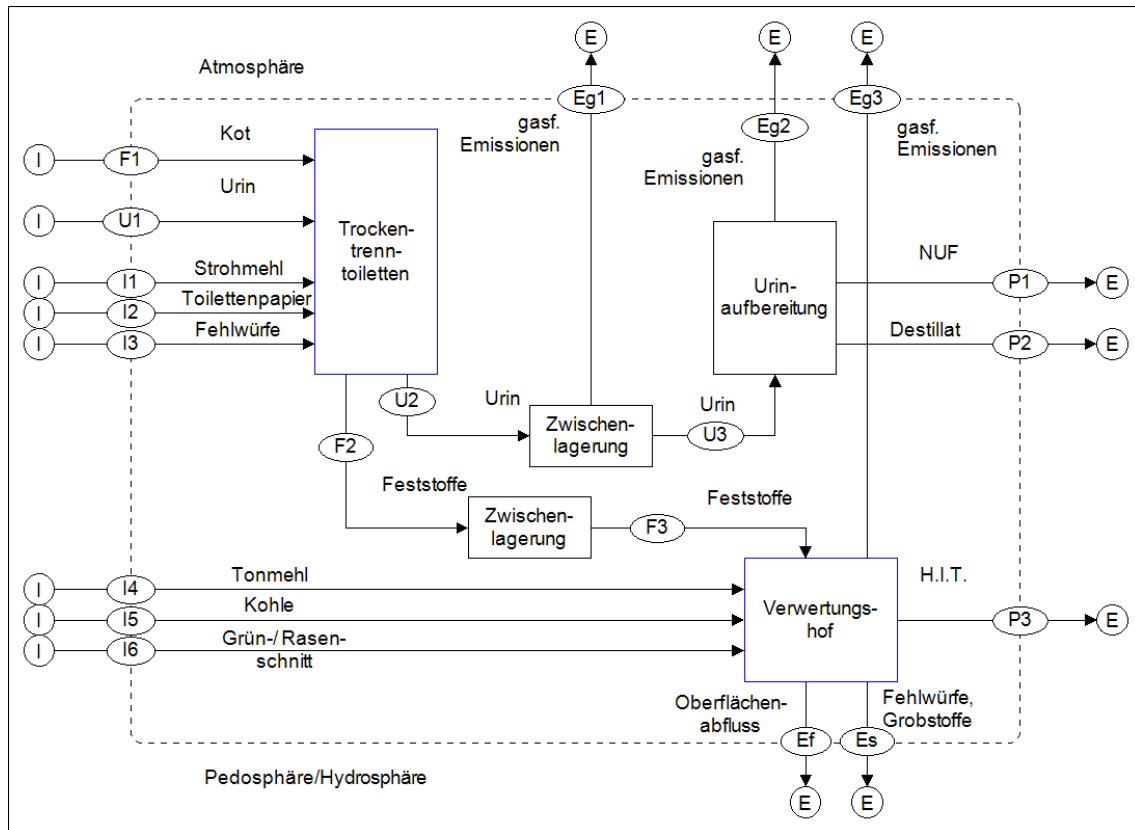


Abbildung 4.8: Qualitatives Modell der MFA des evh auf Güterebene. Die gestrichelte Linie stellt die Systemgrenze dar, Prozesse sind durchgängig umrandet, wobei blaue Linien Subprozesse anzeigen. Pfeile über die Systemgrenzen zeigen Import- (I) und Exportflüsse (E). Die Kurzbezeichnungen auf den Pfeilen symbolisieren deren Eigenschaften: flüssige (Ef) und gasförmige Emissionen (Eg), feste unerwünschte Exportgüter (Es), fäzesaltige Flüsse (F), Urin (U) und nutzbare Produkte (P)

TTT ein Subsystem mit einem Transferkoeffizienten (TK) eingerichtet.

Der Urin wird in einem geschlossenen Kanister aufgefangen, in dessen Zuleitung ein U-Rohr negative Gerüche verhindert. Nach Udert, Larsen u. a. (2006) sind die N-Verluste in einem geschlossenen System vernachlässigbar, daher wurde hier kein Fluss für gasförmige Emissionen berücksichtigt. Durch die Verwendung von Strohmehl als Hilfsstoff im Fäzesbehälter sinkt, trotz Fehleinleitung von Urin, die Feuchtigkeit. Aus diesem Grund und weil die Aufenthaltsdauer des Fäzes-Hilfsstoff-Gemisches im offenen Sammeleimer der TTT nur kurz ist, werden auch hier gasförmige Verluste vernachlässigt [Onwosi u. a. 2017].

Sowohl die Feststoffe, als auch der Urin aus der TTT werden nun jeweils bis zur Behandlung in geschlossenen Behältern zwischengelagert. Nach Friedler u. a. (2013) und Meinzinger (2010) kommt es dennoch zu Verlusten bei Transport, Lagerung und Umfüllen des Urins, deswegen wurde hier ein Exportfluss eingefügt. Zusätzlich bildet sich bei der Zwischenlagerung von Urin anorganische Ausfällungen in Form von Struvit und Hydroxylapatit. Diese bilden Inkrustationen in den Zuleitungen und Schlamm am Boden des Sammel tanks [Jönsson, Stintzing u. a. 2004; Martin u. a. 2022; Udert, Larsen u. a. 2006]. Da die Leitungen in den TTT des evh jedoch verhältnismäßig kurz sind aufgrund der Tatsache, dass sich die Urinbehälter direkt neben den Toiletten befinden und der Schlamm laut Jönsson, Stintzing u. a. (2004), Martin u. a. (2020) und Udert, Larsen u. a. (2006) flüssig ist und einfach mit dem Urin homogenisierbar, wird im Prozess „Zwischenlager“ kein Lager für die Ausfällungen eingerichtet. Die Zwischenlagerung der Feststoffe geht in geschlossenen Eimern vonstatten, daher werden hier gasförmige Verluste vernachlässigt. Die Urinaufbereitung im evh soll nach dem bereits in Pilotprojekten erprobten Prozess

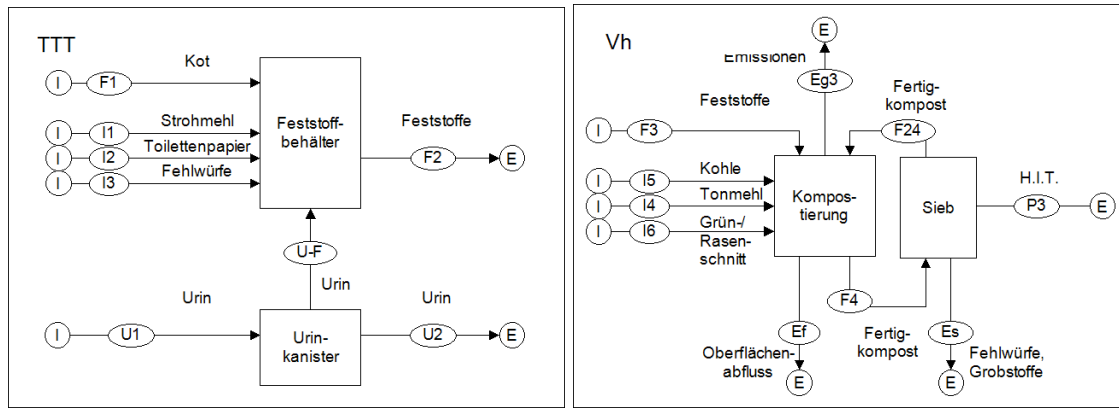


Abbildung 4.9: Subsysteme Trockentrenntoilette. Prozesse sind durchgängig umrandet. Die Kurzbezeichnungen auf den Pfeilen symbolisieren deren Eigenschaften: fäzesaltige Flüsse (F), Importflüsse über die Systemgrenzen (I), flüssige (Ef) und gasförmige Emissionen (Eg), feste unerwünschte Exportgüter (Es) und Produkte (P), Fehleinleitung Urin (U-F) und Urin (U)

von VUNA vonstatten gehen. Wie aus Kapitel 2.3.2 hervor geht, ist dieser in mehrere Teilschritte untergliedert: der Nitrifikation, der Zwischenlagerung und der Destillation. Maurer u. a. (2006) zeigen in ihrem Artikel, dass die Nitrifikation ein Prozess ohne Ausgasung ist, auch die Zwischenlagerung passiert in einem geschlossenen System. Es kommt lediglich bei der Destillation zu Verlusten, daher wurde auf das Erstellen eines Subsystems verzichtet. Nach Etter und Udert (2016) fällt bei der Nitrifikation Überschussschlamm an, dieser wird jedoch in keiner weiteren Publikation quantifiziert. Maurer u. a. (2006) sagen aus, dass das einzige Produkt der partiellen Nitrifikation die Ammonium-Nitrat-Lösung ist ohne möglichen Schlamm zu erwähnen, daher wurde dieser in der MFA nicht berücksichtigt. Die Produkte der Aufbereitung nach dem VUNA-Prozess sind NUF und das Destillat, das eine geringe Menge Nährstoffe enthält [Etter, Gounden u. a. 2015, Etter und Udert 2016, Maurer u. a. 2006].

Nach der Zwischenlagerung werden die Feststoffe aus den TTT zum Verwertungshof transportiert, dieser Prozess wurde in der MFA ebenfalls mit einem Subprozess beschrieben. Wie in Kapitel 2.3.1 erläutert läuft bei der Kompostierung meso- und thermophile Phase im HyCo ab und die Reifung findet in Mieten statt. Im HyCo werden weitere Hilfsstoffe für die Kompostierung zu den Feststoffen aus den TTT hinzugefügt, diese sind als Importe in der MFA aufgeführt. Ein Hilfsstoff ist bereits fertiger Kompost, dieser dient zur Beimpfung des noch nicht hygienisierten Kompostes mit dem Prozess zuträglichen Mikroorganismen. Da in der Literatur nur Daten zu den Emissionen während des kompletten Kompostierungs-Vorganges zu finden waren, wurden diese beiden Prozesse im Subsystem zu einem Prozess zusammengefasst. Zwar besteht die Annahme, dass in der meso- und thermophile Phase weniger gasförmige Emissionen anfallen, da der HyCo abgedeckt ist, jedoch kommt es durch das häufige Wenden der Mieten zu größeren Verlusten als bei Komposten, die weniger gewendet werden und dem entsprechend zu größeren gasförmigen Verlusten [Parkinson u. a. 2004]. Auch flüssige Emissionen sind trotz geschlossenem HyCo und mit Kompostvlies abgedeckten Mieten nicht vermeidbar. Daher werden die Literaturdaten zu flüssigen und festen Emissionen nicht korrigiert.

Nach Ende der Reifung wird der Fertigkompost gesiebt, um Grobstoffe (Steine, Stöcke, etc. aus Grün- und Grasschnitt) und Fehlwürfe zu entfernen, ein Teil wird zum Beimpfen für die nächste Füllung des HyCo verwendet. Da der Kompost nun stabil ist, fallen hier keine Emissionen mehr an. Aufgrund der Rückführung des Fertigkompostes in den HyCo, wurde das Sieben in der MFA als extra Prozess aufgeführt. Produkt der Kompostierung ist H.I.T.

4.2.2 Quantitatives Modell

Abbildung 4.12 zeigt das quantitative Modell der MFA des evh auf Substanzebene. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt wird der Großteil des über die Nahrung aufgenommenen N über den Urin abgegeben, so fallen innerhalb eines Jahres im evh $377,53 \pm 21,1$ kg N an. Ungefähr die Hälfte des P wird über den Urin ausgeschieden, also in einem Jahr ca. $36,1 \pm 1,04$ kg P. Fäzes enthalten verhältnismäßig geringere Mengen Nährstoffe, hier liegt der Beitrag innerhalb der Systemgrenzen bei $63,0 \pm 11,0$ kg N und $21,0 \pm 4,3$ kg P. Die Hilfsstoffe bei der Toilettennutzung tragen kaum zur N-Fracht der TTT-Inhalte bei. Toilettenpapier enthält laut Friedler u. a. vernachlässigbare Mengen N und P. Bei der Annahme, dass das Strohmehl in den Verhältnissen aus Tabelle 2.3 bereits bei der Nutzung der TTT hinzugefügt wird, steuert dieses weniger als 1 % der Nährstofffracht zu den Inhalten der TTT bei. Die Fehlwürfe werden am Ende der Kompostierung wieder aus dem System entfernt ohne ihre möglicherweise enthaltenen Nährstoffe an den Kompost abzugeben, daher werden sie in der Bilanz nicht berücksichtigt und als N- und P-freier Import und Export in der MFA aufgeführt.

Das Subsystem TTT ist in Abb. 4.10 dargestellt, die Berechnung der Fehleinleitung von Urin in den Fäzesbehälter in STAN erfolgte auf beiden Güterebenen über einen TK von 10 ± 5 %.

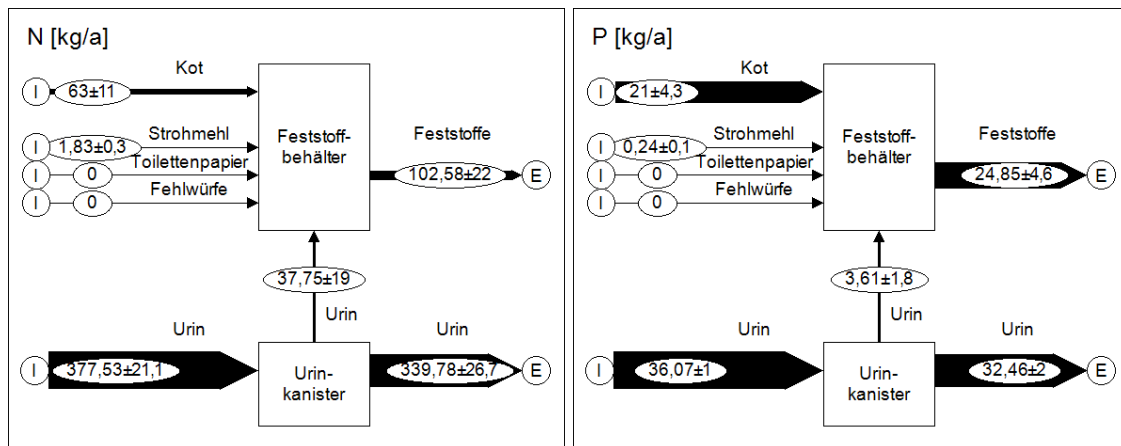


Abbildung 4.10: Subsystem Trockentrenntoilette auf Substanzebene von N und P. Darstellung der Mittelwerte, sowie der Standardabweichungen, die dicke der Pfeile symbolisiert die Größe der Massenflüsse. Prozesse sind durchgängig umrandet

Bei der Lagerung von nicht stabilisiertem Urin kommt es wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben zur Ausgasung von NH_4^+ , diese wurde in STAN mit einem TK von $1 \pm 0,35$ % angegeben, gasförmige Verluste von P existieren nicht.

Bei der Urinaufbereitung nach VUNA kommt es wiederum zu Verlusten von N bei der Herstellung des NUF, zum einen gibt es auch hier gasförmige Verluste von 3 ± 2 % N, bzw. $10,9 \pm 3,5$ kg N und zum anderen bleiben $1 \pm 0,5$ % N, bzw. $3,36 \pm 1,7$ kg N im Destillat zurück. Letzteres geht jedoch nicht für die Anwendung als Düngemittel verloren, sondern kann als Gießwasser verwendet werden. Bei der Urinaufbereitung entstehen keine P-Verluste. Insgesamt sind im NUF innerhalb eines Jahres $322,9 \pm 25,7$ kg N und $32,46 \pm 2$ kg P enthalten.

Die Verluste während der Kompostierung wurden ebenfalls durch TK in STAN berechnet. Trotz Abdeckung der Kompostmieten mit Vliesbahnen entstehen ca. $1 \pm 0,5$ % P-Verlust ($0,31 \pm 0,2$ kg P a^{-1}) durch Oberflächenabfluss, dieser enthält auch ca. 3 ± 2 % des im Kompost enthaltenen N ($2,4 \pm 1,3$ kg N a^{-1}). Des Weiteren kommt es, wie im vorangehenden Kapitel beschrieben, durch das Wenderegime zu hohen N-Ausgasungen, diese betragen ca. 25 ± 10 % ($30 \pm 13,2$ kg N a^{-1}). Da die Grobstoffe, die bei der Siebung

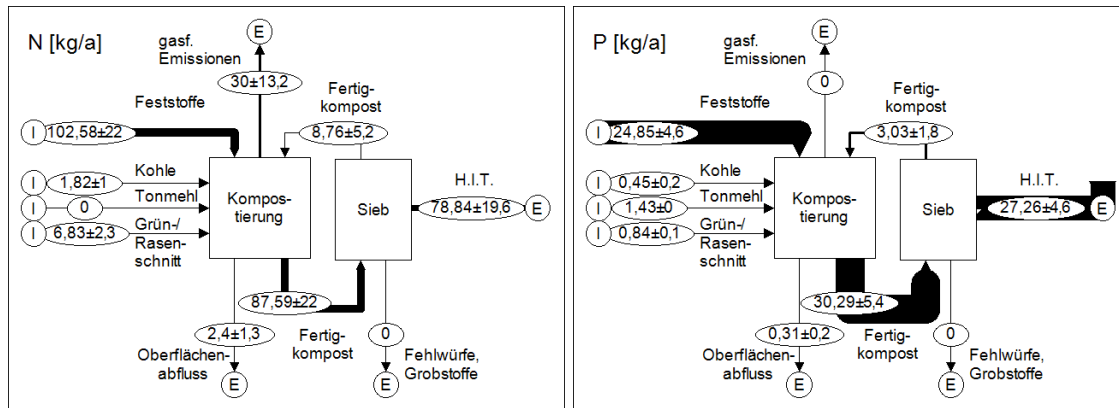


Abbildung 4.11: Subsystem Verwertungshof auf Substanzebene von N und P. Darstellung der Mittelwerte, sowie der Standardabweichungen, die dicke der Pfeile symbolisiert die Größe der Massenflüsse. Prozesse sind durchgängig umrandet

aus dem Kompost entfernt werden, unzersetzt sind und keinen Beitrag für die Bilanz der Kompostherstellung leisten, werden sie als nährstofffreie Güter aufgeführt.

Im H.I.T. findet man innerhalb eines Jahres $78,8 \pm 19,6$ kg N und $27,3 \pm 4,6$ kg P wieder. Die Wiederfindungsrate der untersuchten Nährstoffe aus Fäkalien zusammen mit den Hilfsstoffen in den Endprodukten der Aufbereitung beträgt ca. 89,8 % des N und 99,45 % des P. Die geringsten Verluste entstehen bei dem VUNA-Prozess hinsichtlich des P-Recyclings, hier werden bei fachgerechter Durchführung 100 % Nährstoffe wiedergewonnen. N-Einbußen entstehen besonders durch Ausgasung, dennoch können ca. 95,0 % bei der partiellen Nitrifizierung des Urins wiedergewonnen werden. Bei der Kompostierung kommt es zu relativ hohen N-Verlusten, so werden ca. 70,9 % des N im Kompost gebunden, P findet man zu ca. 98,9 % wieder.

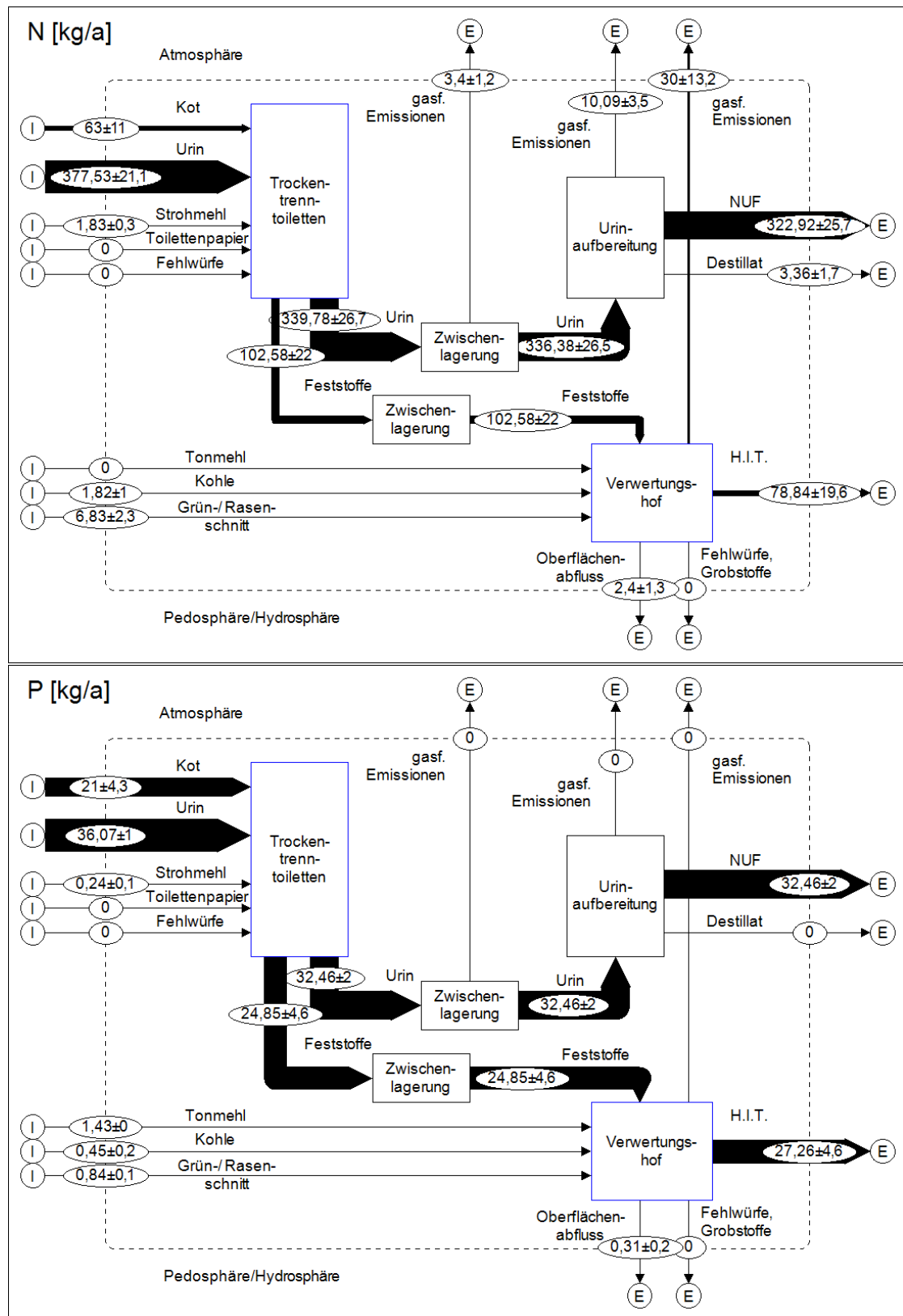


Abbildung 4.12: Quantitatives Modell der MFA des evh auf Substanzebene von N und P. Darstellung der Mittelwerte, sowie der Standardabweichungen, die Dicke der Pfeile symbolisiert die Größe der Massenflüsse. Die gestrichelte Linie stellt die Systemgrenze dar, Prozesse sind durchgängig umrandet, wobei blaue Linien Subprozesse anzeigen. Pfeile über die Systemgrenzen zeigen Import- (I) und Exportflüsse (E)

4.3 Synthese

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse des Gefäßversuches und der MFA verwendet, um Nutzungsempfehlungen für die Quartiersbegrünung des evh zu erstellen. Die Empfehlungen werden dabei anhand einer Literaturrecherche untermauert.

4.3.1 Mögliche Anbaumethoden

Die Düngeverordnung (DüV) bestimmt „die gute fachliche Praxis bei der Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen“ (§1 I (1) DüV) in Deutschland. Demnach zählen „geschlossene und bodenunabhängige Kulturverfahren“ (§2 DüV), sowie Gewächshäuser nicht zu landwirtschaftlichen Flächen, auf denen nur Düngemittel nach der DüMV ausgebracht werden dürfen. Diesen Verfahren ist gemein, dass die Auswaschung von Drainagewasser in den Oberboden unterbunden wird, sie lassen sich nach Herold (1995) in drei Kategorien einteilen: Verfahrenstyp, Kulturmedien und dem Bewässerungssystem (siehe Abb. 4.13).

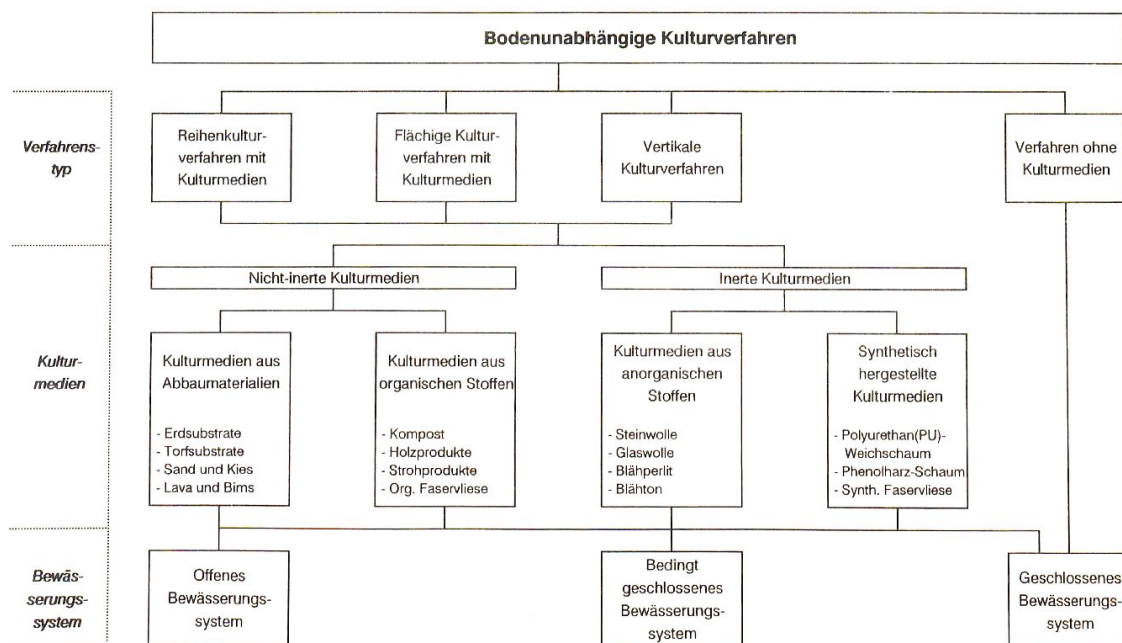
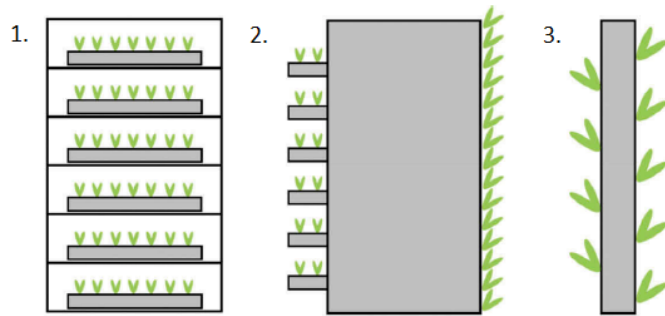


Abbildung 4.13: Bodenunabhängige Kulturverfahren nach Herold (1995).

Flächige Kulturverfahren müssen entweder in einem Gewächshaus oder einem nach unten abgedichteten Pflanztunnel angebaut werden. Um geeignete Oberflächen dafür zu schaffen ist Planierung und Profilierung des Oberbodens notwendig [Herold 1995], diese kommen nicht für das evh infrage, da der vorhandene Raum möglichst naturnah bleiben soll um eine lokale Infiltration von Regenwasser zu gewährleisten [Beneker u. a. 2021, evh 2022]. Interessant sind bei der Einteilung nach Verfahrenstyp hingegen vertikale Verfahren, da hier auf geringer Fläche eine höhere Pflanzendichte etabliert werden kann. Beacham u. a. (2019) stellen drei Arten von vertikalen Kulturmethoden vor: gestapelte Böden, Balkone und bepflanzte Wände (sog. „lebende Wände“) (siehe Abb. 4.14).

Horizontal gestapelte Böden eignen sich als Erhöhung der Fläche in Gewächshäusern für den kommerziellen Gemüse- oder Zierpflanzenanbau. Im evh kommen eher bepflanzten Balkone oder Wände in Frage, da hier der Anbau keinen ökonomischen Ansprüchen gerecht werden muss und die Quartiersbegrünung ästhetisch ansprechend auf möglichst viele Menschen wirken soll [Beacham u. a. 2019].

Abbildung 4.14: Schemas vertikaler Kulturmethoden. 1.) gestapelte Böden, 2.) bepflanzte Balkone, 3.) bepflanzte vertikale Flächen [Beacham u. a. 2019]



Eine Sonderform der vertikalen Kulturverfahren ist die Fassadenbegrünung. Während einige Vorteile¹ der Gebäudebegrünung im periurbanen Raum des evh eher zweitrangig sind, stellen andere dennoch eine Bereicherung für das Quartier und der Bewohner dar: Ästhetische Aufwertung von Gebäuden, die Steigerung der Biodiversität, Hitze- und Kälteisolierung im Innenbereich [Gruda 2021; Perini u. a. 2011].

Die Bepflanzung kann auf verschiedene Weisen angelegt werden: so stehen rankende Pflanzen (direkt an der Fassade oder systemgebunden mit Rankhilfen) lebenden Wänden, bei denen Pflanzgefäße an der Wand befestigt werden, entgegen (siehe Abb. 4.15). Lebende Wände und systemgebundene Begrünungen sind von sich aus bodenunabhängige Kulturen, Rankpflanzen können ebenfalls in Gefäßen gepflanzt werden [kuras 2017; Perini u. a. 2011].

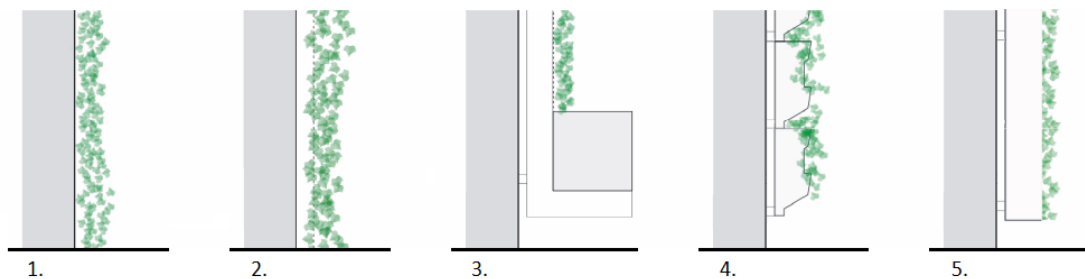


Abbildung 4.15: Schematische Darstellungen der verschiedenen Fassadenbegrünungen. 1.) direkte Begrünung an der Wand, 2.) systemgebundener Bewuchs direkt an der Wand, 3.) systemgebundener Bewuchs mit Kübel am Boden, 4.) lebende Wand mit Pflanzgefäßen, 5.) lebende Wand mit inerten Substrat [Perini u. a. 2011]

Die Sonderform „Verfahren ohne Kulturmedien“ umfasst unter anderem Hydrokulturen, also Systeme in denen die Pflanzenwurzeln ohne ein Kulturmedium direkt in einer Nährlösung wachsen. Aurin eignet sich aufgrund seiner Nährstoffzusammensetzung auch als Nährlösung für Hydrokultur, daher wäre eine Nutzung dahingehend auch denkbar.

Hinsichtlich der Kulturmedien sollte auf Erdsubstrate in Verbindung mit Kompost zurückgegriffen werden, da diese einfacher in der Handhabung sind und die Bewässerung und Düngung ohne technischen oder planerischen Aufwand anzuwenden ist, außerdem bietet der Einsatz von Kompost zusätzliche Vorteile, wie zum Beispiel bessere Phytohygiene, sowie eine gute Wasserhalte- und Pufferkapazität [Gruda 2021]. Der Anbau von Kulturen in Erdsubstraten kann in einer Vielzahl unterschiedlicher Gefäße vorgenommen werden, wie beispielsweise Container, Grow-Bags, Paletten, Hochbeete oder klassische Blumenkasten und -töpfe [Wartenberg 2008], auch durch Wiederverwenden von Abfall können ästhetisch ansprechende Pflanzgefäße geschaffen werden (Autoreifen, Säcke, Tüten, Altholz, etc.).

¹Steigerung des Wohlbefindens durch Schaffung „grüner Oasen“, Verbesserung der Luftqualität durch Feinstaubreduktion, Schallisolierung gegenüber Straßenlärm, Verbesserung des Mikroklimas durch Vermeidung von Hitzeinseln [Perini u. a. 2011]

In offenen Bewässerungssystemen gelangt nach Herold (1995) das Drainagewasser aus den Gefäßen in den Oberboden, daher entsprechen diese nicht den bodenunabhängigen Verfahren nach der DüV und eignen sich nicht für Gartenbau mit Recyclingdüngern im evh. Bei geschlossenen Systemen hingegen wird das überschüssige Wasser aufgefangen und in der gleichen oder einer anderen Kultur wiederverwendet, in bedingt geschlossenen Systemen erfolgt nach dem auffangen der Drainage keine Kreislaufführung, sondern eine Entsorgung des Wassers. Beide Vorgehensweisen könnten im evh angewendet werden.

Einige der in Abb. 4.13 aufgeführten Verfahren sind mit einem großen technischen Aufwand verbunden, so besitzen Nährmedien ohne organische Bodensubstanz meistens eine geringe, bzw. gar keine Pufferkapazität und ein kleines Nährstoff- und Wasserspeichervermögen. Die Kreislaufführung von Drainagewasser in einem geschlossenen System entspricht zwar in vollem Maße dem Grundsatz der Nachhaltigkeit wie sie im evh praktiziert werden sollen, jedoch besteht hier potentiell die Gefahr von einer Anreicherung von Pathogenen und Phytotoxinen im Wasser, weshalb diese Anbauverfahren fachkundig begleitet werden müssen. Des weiteren stellen solche Verfahren sehr hohe Anforderungen und Investitionen an die Implementation der Systeme [Herold 1995].

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt existieren Ausnahmeregelungen zur bodenbürtigen Verwendung von Düngers, die nicht der DüMV entsprechen. So besteht die Möglichkeit im Rahmen eines Forschungsvorhabens beispielsweise die Düngewirkung in einem Dauerversuch von NUF und H.I.T. zu ermitteln. Von Oktober 2020 bis August 2021 wurde bereits ein erster Freiland Düngerversuch mit Winterroggen unter Verwendung von H.I.T. in Brandenburg vorgenommen [Finizio 2021a]. Da sich die bodenverbessernde Wirkung² von Kompost jedoch nach einer einzigen Wachstumsperiode noch nicht vollständig entfaltet, könnte ein Dauerversuch Aufschluss über die tatsächlichen positiven Eigenschaften des H.I.T. bringen. Voraussetzung für die Beantragung eines solchen Versuches ist die Partnerschaft mit einer passenden Forschungseinrichtung oder Universität und die Zustimmung der SoLaWi Hannover.

Berger (2008) beschreibt in seinem Buch *Kompost-Toiletten - Sanitärsysteme ohne Wasser* dass eine Eigennutzung von Fäkalikompost dem rechtlichen Rahmen nicht widerspricht. Da das evh die Bauabschnitte käuflich erworben hat, könne man demnach den Kompost ohne eine Genehmigung der zuständigen Behörden zur Quartiersbegrünung oder für Gemüse zum Eigenverzehr verwenden, diese Tatsache konnte jedoch in keiner weiteren Quelle bestätigt werden. Ohne eine Zustimmung von amtlicher Seite wie sie im Ökohaus Rostock erteilt wurde, sollte von einer unrechtmäßigen Nutzung der Dünger trotzdem abgesehen werden.

Einer Nutzung von NUF und H.I.T. im evh ist also möglich, da eine einige bodenunabhängige Kulturverfahren existieren, deren Anwendung den Regelungen der DüV entsprechen, auch ohne dass menschliche Fäkalien in der DüMV aufgeführt sind. Die einfachste Methode ist die Bepflanzung von Gefäßen, die auf der Erde, an Wänden oder auf Dächern platziert werden. Planerisch aufwendiger wäre die Einrichtung von lebenden Wänden oder der Bau eines Gewächshauses mit Hydrokultur, diese Verfahren müssen jedoch fachkundig etabliert und gewartet werden. Ein bodenbürtiger Einsatz der Düngemittel kann zunächst projektgebunden stattfinden. Sobald die Kompostierung und Nitrifizierung Produkte stetiger Qualität hervorbringen, kann deren Unbedenklichkeit auch vor den örtlichen Behörden nachgewiesen werden, wodurch die Möglichkeit der Erteilung einer uneingeschränkten Nutzung besteht.

²Langzeit Düngewirkung, Humusaufbau, biologische Eindämmung von Phytopathogenen, Erhöhung der Pufferkapazität, des Wasser- und Nährstoffspeichervermögens [Onwosi u. a. 2017]

4.3.2 Quartiersbegrünung im evh

Innerhalb eines Jahres fallen nach der für diese Arbeit durchgeführten MFA $322,9 \pm 25,7$ kg N und $32,5 \pm 2,1$ kg P als NUF, bzw. Aurin an. Das Destillat enthält nur geringe Mengen N und kann zur Bewässerung der Pflanzen verwendet werden. Über die Kompostierung werden $78,8 \pm 19,6$ kg N und $27,3 \pm 4,6$ kg P rezykliert.

Die Baufläche des evh beträgt insgesamt 4,93 ha, davon sollen 3,5 ha unversiegelt bleiben. Die 6000 m² große Allmende Fläche ist potentiell für intensive gartenbauliche Nutzung vorgesehen. Hinzu kommt voraussichtlich eine Fläche von 2,5 ha Größe von der SoLaWi³ Hannover, die ebenfalls genutzt werden kann [Beneker u. a. 2021].

Ein wichtiger genereller Punkt der betrachtet werden muss ist die Bereitschaft der Bewohner zur Verwendung der Dünger. In Umfragen von Lienert u. a. (2009), in der die Akzeptanz zur Nutzung von Trenntoiletten, sowie zur Nutzung von urinbasiertem Dünger erfragt wurde, bestätigen 78 % der deutschen befragten, dass es eine gute Idee sei Urin als Dünger zu verwenden. 65 % der deutschen Umfrageteilnehmer sagten zu, dass sie Nahrungsmittel kaufen würden, die mit urinbasiertem Dünger angebaut wurden [Lienert u. a. 2009]. Zur Verwendung von fäzes-basierten Recyclingdüngern existiert eine schwache Datenlage, Publikationen existieren lediglich aus ruralen Gegenden in Ländern mit schlechtem Zugang zu sauberem Trinkwasser. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Akzeptanz hier geringer ausfällt als bei der Verwendung von Urin. Eine Düngung der Zierpflanzen im Quartier kann erste Berührungspunkte der Bewohner des evh mit der Nutzung von NUF und H.I.T. darstellen und Vorurteile abbauen. Für „mutige“ ist dennoch der Anbau von essbarem Gemüse unter den im vorherigen Kapitel genannten Verfahren möglich, daher wird darauf an dieser Stelle auch eingegangen. Wurzelgemüse bleibt dabei außen vor aufgrund der Annahme, dass auch die „mutigen“ davon zurückschrecken, wenn die essbaren Teile des Gemüses „im Fäkalkompost“ wachsen, auch Leguminosenanbau wird wegen seiner N-Fixierenden Wirkung außer Acht gelassen.

Im Gefäßversuch wurde für die Düngung auf Basis des spezifischen N-Bedarfes der Kultur ein optimales Verhältnis von NUF zu H.I.T. von 3:1 ermittelt. Bei einer Ausbeute von 323 kg N a⁻¹ im NUF und 79 kg N a⁻¹ im H.I.T., bleibt ein Überschuss von 86 kg N a⁻¹ NUF bestehen. Der zusätzliche Flüssigdünger bietet sich für ein Kulturverfahren ohne Erde an, wie zum Beispiel Hydrokultur oder in inerten Wachstumsmedien. Die gesamte für die Quartiersbegrünung zur Verfügung stehende N-Menge liegt bei 316 kg N a⁻¹.

Die DüV gibt vor, dass die Düngemittelgabe im Freiland nach dem Nährstoffbedarf der Kultur auszurichten ist unter Berücksichtigung der standortspezifischen Nährstoffnachlieferung aus dem Boden.

Obwohl Pflanzen zum Wachstum sämtliche Makro- und Mikronährstoffe benötigen, wird dennoch N als Leitnährstoff bei der Düngemittelgabe betrachtet, da dieser in den meisten Erden wachstumsbegrenzend wirkt [Wartenberg 2008]. P wird in mineralischen Substraten fest gebunden und ist im durchwurzelten Horizont von intensiv genutzten landwirtschaftlichen Böden häufig ausreichend vorhanden, so dass die Nachlieferung an die Pflanze nicht ausschließlich von der Düngung abhängig ist. Dem entgegen sorbiert mineralischer N nur leicht bis gar nicht an der Bodensubstanz, sondern befindet sich gelöst im Bodenwasser, wo es sofort pflanzenverfügbar, jedoch auch leicht auswaschbar ist [CEH 2013].

Für die folgenden Anbau-Szenarien wird davon ausgegangen, dass die Nährstoffe für Gemüse und Zierpflanzen komplett durch die Recyclingdünger zur Verfügung gestellt werden. In der Realität sind im Mutterboden mineralische und organische Nährstoffe vorhanden, die für die Pflanzen kurz- oder langfristig verfügbar sind und bei der Düngemittelgabe mit berechnet werden müssen. Die Angaben sind also als Mindestmaße anzusehen, in der

³ „In der **Solidarischen LandWirtschaft** (SoLaWi) tragen mehrere Privat-Haushalte die Kosten eines landwirtschaftlichen Betriebes oder einer Gärtnerei, wofür sie im Gegenzug den Ernteertrag erhalten“ [<https://solawi-hannover.jimdofree.com/>, Zugriff: 1.12.2022]

Praxis wären die Flächen größer.

Tabelle 4.2 zeigt theoretische Anbauflächen von essbarem Gemüse, das mit NUF und H.I.T. aus dem aufbereiteten Fäkalien der TTT bei bodenbürtigem Anbau gedüngt werden könnte.

Tabelle 4.2: N-Bedarf verschiedener Feldgemüse mit theoretischer maximalen Anbauflächen bei kompletter N-Versorgung durch Recyclingdünger. Quellen: 1.) LfL 2022, 2.) Mayer 2021

N-Menge aus Recyclingdüngern: 316 kg N a⁻¹			
Kultur	N-Bedarf¹ [kg N ha⁻¹]	th. Anbau- Fläche [ha]	Ernte²
Feldsalat	85	3,72	I-XII
Kopfsalat	150	2,11	IV-XI
Blumenkohl	300	1,05	V-XI
Brokkoli	310	1,02	V-X
Sommerspinat	190	1,66	V-IX
Erdbeeren	60	5,27	IV-X
Kürbis	140	2,26	VII-XI
Zucchini	250	1,26	VII-X
Paprika	250	1,26	VII-X
Tomaten	225	1,40	VII-X
Gurke	210	1,50	VII-X
Rosenkohl	310	1,02	IX-II
Winterspinat	100	3,16	IX-XII
Grünkohl	200	1,58	X-II

Der bodenbürtige Anbau von Feldgemüse wäre auf den 2,5 ha SoLaWi denkbar. Würde man beispielsweise in einem Jahr jeweils auf 0,5 ha der SoLaWi Feldsalat, Blumenkohl, Erdbeeren, Tomaten und Grünkohl anpflanzen, benötigte man insgesamt 435 kg N für die gesamte Fläche, diese könnten zu 73 % durch Recyclingdünger gedeckt werden. Dieses Beispiel dient jedoch lediglich der Veranschaulichung und lässt praktische Überlegungen wie beispielsweise Fruchtfolgen, die Wünsche der GenossenschaftlerInnen, Schädlings-Anfälligkeiten der Kulturen und die Verfügbarkeit von Erntemaschinen außer Acht. Wie bereits zuvor erwähnt werden andere N-Quellen wie der N_{min}-Gehalt des Bodens oder Gründüngung dabei ebenfalls nicht berücksichtigt.

Hochbeete könnten im evh auf der Allmendefläche angelegt werden. Um beim Anbau in Hochbeeten die geringere Fläche bestmöglich auszunutzen ist es üblich Mischkulturen anzulegen, das bedeutet verschiedene Kulturen reihenweise nebeneinander in einem Beet zu pflanzen. Diese Vorgehensweise bietet Vorteile wie mehrfache Ernten, vielfältigere Kulturen, biologische Schädlingsabwehr, dauerhafte Bodenbedeckung, sowie mehr Ernte- und Wurzelrückstände im Substrat. Die Düngung kann hier also nicht am speziellen N-Bedarf der Kulturen ausgemacht werden, stattdessen greift man auf Richtwerte zurück [Kalaus-Zimmermann 1986]. Nach Kalaus-Zimmermann (1986) liegt dieser Richtwert für N bei 150 - 250 g N kg⁻¹ Substrat. Mit den im evh gewonnenen Düngemitteln könnte man also bei einem 60 cm hohen Beet mindestens eine Fläche⁴ von ca. 1400 - 2300 m² mit Beeten bestücken, das entspricht einer Nutzung der Allmendefläche von 23 - 39 %.

Da Aurin sämtliche ausgeschiedene Mikronährstoffe enthält [Etter, Gounden u. a. 2015; Etter und Udert 2016], eignet es sich für die Verwendung als Nährlösung für Verfahren mit inerten oder ohne Kulturmedien. Eine Abschätzung wie viele Pflanzen man mit der vorhandenen Menge NUF genau düngen könnte ist an dieser Stelle schwierig, da die

⁴Bei einer angenommenen mittleren Trockenrohdichte von 1,5 g cm³

Nährstoffaufnahme aus der Nährlösung von diversen Umweltfaktoren abhängig ist. Hinzu kommt die Tatsache, dass auch die Wahl des Nährmediums einen starken Einfluss auf die Aufnahme hat [Gruda 2021]. Denkbar wäre also für des evh ein Experimentiergewächshaus oder vertikaler Garten, um verschiedene erdelose Kulturverfahren zu testen.

Tabelle 4.3 zeigt den N-Bedarf von verschiedenen Schnittstauden im Freiland-Zierpflanzenbau.

Tabelle 4.3: N-Bedarf verschiedener Zierpflanzen mit theoretischer maximalen Anbauflächen bei kompletter N-Versorgung durch Recyclingdünger. Quellen: 1.) Wartenberg 2008, 2.) Bucher 2011

N-Menge aus Recyclingdüngern: 316 kg N a ⁻¹		
Kultur	N-Bedarf [kg N ha ⁻¹]	th. Anbau- Fläche [ha]
Schnittstauden ¹	90	3,51
Schnittstauden ¹	130	2,43
Schnittstauden ¹	180	1,76
Beetstauden ² , gemischt	110	2,87
Steingarten- und Waldstauden ²	40	7,90
trockenheitsverträgliche Stauden ²	60	5,27
Schattenstauden ²	25	12,64

Wartenberg (2008) teilt Schnittstauden generell in drei Bedarfsstufen ein: gering (90 kg N ha⁻¹), mittel (130 kg N ha⁻¹) und hoch (180 kg N ha⁻¹), diese Werte gelten jedoch für kommerziellen Anbau. Blumen mit einem hohen N-Bedarf könnte man demnach auf einer Fläche von ca. 1,76 ha anbauen, das entspricht 50 % der unversiegelten Fläche im gesamten Quartier. In der Praxis werden mehrjährige Stauden jedoch aus optischen Gründen in Mischkultur angepflanzt, daher ist eine Düngung je nach speziellem Bedarf der einzelnen Staude nicht durchführbar, außerdem ist die Bodennutzung zur Begrünung weniger intensiv, da die Stauden mehrere Jahre lang auf den Flächen stehen bleiben. Bucher (2011) beschreibt eine N-Bedarf von gemischt gepflanzten Beetstauden von 110 kg ha⁻¹, mit dieser Bedarf könnte man 82 % der Freifläche des evh nur mit Blumen bestücken. Zierpflanzen mit Anpassungen an speziellen klimatischen Bedingungen, wie zum Beispiel trockenheitsresistente oder Schattenpflanzen, haben einen deutlich niedrigeren Bedarf, diese könnte man auf einer vielfachen Fläche als der des evh anpflanzen [Bucher 2011].

Nach Wartenberg ist der N-Bedarf in Topfkulturen je Pflanze deutlich geringer als im Freiland, da hier keine Auswaschung in den Unterboden stattfindet. So benötigen beispielsweise Sonnenblumen, *Helianthus*, im Freiland 180 kg N ha⁻¹ und als Topfkultur lediglich 400 mg N je Pflanze, die im Gefäßversuch verwendete Studentenblume, *Tagetes erecta*, benötigt 280 mg N je Pflanze und im Freiland 100 kg N ha⁻¹ [Wartenberg 2008]. Hier könnten also auch sehr viel mehr Pflanzen in diversen Gefäßen das Quartier begrünen als notwendig.

Bei der Fassadenbegrünung ist eine Einschätzung des Düngemittelverbrauchs schwierig. Bei der Installation des Systems muss sichergestellt werden, dass das ganze Jahr über korrekte Voraussetzungen für das Wachstum herrschen, da die Pflanzen den klimatischen Bedingungen schutzloser ausgesetzt sind als bei Pflanzung am Boden. Die Bewässerung wird bei systemgebundenem Bewuchs mit automatischen Systemen in Form von Tröpfchenbewässerung gewährleistet, die Düngung ist im Optimalfall in der Bewässerung integriert. Um Nährstoffauswaschungen zu verhindern sollte die Düngung über die Nährlösung auf ein Mindestmaß des errechneten Bedarfs reduziert werden [kuras 2017; Perini u. a. 2011], daher ist auch hier davon auszugehen, dass die Gesamtdüngermenge für die Fassadenbegrünung relativ gering wäre.

Anhand dieser Beispiele ist erkennbar, dass die in den TTT des Modellhauses gesammelten und zu Recyclingdüngern aufbereiteten Fäkalien deutlich mehr Nährstoffe liefern als für die reine Quartiersbegrünung verwendet werden können. Um die gesamte Menge an NUF und H.I.T. vor Ort zu verwenden muss eine Kombination verschiedener bodenunabhängiger Anbaumethoden verwendet werden. Die einfachste Möglichkeit ist der Anbau von Gemüse in Hochbeeten, doch auch experimentellere Verfahren, wie kulturlose Medien, Vertikalgärten oder lebende Wände bieten sich für das Gelände des evh an. Voraussetzung für den Anbau essbaren Gemüses muss jedoch eine engmaschige Kontrolle der fertigen Recyclingdünger sein, um gesundheitliche Risiken auszuschließen.

5. Diskussion

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse des Gefäßversuches und der MFA im Hinblick auf eine konkrete Anwendung im evh diskutiert. Fokus ist dabei die Skalierbarkeit der Methoden auf das Quartier.

5.1 Düngerherstellung im evh

Bei der Herstellung des H.I.T. für den durchgeführten Pflanzenversuch wurden Inhalte von Trockentoiletten kompostiert, aus denen der Urin drainiert wurde. Es fand also eine Vermischung von Urin und Fäzes bei der Sammlung statt. Im evh sollen im Gegensatz dazu Trockentrenntoiletten zur Anwendung kommen, wo eine komplette Trennung von Flüssig- und Feststoffen an der Quelle erfolgt. Der N-Gehalt im Urin ist zwar deutlich höher als in Fäzes (siehe Kap. 2.1.1), jedoch wird laut Jönsson, Stintzing u. a. (2004) der Gehalt im Fertigkompost bei der Kompostierung von ungetrennten Fäkalien dadurch nicht bedeutend erhöht, da in diesem Fall die Einbußen während der aeroben Kompostierung deutlich höher ausfallen. Problematisch kann die Verwendung „nur“ von Fäzes aus TTT jedoch für die Zersetzung des Komposts sein, da Mikroorganismen bei zu hohem C/N-Verhältnis ein langsames Wachstum aufweisen und die thermophile Kompostierung dadurch beeinträchtigt werden kann [Christensen 2011]. Die alleinige Kompostierung von fäzesbasiertem Substrat weist laut Jönsson, Stintzing u. a. (2004) ein zu geringes C/N-Verhältnis auf, um die thermophile Kompostierung zu gewährleisten. Vinnerås (2002) zeigt jedoch, dass die Behandlung von getrennt gesammelter Fäzes mit Stroh vermischt durchaus die erforderlichen Temperaturen erreicht, jedoch später als bei der gemeinsamen Behandlung von Kot und Urin. Eine Lösung dieses Problems stellt zum Einen die Co-Kompostierung von Küchenabfällen dar [Jönsson, Stintzing u. a. 2004] und zum Anderen die Beimischung von Urin zum Kompost, dadurch kann zusätzlich der Flüssigkeitsgehalt des Kompostes im Bedarfsfall erhöht werden. Da die Menge an NUF für die Quartiersbegrünung allein zu hoch ist, bietet es sich an den Urin dafür zu verwenden.

Ein zweiter möglicher systematischer Fehler bei der Herstellung ist der N-Verlust bei der Destillation unverdünnten Urins. Alle für die Literaturrecherche verwendeten Quellen stimmen darüber überein, dass dieser bei korrekter Prozessdurchführung ca. 1 % beträgt [Etter, Gounden u. a. 2015; Maurer u. a. 2006, Udert, Buckley u. a. 2015]. Allerdings ist der Urin stets leicht, bzw. „praktisch nicht verdünnt mit Spülwasser“ (Udert, Buckley u. a. 2015, S. 454), genaue Angaben zum Verdünnungsgrad existieren jedoch nicht. Etter, Gounden u. a. (2015) nennen eine Konzentration im Destillat von ca. 30 - 60 mg N kg⁻¹. Nach den für die MFA angenommenen Daten¹ beträgt das Volumen des Destillats innerhalb der Systemgrenzen ca. 44.781 L a⁻¹, bei 3,36 kg N a⁻¹ ergibt das eine Konzentration von 75 mg N L⁻¹. Selbst ohne die Fehler zu berechnen liegt dieser Wert bereits 25 % über dem von Etter, Gounden u. a. (2015). Dieser Unterschied lässt sich mit der nicht vorhandenen Verdünnung des Urins bei der Nutzung wasserloser Trenntoiletten erklären. Wie genau sich dieser Fakt auf die N Konzentration im Destillat auswirkt wird sich in der Praxis zeigen. Dennoch ist die N-Menge im Destillat niedrig genug, für eine Verwendung zur Bewässerung.

Der nächste Punkt betrifft die Datenerhebung der Inputströme und Transferkoeffizienten. Wie aus Tab. A.3 hervorgeht war die Anzahl der Quellen für die einzelnen Werte sehr un-

¹1,4 L Urin p⁻¹ d⁻¹, Urin-Fehleinleitung 10%, (Quellen siehe Tab. A.3), Wasserreduktion 97 % [Etter, Gounden u. a. 2015]

terschiedlich, während bei den Strömen F1 und U1 mit jeweils sechs verschiedenen Quellen quantitativ eine gute Datenlage herrschte, war diese bei anderen Strömen eher schlecht. So sind besonders die Nährstoffgehalte der Hilfsstoffe für die Kompostierung (Strohmehl, Grünschnitt, Kohle) je nach Ausgangsmaterial sehr unterschiedlich, was sich auch in den großen Standardabweichungen bei den Fehlerberechnungen der Importflüsse ausdrückt. Besonders schwierig stellte sich die Recherche hinsichtlich der N-Gehalte bei Kohle heraus, so gab es zwar in der Warendeclaration des von Finizio verwendeten Produktes eine Angabe zum konkreten P-Gehalt, jedoch nicht zu N. Bei der Datensammlung stellte sich heraus, dass die Nährstoffe in Pflanzenkohle sich je nach Pyrolyse- und Pyrolyse-temperatur und Ausgangsmaterialien sehr stark voneinander unterschieden. Bei N wurde hier auf Werte von Kohlen aus verschiedenen Hölzern zurückgegriffen und bei P lediglich der Gehalt aus dem Datenblatt verwendet, da die Annahme besteht dass die Produktdeklaration des Herstellers zutreffend ist. Dennoch wurde ein relativ hoher Fehler (Δx) angenommen, die Berechnung des P-Gehaltes anhand von Literaturwerten, wie bei N, hätte eine RU von mehr als 100 % ergeben.

Auch beim Tonmehl sind nur die Konzentrationen des Produktdatenblattes in die MFA eingeflossen. Zusätzlich kommt zum Tragen, dass die Mengenangaben der Hilfsstoffe, die bei der Kompostierung zugegeben werden, in der Praxis grob abgeschätzt werden, sie werden volumetrisch im HyCo hinzugefügt und richten sich nach dem Volumen der TTT Inhalte. Die in der MFA verwendeten Mengenangaben stellen Idealverhältnisse dar.

Bei den RU in Tab. A.3 ist zu sehen, dass die meisten Importströme eine geringe Unsicherheit aufweisen und die meisten Transferkoeffizienten eine mittlere. Hohe Unsicherheit besitzen lediglich der N-Gehalt der Kohle und der gasförmige N-Verlust bei der Destillation des stabilisierten Urins.

Diese Werte tragen jedoch prozentual nur in geringem Maße zur Nährstofffracht der Produkte bei, die Hauptquellen von N und P sind die Fäkalien, daher fallen die Schwankungen, die durch die genannten Unsicherheiten entstehen bei der endgültigen Nährstoffkonzentration nicht sehr stark ins Gewicht. Lediglich der gasförmige N-Verlust während der Kompostierung kann beim Endprodukt relevante Unterschiede im Nährstoffgehalt hervorrufen. Die Prozessstabilität hängt hier stark von den äußeren Bedingungen und dem C/N-Verhältnis ab.

Ein anderer Punkt, der bei der Evaluation der Literaturrecherche erwähnt werden muss ist die Mehrfachnennung bei der Berechnung der Import-Ströme von Kot und Urin. Einige der für die MFA verwendeten Quellen waren Sekundärquellen oder ebenfalls Literaturrecherchen, hier wurde nicht konsequent darauf geachtet dass diese keine Literatur mit den gleichen Primärquellen wie für die hier durchgeführte Modellierung genutzt wurden. Dadurch verringert sich der Fehler bei den Input-Strömen, der Mittelwert sollte jedoch nicht verfälscht sein.

In Kapitel 4.2.2 werden die Wiederfindungsraten der Nährstoffe bei den einzelnen Aufbereitungsmethoden genannt. Abbildung 5.1 zeigt diese bei der Aufbereitung von Urin mittels Nitrifizierung und Destillation. Die in dieser Arbeit ermittelten Werte werden hier denen von Maurer u. a. (2006) und Etter, Gounden u. a. (2015) gegenübergestellt.

Die Daten sowohl von N, als auch von P, die in dieser Arbeit ermittelt wurden, spiegeln sehr gut die Literaturwerte wider. Etter, Gounden u. a. 2015 geben jedoch lediglich die Wiederfindungsrate der Nährstoffe an, die in den Prozess einfließen. Sie gehen davon aus, dass ca. 30 % des gesamten P aus dem Urin bereits bei der Sammlung im Trennsystem als Struvit und Hydroxylapatit ausfallen.

Die Wiederfindungsraten bei der Kompostierung sind ebenfalls in Abb. 5.1 aufgeführt, zum Vergleich wurden hier Daten von Meininger (2010) und Eghball u. a. (1997) verwendet. Obwohl Eghball u. a. (1997) in ihrem Versuch Rindermist kompostierten, sind die Raten auch hier sehr ähnlich. Die der hier ermittelten Werte sind nur bedingt mit denen der

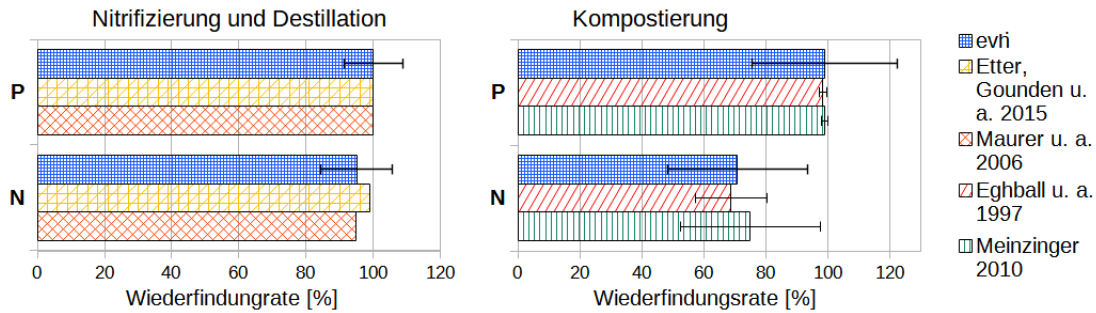


Abbildung 5.1: Wiederfindungsraten von N und P bei der Behandlung von Fäkalien im Vergleich verschiedener Literaturdaten

Literaturdaten vergleichbar, da sie auf unterschiedlicher Basis berechnet wurden: der Fehlerbalken der evh-Werte beruhen auf der Fehlerfortpflanzung von den Importströmen der MFA, während in der Vergleichsliteratur prozessbedingte Schwankungen der Nährstoffe dargestellt sind.

Das ist besonders bei P in der Kompostierung erkennbar, hier existieren nur geringfügige Verluste durch Auswaschung, trotzdem besitzt die Wiederfindungsrate des evh mit $98,9 \pm 23,5$ % einen relativ großen Fehler, da sich die Schwankungen der Importflüsse aufgrund der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung hier rechnerisch bemerkbar machen. Bei der Wiederfindung der untersuchten Nährstoffe bei der Nitrifizierung und Destillation existieren keine Fehlerangaben in den Literaturwerten.

Generell machen so große Fehlerbalken bei sehr hohen Wiederfindungsraten wenig Sinn, da sie höhere Werte als 100 % annehmen, deswegen wurden in Kapitel 4.2.2 die Raten ohne Abweichungen angegeben.

Die Berechnung der Exportströme erfolgte in der MFA lediglich auf Substanzebene von N und P, daher ist es nicht möglich die Daten mit Angaben zu Konzentrationen dieser Nährstoffe von ähnlichen Komposten und Flüssigdüngern zu vergleichen. Ein Anhaltspunkt zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse ist jedoch das Verhältnis von N/P (siehe Tab. 5.1). Da bei der Kompostierung nur geringfügige P-Verluste entstehen ist davon auszugehen, dass der prägnanteste Unterschied im N-Gehalt liegt.

In der für diese Arbeit durchgeführten MFA wurde ein N/P-Verhältnis von 2,9 berechnet. Dieser Wert stimmt in etwa mit dem für den Gefäßversuch gemessenem (2,6) überein, die Modellierung ergab geringfügig mehr N. Das Verhältnis bei Schröder u. a. (2021) liegt um 69 % höher als bei der MFA, das lässt darauf schließen, dass bei der Kompostierung weniger N ausgaste, der Wendeturnus wird in der Arbeit jedoch nicht erwähnt. Zusätzlich kommt zum Tragen, dass bei der Kompostierung komplett andere Hilfsstoffe beigemischt wurden (neben Toilettenpapier nur Holzspäne) [Schröder u. a. 2021], das führt zu einer gänzlich anderen Abbaudynamik im Kompost, obwohl die Fäkalien auf eine ähnliche Weise gesammelt wurden wie bei dem für den Gefäßversuch verwendeten H.I.T.

Die Unterschiede bei der gemeinsamen Kompostierung von Fäkalien und der nur von Fäzes sind nach DWA (2015) deutlich in der Nährstoffkomposition erkennbar: wenn Urin mit kompostiert wird ist der N-Gehalt merkbar höher, als wenn lediglich Fäzes kompostiert werden, diese Aussage widerspricht der von Jönsson, Stintzing u. a. (2004) dass keine gravierenden Unterschiede bestünden. Da hier keine genauen Angaben zum Kompostierungsvorgang gemacht werden ist ein Vergleich mit den Daten der MFA schwierig, jedoch widersprechen die Werte der Aussage es gäbe signifikante Unterschiede im Kompost von gemeinsam oder getrennt erfassten Fäkalien. Bei dem Versuch von Sangare u. a. (2014) wurden lediglich Fäzes kompostiert, das schlägt sich auch im N/P-Verhältnis von 1,8 nieder, hier ist im Vergleich zur Modellierung deutlich weniger N im Kompost vorhanden.

Tabelle 5.1: Konzentrationen der Gesamt-N (N_{tot}) und -P Menge (P_{tot}), sowie des N/P-Verhältnis fäkalienbasierter Komposte und des NUF Aurin im Vergleich verschiedener Literaturdaten, sowie die Abweichung der im Modell ermittelten Daten ($\pm$ MFA)

Kompost					
Quelle	N_{tot}	P_{tot}		N/P	$\pm$MFA
Modellierung MFA	78,8	27,3	kg a ⁻¹	2,9	
Messung H.I.T.	1,52	0,58	%	2,6	-9 %
Schröder u. a. 2021	19,4	4,0	g kg ⁻¹	4,9	69 %
DWA 2015 (Fäzes)	6,8	2,5	g L ⁻¹	2,7	-6 %
DWA 2015 (Fäkalien)	17,9	3,8	g L ⁻¹	4,7	63 %
Sangare u. a. 2014	54,7	29,8	g kg ⁻¹	1,8	-37 %

Aurin					
Quelle	N_{tot}	P_{tot}		N/P	$\pm$MFA
Modellierung MFA	319,6	32,5	kg a ⁻¹	9,8	
Messung Aurin	53,5	3,5	g L ⁻¹	15,3	55 %
Aurin (Etikett)	4,2	0,17	%	24,1	144 %
Etter, Gounden u. a. 2015	50	2,1	g L ⁻¹	23,8	142 %
Etter und Udert 2016	4,2	0,2	%	21,0	113 %
Halbert-Howard u. a. 2021	63,1	3,1	g L ⁻¹	20,4	107 %

Eine Einschätzung anhand des N/P-Verhältnisses ist ohne Wissen des genauen Vorgehens bei der Kompostierung schwierig. Die Modellierung zeigt jedoch ähnliche Verhältnisse bei dem für den Gefäßversuch verwendeten H.I.T., auf dessen Herstellungsprozess die MFA beruht.

Tab. 5.1 zeigt ebenfalls die Modellwerte bei der NUF-Herstellung im Vergleich zu Literaturdaten. Deutlich sichtbar ist hier das viel geringere N/P-Verhältnis bei den MFA-Produkten. Das liegt an der Annahme, dass kein P in den Leitungen ausfällt. Doch selbst die Messwerte des vermarkteten Produktes stimmen nicht mit denen der Warendeklaration überein. Wie genau die Annahmen zum P-Ausfällung im gelagerten Urin und den Sammelleitungen in den jeweiligen Quellen sind ist unklar. Die Annahme in der MFA, dass das gesamte P auf dem Urin wiedergewonnen wird ist nach diesem Vergleich unwahrscheinlich, da sämtliche Quellen und auch die Messungen niedrige P-Gehalte zeigen. Die realen Werte von P werden also wahrscheinlich niedriger liegen.

Die Modellierung der Kompostierung von Fäzes aus dem Modellhaus des evh stimmen zwar mit den Wiederfindungsraten vergleichbarer Komposte überein, jedoch hängt die genaue Nährstoffzusammensetzung stark von den Ausgangsmaterialien und den Bedingungen während der Kompostierung ab. Anhand der N/P-Verhältnisse vergleichbarer Komposte ist abzuleiten, dass der N-Verlust bei der Modellierung des Kompostes niedriger ausfällt als unter Realbedingungen. Der im evh hergestellte Kompost wird demnach wahrscheinlich niedrigere N-Werte aufweisen.

Der NUF hingegen wird niedrigere P-Konzentrationen haben, als in der MFA berechnet wurden.

5.2 Skalierbarkeit des Gefäßversuches auf die Quartiersbe- grünung im evh

Der Gefäßversuch mit *Tagetes erecta* zeigte, dass NUF gleichwertige Erträge bringt wie konventionell gedüngte Zierpflanzen. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Fachliteratur, so ermittelte Etter, Gounden u. a. (2015) eine gleichwertige N-Aufnahme aus Aurin wie aus

synthetischen Düngern durch Weidelgras im Gewächshaus. Auch DWA (2015), Jönsson und Vinnerås (2013) und Jönsson, Stintzing u. a. (2004) bestätigen die Gleichwertigkeit von Urin im Vergleich zu konventionellen Düngern, wobei die Düngewirkung von NUF laut Martin u. a. (2020) höher ist als die von unbehandeltem Urin.

Im durchgeführten Versuch wurde ermittelt, dass die Recyclingdüngervarianten A₇₅, A₁₀₀, C₇₅ und C₁₀₀ statistisch gleichwertige Ergebnisse erzielt haben. Da bei der Nutzung von TTT neben NUF auch H.I.T. anfällt und um die negative Effekte auf die Umwelt (z.B. durch Ausgasung oder Auswaschung) zu minimieren wird empfohlen bei der Düngung ein Verhältnis von NUF zu H.I.T. von 3:1 zu verwenden. Sangare u. a. (2014) kam in einem ähnlichen Düngerversuch zu dem gleichen Ergebnis. Hier wurden in den gleichen Verhältnissen hygienisierter Urin und Fäzeskompost aus einer Kompost-TTT Okra-Pflanzen in einem Gefäßversuch angebaut. Basis der Düngemittelgabe war ebenfalls der spezifische N-Bedarf der Kultur. Die besten Ergebnisse hinsichtlich des Höhenwachstums und der Biomasse wurden auch hier bei einem Verhältnis von Urin zu Kompost bei 3:1 erzielt. Die Urin-Fäkalkompost-Varianten zeigten bessere Ergebnisse als die konventionell gegängte Kontrolle, wobei statistisch signifikant kein Unterschied bestand [Sangare u. a. 2014].

Ein weiterer Grund für die Empfehlung der Verwendung von Urin-Kompost-Gemisch für die Düngung ist die bodenverbessernde Wirkung von Kompost [Jönsson, Stintzing u. a. 2004; Onwosi u. a. 2017]. Beim Gefäßversuch mit *Tagetes erecta* schnitt die Variante F₁₀₀ im Vergleich zu den restlichen Dünger-Behandlungen bei sämtlichen Wuchs-Parametern am schlechtesten ab. Das kann daran gelegen haben, dass die Annahme für die N-Verfügbarkeit und -Mineralisierung möglicherweise zu niedrig war. Es wurde aufgrund von Erfahrungswerten bei vorherigen Versuchen mit Fäzes-basiertem Kompost von einer N-Mineralisierungsrate wie bei Schweinemist ausgegangen, diese beträgt nach Sradnick und Feller (2020) in der ersten Vegetationsperiode 25 % des gesamten im Mist gebundenen N (N_{tot}), bei einem N_{min} -Gehalt von ca. 14 % am N_{tot} . Der N_{min} -Gehalt des H.I.T. wurde zwar nicht durch das externe Labor ermittelt, jedoch fand eine Beurteilung der Probe zur sachgerechten Anwendung als Dünger statt, in dieser wurde ein Anteil von N_{min} an N_{tot} von 0,18 % angegeben. Die angenommenen Daten spiegeln also nicht ausreichend die Eigenschaften des verwendeten Kompostes wider, daher besteht die Möglichkeit dass eine niedrigere Mineralisierung während des Versuches stattfand. Um diesen Faktor jedoch ausreichend beurteilen zu können sind weitere Versuche zur N-Mineralisierung von H.I.T. nach der Kompostierung von Finizio notwendig.

Generell ist jedoch das Vorgehen H.I.T. als alleinigen N-Lieferanten zu betrachten aufgrund des geringen Nährstoffgehalts nicht anzuraten. Nach Jönsson, Stintzing u. a. (2004) sollte die Kompost-Gabe die örtlichen Empfehlungen zur Anwendung von P-Düngern nicht überschreiten, wobei diese Mengen-Beschränkung die positiven Auswirkungen auf die Bodengesundheit (Erhöhung von C-Gehalt, Pufferkapazität, Boden-pH) mindern kann. Nach Sradnick, Feller und Fink (2017) besitzen Komposte je nach Ausgangsstoff gesamt P-Gehalte von ca. 0,2 bis 0,9 % FM. Der für diese Arbeit eingesetzte Kompost liegt mit 0,6 % P FM genau in diesem Bereich. Der sofort verfügbare N im H.I.T. reicht also als alleiniger Nährstofflieferant nicht aus. Jedoch mineralisiert er über mehrere Vegetationsperioden, wodurch er sich bei der Pflanzung mehrjähriger Zierpflanzen zur Quartiersbegrünung als Depotdünger eignet.

Ein weiterer Punkt der die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Gefäßversuches einschränkt ist die Anzahl der Düngemittelgaben. Bei der Durchführung wurde die gesamte Düngermenge 14 Tage nach dem Pikieren verabreicht, die *Tagetes* befanden sich zu diesem Zeitpunkt im Stadium 12 bis 14 nach der BBCH-Skala [Meier 2001]. Jönsson, Stintzing u. a. (2004) zeigen, dass sich die mehrfache Gabe von Urin im Ertrag von Lauch statistisch nicht signifikant gegenüber einer einmaligen Gabe der selben Düngermenge unterschei-

det. Jedoch beschreiben Sangare u. a. (2014) in ihrem Versuch Salzstress bei höheren Düngerdosierungen. Während des Versuches bestand die Vermutung, dass besonders die organische Kontrolle K_{org} überdüngt wurde, da sie bereits kurz nach der Düngung rote verfärbte Keimblätter und Blattränder aufwies und auch im weiteren Verlauf des Versuches trotz 100 %iger N-Versorgung im Wachstum hinter der mineralischen Kontrolle zurückblieb. Jedoch zeigten auch alle anderen Varianten, inklusive der Nullvariante K_0 , ähnliche Verfärbungen, daher konnten akute Salzschäden durch Überdüngung ausgeschlossen werden.



Abbildung 5.2: Verfärbungen der Keim- und Laubblätter in der 3. Woche nach dem Pikieren. Links K_{org} , rechts K_0

Blattverfärbungen können durch abiotische Faktoren hervorgerufene Stresssymptome sein, diese umfassen zum Beispiel mechanische Belastungen, Salzbelastung, Wassermangel, Hitze, Kälte, Frost und UV-Strahlung [Schopfer u. a. 2010]. Laut wetterkontor.de (2021) lag die Maximaltemperatur im Mai 2021 in Potsdam bei 30,7 °C, diese hohen Temperaturen können Hitzestress ausgelöst haben, zusätzlich schien Ende Mai die Sonne verhältnismäßig lange (am 30.5. gab es 14,6 Sonnenstunden und am 31.5.2021 15,8 Sonnenstunden, siehe Abbildung A.2), auch diese Faktoren können in Kombination mit Salzbelastung durch die einmalige Düngemittelgabe zu Stresssymptomen bei den Keimlingen geführt haben. Im späteren Verlauf des Versuches waren diese Stresssymptome weniger prominent bei den Pflanzen sichtbar, sie schienen das generelle Wachstum außer bei Variante K_{org} , nicht nachhaltig negativ beeinflusst zu haben. Wahrscheinlich waren die Annahmen für die N-Mineralisierung der Vinsasse über den gesamten Versuchszeitraum hingegen zu gering. Die Pflanzen der Variante K_{org} wiesen bei der Ernte hinsichtlich der Pflanzengröße und der Blütenzahl sehr starke Abweichungen vom Mittelwert auf, die Anzahl der Zweige war für eine optimal gedüngte Kontrollvariante zusätzlich sehr gering. Konstanter Salzstress aufgrund einer höheren Mineralisierungsrate als für den Gefäßversuch angenommen kann eine Erklärung dafür sein.

Generell wird bei der Pflege von Parks und Quartieren auf mineralische Kurzzeitdüngung jedoch verzichtet. Ziel ist es hier natürliche Kreisläufe zu schaffen, um hohe Kosten durch intensive und häufige Pflegemaßnahmen zu vermeiden. Wenn Dünger verwendet werden, dann kommen langsam mineralisierende organische Dünger zum Einsatz. Jedoch wird generell darauf geachtet, dass Grünschnitt wieder in den Boden eingearbeitet oder ortsnahe Kompostiert wird und so die Nährstoffe vor Ort verfügbar gemacht werden [BUND o.J.]. Die Ergebnisse des Gefäßversuches sind also bedingt auf reale Anbaubedingungen skalierbar. Ziel war es zu zeigen welche Verhältnisse von NUF und H.I.T. zum besten Pflanzenwachstum führen, der Versuch zeigte, dass dies bei einem NUF-H.I.T.-Verhältnis von 3:1 erzielt wird. Unter Anbaubedingungen im Freiland sollte eine größere Menge H.I.T.

appliziert werden, um die bodenverbessernden Eigenschaften des Kompostes nutzbar zu machen, NUF sollte in mehreren Gaben nach dem N-Bedarf der Kulturen gedüngt werden. Generell hat der Gefäßversuch jedoch gezeigt, dass fäkalienbasierte Recyclingdünger gleichwertige Erträge wie konventionelle mineralische oder organische Dünger erbringen. Für die Quartiersbegrünung in der Praxis sind jedoch mineralische Dünger unpraktikabel.

6. Schlussfolgerung

Ziel dieser Arbeit war es das Recyclingpotential von menschlichen Fäkalien für die Quartiersbegrünung des evh zu bewerten und demonstrieren.

Der durchgeführte Gefäßversuch zeigte, dass H.I.T. und NUF die gleiche Düngewirkung erbringen wie konventionelle mineralische Düngemittel. Lediglich der Vergleich mit dem eingesetzten organischen Düngemittel konnte nicht abschließend geklärt werden, da die Pflanzen der Variante K_{org} kein optimales Wachstum zeigten. Der Vergleich mit ähnlichen Versuchen erwies ein mögliches Auftreten von Salzstress bei NUF gedüngten Pflanzen, wie sich das auf Pflanzen mit geringer Salztoleranz auswirkt muss in weiteren Versuchen getestet werden.

Die modellierten Verfahren zur Aufbereitung der Fäkalien zeigten hohe Wiederfindungsraten der untersuchten Nährstoffe, daher besitzen sie ein großes Potential für die Schließung lokaler Stoffkreisläufe. Lediglich die ermittelte Menge an N im H.I.T. ist mit einer größeren Unsicherheit verbunden, da der N-Verlust stark von den Bedingungen bei der Kompostierung abhängt. Voraussetzung für eine erfolgreiche Wiedergewinnung der Nährstoffe muss jedoch stets die fachgerechte Nutzung der TTT und eine hygienisch sichere Handhabung der Toiletteninhalte sein.

Das modellierte System produziert mehr N und P, als für die Quartiersbegrünung notwendig ist. In der Praxis ist die Verwendung schnell wirksamer Düngemittel für die Quartiersbegrünung unüblich, da pflegerische Einsätze aus Kostengründen auf ein Minimum reduziert werden sollen. Um eine Akkumulation der Produkte zu vermeiden muss daher entweder eine Ausnahmeregelung für die bodenbürtig Nutzung bei den zuständigen Behörden erwirkt, oder bodenunabhängige Anbaumethoden angewendet werden. Es sollte darauf hingearbeitet werden die hygienische Unbedenklichkeit der Produkte von amtlicher Seite her zu beweisen, damit der Dünger an Interessierte abgegeben werden kann.

Verzeichnis der Gesetze und Normen

AbfKlärV	Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV) vom 27. September 2017
AVV	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV) vom 30. Juni 2020
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 19. Juni 2020
DIN SPEC 91421	Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau vom Dezember 2020
DüMV	Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) vom 05. Dezember 2012
DüngG	Düngegesetz vom 10. August 2021
DüV	Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV) vom 26. Mai 2017
KrWG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012
WHG	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31. August 2015

Verzeichnis verwendeter R-packages

car	John Fox and Sanford Weisberg (2019). An R Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/
data.table	Matt Dowle and Arun Srinivasan (2021). data.table: Extension of ‘data.frame’. R package version 1.14.2. https://CRAN.R-project.org/package=data.table
DescTools	Andri Signorell et mult. al. (2021). DescTools: Tools for descriptive statistics. R package version 0.99.44.
emmeans	Russell V. Lenth (2022). emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.7.2. https://CRAN.R-project.org/package=emmeans
multcomp	Torsten Hothorn, Frank Bretz and Peter Westfall (2008). Simultaneous Inference in General Parametric Models. Biometrical Journal 50(3), 346–363.
psych	Revelle, W. (2021) psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, https://CRAN.R-project.org/package=psych Version = 2.1.9,.
rstatix	Alboukadel Kassambara (2021). rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests. R package version 0.7.0. https://CRAN.R-project.org/package=rstatix
tidyverse	Wickham et al., (2019). Welcome to the tidyverse. Journal of Open Source Software, 4(43), 1686, https://doi.org/10.21105/joss.0168

Literatur

- Abellán, J. (2017). „Water supply and sanitation services in modern Europe: developments in 19th-20th centuries“. In: 12th International Congress of the Spanish Association of Economic History (University of Salamanca).
- ACN (2017). *Nutrient Value of Wheat Straw*. Agronomic Crops Network. URL: <https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/nutrient-value-wheat-straw> (besucht am 10.11.2022).
- Arbestain, C., J. Amonette, B. Singh, T. Wang und H. Schmidt (2015). „A biochar classification system and associated test methods“. In: *Biochar for Environmental Management*. Kap. 8, S. 165–194. ISBN: 978-0-415-70415-1.
- BAG (2019). *Produktregister Chemikalien - Aurin*. Bundesamt für Gesundheit. URL: https://www.gate.bag.admin.ch/rpc/ui/products/636998-04/summary?searchTerm=aurin&sortBy=cpid&sortDirection=asc&lch=1621496269150&searchArea=CPID,PRIMARYNAME,CLASSIFICATION_NUMBER (besucht am 30.09.2022).
- BDEW (2021). *Anschlussgrad der Bevölkerung an die öffentliche Wasserversorgung in Europa 2019 in %*. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. URL: https://www.bdew.de/media/documents/Anschlussgrad_2019_in_Europa_Trinkwasserversorgung_o_online_Ott_07102021.pdf (besucht am 13.10.2022).
- Beacham, A., L. Vickers und J. Monaghan (2019). „Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards“. In: *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 94, S. 1–7. DOI: 10.1080/14620316.2019.1574214.
- Beneker, C., F. Augustin, B. Etter, A. Krause, E. Nolde und J. Gröger (2021). *Wasserkonzept ecovillage Hannover*. Hannover: aquaplaner Ingenieurgesellschaft bR, Zur Bettfedernfabrik 1, 30451 Hannover.
- Berger, W. (2008). *Kompost-Toiletten - Sanitärsysteme ohne Wasser*. 1. Aufl. Freiburg: ökobuch Verlag. ISBN: 978-3-936896-16-9.
- BLfU (2013). *Verfahren der biologischen Abwasserreinigung*. Bayrisches Landesamt für Umwelt. URL: https://www.lfu.bayern.de/wasser/kommunale_klaeranlagen/verfahren_biologische_abwasserbehandlung/doc/verfahren_biologische_abwasserreinigung.pdf (besucht am 11.08.2022).
- Boldrin, A. und T. Christensen (2010). „Seasonal generation and composition of garden waste in Aarhus (Denmark)“. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 30. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.11.031.
- Bornemann, G., M. Lebert, T. Delovski, P. Richter, I. Becker und K. Marsalek (Sep. 2018). „Eu:CROPIS - Euglena gracilis: Combined Regenerative Organic-food Production in Space - A Space Experiment Testing Biological Life Support Systems Under Lunar And Martian Gravity“. In: *Microgravity Science and Technology* 30. URL: <https://doi.org/10.1007/s12217-018-9654-1>.
- Brunner, P. H. und H. Rechberger (2017). *Handbook of Material Flow Analysis : For Environmental, Resource, and Waste Engineers*. Second edition. Boca Raton: CRC Press. ISBN: 9780203507209.
- Bucher, A. (2011). *Leitfaden für die Düngung im Garten – In fünf Schritten zur erfolgreichen Düngung*. Veitshöchheim: Bayrische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau.
- BUND (o.J.). *naturnahe Grünflächenpflege*. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. URL: <https://www.bund-berlin.de/themen/stadtnatur/stadtgruen/oekologische-parkpflege/> (besucht am 12.12.2022).
- CEH (2013). „Our nutrient world. The challenge to produce more food and energy with less pollution“. In: *Global Overview of Nutrient Management*.

- Cencic, O. und H. Rechberger (2008). „Material flow analysis with Software STAN“. In: *Journal of Environmental Engineering and Management* 18, S. 3–7.
- Chan, K.Y. und Z. Xu (2009). „Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement“. In: *Biochar for environmental management: science and technology*. 1. Aufl. London: Sterling. ISBN: 978-1-84407-658-1.
- Christensen, T. (2011). *Solid waste technology and management*. Chichester, U.K: Wiley. ISBN: 9780470666968.
- cityfoerster (2022). *ecovillage - im Kreislauf entworfen*. CITYFÖRSTER architecture + urbanism, Escherstr. 22, D 30159 Hannover. URL: https://www.cityfoerster.net/projekte/ecovillage_im_kreislauf_entworfen-374-1.html (besucht am 17.07.2022).
- Cordell, D., J. Drangert und S. White (2009). „The Story of Phosphorus: Global Food Security and Food for Thought“. In: *Global Environmental Change* 19, S. 292–305. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
- destatis (2022). *Wasserwirtschaft: Klärschlammentsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung*. Statistisches Bundesamt. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klärschlammverwertungsart.html#633398> (besucht am 21.12.2022).
- DVGW (2015). *Arzneimittelrückstände im Wasserkreislauf; eine Bewertung aus Sicht der Trinkwasserversorgung*. Bonn: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. URL: https://www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/qualitaet/dvgw-wasserinfo-nr-54_2015_04.pdf (besucht am 21.12.2022).
- DWA (2008). *Neuartige Sanitärsysteme*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- (2015). *Neuartige Sanitärsysteme : Begriffe, Stoffströme, Behandlung von Schwarz-, Braun-, Gelb-, Grau- und Regenwasser, stoffliche Nutzung*. Kromsdorf: Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- EcoSanRes (2008). *Closing the Loop on Phosphorus*. EcoSanRes Factsheet 4. Stockholm Environment Institute Stockholm.
- Eghball, B., J. Power, J.E. Gilley und J. Doran (1997). „Nutrient, Carbon, and Mass Loss During Composting of Beef Cattle Feedlot Manure“. In: *J Environ Qual* 26. DOI: 10.2134/jeq1997.00472425002600010027x.
- EGoS (o.J.). *Pflanzenkohle aus Waldhackschnitzeln*. EGoS GmbH. URL: <https://www.pflanzenkohle24.de/media/pdf/pflanzenkohle-kompost-garten-kaufen.pdf> (besucht am 10.11.2022).
- Ehmann, A., I. Bach, J. Bilbao, I. Lewandowski und T. Müller (2019). „Phosphates recycled from semi-liquid manure and digestate are suitable alternative fertilizers for ornamentals“. In: *Scientia Horticulturae* 243, S. 440–450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.052>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423818306046>.
- Eman A. A.; Elhawati, N. (2021). „Combined foliar and soil application of silica nanoparticles enhances the growth, flowering period and flower characteristics of marigold (*Tagetes erecta* L.)“. In: *Scientia Horticulturae* 282, S. 110015. ISSN: 0304-4238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423821001229>.
- Etter, B., T. Gounden und K. Udert (Feb. 2015). *VUNA: Valorisation of Urine Nutrients – Final Project Report*. URL: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/doc/VUNA_Final_Report_2015.pdf.
- Etter, B. und K. Udert (März 2016). *VUNA Handbook on Urine Treatment*. DOI: 10.13140/RG.2.2.29444.53122. URL: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/doc/VUNA_Handbook_Urine_Treatment.pdf.

- evh (2019). *Charta für die Genossenschaft ecovillage hannover*. ecovillage hannover eG. URL: <https://cloud.my-evh.de/s/4FDf3JfEFRLsaS9> (besucht am 13.07.2022).
- (2021). *ecovillage-Geschichte(n)*. ecovillage hannover eG. URL: [https://cloud.my-evh.de/s/AGy7rfND7THfnPm?dir=undefined&path=%2Fecovillage-Geschichte\(n\)&openfile=165860](https://cloud.my-evh.de/s/AGy7rfND7THfnPm?dir=undefined&path=%2Fecovillage-Geschichte(n)&openfile=165860) (besucht am 13.07.2022).
- (2022). *ecovillage hannover eG*. ecovillage hannover eG. URL: <https://www.ecovillage-hannover.de> (besucht am 13.07.2022).
- Feng, D. und Z. Wu (2006). „Culture of *Spirulina platensis* in human urine for biomass production and O₂ evolution“. In: *Journal of Zhejiang University. Science. B* 7, S. 34–7. DOI: 10.1631/jzus.2006.B0034.
- Finizio (2021a). *LABOR- & FELDVERSUCHE*. Finizio GmbH. URL: <https://finizio.de/labor-und-feldversuche/> (besucht am 08.12.2022).
- (2021b). *Pilotanlage - Finizio*. Finizio GmbH. URL: <https://finizio.de/pilotanlage/#toggle-id-2> (besucht am 06.10.2022).
- Friedler, E., D. Butler und Y. Alfiya (Jan. 2013). „Wastewater composition“. In: *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*, S. 241–257.
- Galloway, J. N., J. D. Aber, J. W. Erisman, S. P. Seitzinger, R. W. Howarth, E. B. Cowling und B. J. Cosby (2003). „The Nitrogen Cascade“. In: *BioScience* 53.4, S. 341–356. DOI: 10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2.
- Gruda, N., Hrsg. (2021). *Advances in horticultural soilless culture / edited by Nazim S. Gruda*. Burleigh Dodds series in agricultural science 94. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing Limited. ISBN: 9781786764386.
- Halbert-Howard, A., F. Häfner, S. Karlowsky, D. Schwarz und A. Krause (2021). „Correction to: Evaluating recycling fertilizers for tomato cultivation in hydroponics, and their impact on greenhouse gas emissions“. In: *Environmental Science and Pollution Research* 28. DOI: 10.1007/s11356-021-15054-3.
- Harlow, E. (2019). „Rechtliche Rahmenbedingungen für die Verwendung von Ausgangssubstraten menschlichen Ursprungs in der Düngung: Eine Literaturrecherche und ein Vergleich der Länder Deutschland, Österreich und Schweiz“. Arbeit zur Erlangung des Grades Bachelor of Science. Berlin: Humboldt Universität Berlin.
- Heckman, J.R. und D. Kluchinski (1996). „Chemical Composition of Municipal Leaf Waste and Hand-Collected Urban Leaf Litter“. In: *Journal of Environment Quality* 25. DOI: 10.2134/jeq1996.00472425002500020019x.
- Herold, J. (1995). *Bodenunabhängige Kulturverfahren im Gemüsebau : Produktionstechnik, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit*. Hohenheimer Arbeiten. Stuttgart. ISBN: 3800182386.
- Hildebrandt, U. (0.J.). *Verfahrensbeschreibung der gelenkten Kompostierung nach Lübke*. U.R.S. Landmanagement, United Research for Soil. URL: https://www.bioland.de/fileadmin/user_upload/Erzeuger/Fachinfos/Serviceseite/2010_05_Kompostierung_nach_Luebcke.pdf (besucht am 06.10.2022).
- Horn, J. von, M. Maurer, J. Londong, S. Lautenschläger, H. Steinmetz, T. Hillenbrand und T. Dockhorn (2013). „Welche neuartigen Sanitärsysteme (NASS) sind für Deutschland besonders Erfolg versprechend?“. In: *Korrespondenz Abwasser* 60, S. 673–683. DOI: 10.3242/kae2013.08.002.
- IFA (2021). *Public Summary: World Outlook for Fertilizer Demand, Nitrogen, Phosphates and Potash from 2021 to 2025*. International Fertilizer Association. URL: https://www.fertilizer.org/public/resources/publication_detail.aspx?SEQN=6177&PUBKEY=29353BFE-6AEF-4C6C-8DBC-A360A645F491 (besucht am 17.06.2022).
- Jönsson, H., A. Stintzing, B. Vinneras und E. Salomon (2004). „Guidelines on the use of urine and faeces in crop production“. In: *J Indian Water Works Assoc* 37.

- Jönsson, H. und B. Vinnerås (2013). „Closing the loop: Recycling nutrients to agriculture“. In: *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*, S. 163–178.
- Kalaus-Zimmermann, H. (1986). *Gärtnern am Hochbeet: Anlage, Bepflanzung u. mühelose Pflege*. München.
- Kelova, M., S. Eich-Greatorex und T. Krogstad (2021). „Human excreta as a resource in agriculture -Evaluating the fertilizer potential of different composting and fermentation-derived products“. In: *Resources Conservation and Recycling* 175. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105748.
- Köpping, I., C. McArdell, E. Borowska, M. Böhler und K. Udert (2020). „Removal of pharmaceuticals from nitrified urine by adsorption on granular activated carbon“. In: *Water Research X* 9. DOI: 10.1016/j.wroa.2020.100057.
- Korduan, J. (2020). „Rechtliche Rahmenbedingungen für die Anwendung von Recyclingprodukten aus menschlichen Fäkalien für Gartenbau und Landwirtschaft in Deutschland“. Arbeit zur Erlangung des Grades Master of Science. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Krause, A. und V. Rotter (2017). „Linking energy-sanitation-agriculture: Intersectional resource management in smallholder households in Tanzania“. In: *Science of The Total Environment* 590-591. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.205.
- kuras (2017). *Steckbrief 2: Fassaden- und Wandbegrünung*. kuras - Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme. URL: http://kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumente_Verwaltung/pdf/Steckbrief_02_Fassadenbegrueung.pdf (besucht am 12.12.2022).
- LfL (2022). *Basisdaten für die Umsetzung der Düngeverordnung*. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft. URL: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/basisdaten22_alle_tabellen_jun22.pdf (besucht am 09.12.2022).
- Liebmann, B. (2015). *Mikroplastik in der Umwelt. Vorkommen, Nachweis und Handlungsbedarf*. Umweltbundesamt GmbH. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0550.pdf> (besucht am 19.08.2022).
- Lienert, J. und T. Larsen (2009). „High Acceptance of Urine Source Separation in Seven European Countries: A Review“. In: *Environmental science & technology* 44, S. 556–66. DOI: 10.1021/es9028765.
- Londong, J. (2008). „Zukunftsperspektiven Neuartiger Sanitärsysteme“. In: 2. Aachener Kongress Dezentrale Infrastruktur. Gewässerschutz, Wasser Abwasser 215. Aachen.
- López, M., M. Soliva, X. Martinez-Farre, A. Bonmatí und O. Huerta (2009). „An assessment of the characteristics of yard trimmings and recirculated yard trimmings used in biowaste composting“. In: *Bioresource technology* 101. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.031.
- Martin, T. M. P., F. Esculier, F. Levavasseur und S. Houot (2022). „Human urine-based fertilizers: A review“. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 52.6. DOI: 10.1080/10643389.2020.1838214. URL: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1838214>.
- Maurer, M., W. Pronk und T.A. Larsen (2006). „Treatment processes for source-separated urine“. In: *Water Research* 40.17. ISSN: 0043-1354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.012>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135406004039>.
- Mayer, J. (2021). *Gemüse-Anbauplanung: gute Planung - reiche Ernte für viele Jahre*. München.
- Meier, U. (2001). *BBCH Monografie : Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen*. URL: https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00036305 (besucht am 18.11.2022).

- Meininger, F. (2010). „Ressource efficiency of urban sanitation systems: A comparative assessment using material and energy flow analysis“. doctoral thesis. Hamburg: Technischen Universität Hamburg-Harburg. ISBN: 978-3-942768-00-9.
- Meininger, F. und M. Oldenburg (2009). „Characteristics of source-separated household wastewater flows: A statistical assessment“. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 59, S. 1785–91. DOI: 10.2166/wst.2009.185.
- MRG (o.J.). *Friedländer Blauton Datenblatt*. Blautonwerk Friedland MRG Mineralische Rohstoffmanagement GmbH. URL: https://www.mrg-blautonwerk.de/wp-content/uploads/2017/03/datenblatt_tonmehl.pdf (besucht am 10.11.2022).
- Ökoha (o.J.). *Innovatives Örtchen*. Ökoha e.V. URL: <https://oekoha-rostock.de/oekovilla/kompost-klo/> (besucht am 26.10.2022).
- Onwosi, C. O., V. C. Igbokwe, J. N. Odimba, I. E. Eke, M. O. Nwankwoala, I. N. Iroh und L. I. Ezeogu (2017). „Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects“. In: *Journal of Environmental Management* 190, S. 140–157. ISSN: 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716310349>.
- Parkinson, R., P. Gibbs, S. Burchett und T. Misselbrook (2004). „Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure“. In: *Bioresource Technology* 91.2. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00174-3). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852403001743>.
- PDA (2009). *Cereal straw –nutrient contents*. The Potash Development Association. URL: <https://www.pda.org.uk/wp/wp-content/uploads/2015/11/PDA-news2009-6.pdf> (besucht am 10.11.2022).
- Perini, K., M. Ottele, E.M. Haas und R. Raiteri (2011). „Greening the building envelope, facade greening and living wall systems“. In: *Open journal of ecology* 1.1. ISSN: 2162-1985.
- Rana, S. (2015). „Nitrogen loss characterization of stored human urine“. In: *International Journal of Environmental & Technological Sciences (iJETs)* 1. URL: <https://kalyanishineindia.com/journal/wp-content/uploads/2021/04/Paper-2.pdf> (besucht am 28.10.2022).
- Remy, C. (2010). „Life Cycle Assessment of conventional and source-separation systems for urban wastewater management“. Doctoral Thesis. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F. S. Chapin, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen und J. Foley (2009). „Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity“. In: *Ecology and Society* 14.32. URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>.
- Sangare, D., M. Sou/Dakouré, N. Hijikata, R. Lahmar, H. Yacouba, C. Lacina und N. Funamizu (2014). „Toilet compost and human urine used in agriculture: Fertilizer value assessment and effect on cultivated soil properties“. In: *Environmental technology* 36. DOI: 10.1080/09593330.2014.984774.
- Scholz, R. W. und F.-W. Wellmer (2013). „Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus?“. In: *Global Environmental Change* 23.1, S. 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha>.

- 2012.10.013. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378012001264>.
- Schopfer, P., A. Brennicke und H. Mohr (2010). *Pflanzenphysiologie*. 7. Aufl. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl. ISBN: 9783827423528.
- Schröder, C., F. Häfner, O. Larsen und A. Krause (2021). „Urban Organic Waste for Urban Farming: Growing Lettuce Using Vermicompost and Thermophilic Compost“. In: *Agronomy* 11. DOI: 10.3390/agronomy11061175.
- Souri, M.K., R. Rahmani und M. Ahmadi (2018). „Morphophysiological and nutrient uptake characteristics of marigold (*Tagetes* spp) under different levels of nitrogen fertilization“. In: 2, S. 63–66. DOI: 10.15406/hij.2018.02.00027.
- Sradnick, A. und C. Feller (2020). „A Typological Concept to Predict the Nitrogen Release from Organic Fertilizers in Farming Systems“. In: *Agronomy* 10. DOI: 10.3390/agronomy10091448. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/9/1448>.
- Sradnick, A., C. Feller und M. Fink (2017). *Nährstoffgehalte und N-Mineralisierung organischer Düngemittel*. Großbeeren: Leibnitz-Institut für Gemüse und Zierpflanzenbau Großbeeren.
- Stenzel, F., R. Jung und S. Wiesgickl (2019). *Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen*. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik. URL: [https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/Publikationen/2019/2019-03-29_texte_31-2019_arzneimittelrueckstaende-klaerschlam_v2\(1\).pdf](https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/Publikationen/2019/2019-03-29_texte_31-2019_arzneimittelrueckstaende-klaerschlam_v2(1).pdf) (besucht am 11.08.2022).
- Titova, J. und E. Baltrėnaitė (2021). „Physical and Chemical Properties of Biochar Produced from Sewage Sludge Compost and Plants Biomass, Fertilized with that Compost, Important for Soil Improvement“. In: *Waste and Biomass Valorization* 12. DOI: 10.1007/s12649-020-01272-2.
- UBA (2011). *Stickstoff - Zu viel des Guten? Überlastung des Stickstoffkreislaufs zum Nutzen von Umwelt und Mensch wirksam reduzieren*. Dessau-Roßlau.
- (2017). *Wasserwirtschaft in Deutschland*. Umweltbundesamt. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_wasserwirtschaft_in_deutschland_2017_web_aktualisiert.pdf (besucht am 25.08.2022).
- (2018). *Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. Umweltbundesamt. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschlam_bf_low.pdf (besucht am 05.08.2022).
- Udert, K., C. Buckley, M. Wächter, C. McArdell, T. Kohn, L. Strande, H.r Zöllig, A. Fumasoli, A. Oberson und B. Etter (2015). „Technologies for the treatment of source-separated urine in the eThekweni Municipality“. In: *Water S.A* 41. DOI: 10.4314/wsa.v41i2.06.
- Udert, K., T. Larsen und W. Gujer (Feb. 2006). „Fate of major compounds in source-separated urine“. In: *Water science and technology* 54, S. 413–20. DOI: 10.2166/wst.2006.921.
- Vinnerås, B. (2002). „Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine diversion“. doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Wartenberg, S. (2008). *Düngungsrichtlinie Zierpflanzenbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- wetterkontor.de (2021). *Wetterrückblick Potsdam, Zeitraum: 01.05.2021 bis 31.05.2021*. WetterKontor GmbH. URL: <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/>

rueckblick.asp?id=187&datum0=21.10.2022&datum1=17.11.2022&jr=2021&mo=5&datum=17.11.2022&t=4&part=1#tabelle (besucht am 19.11.2022).

Wolters, B., K. Smalla und J. Kühn (2022). *Erarbeitung anspruchsvoller Standards für die mittelfristige Fortführung der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlämmen aus Abwasserbehandlungsanlagen mit kleiner Ausbaugröße*. Dessau Roßlau: Umweltbundesamt. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uug_03-2022_erarbeitung_anspruchsvoller_standards.pdf (besucht am 19.08.2022).

A. Anhang



Abbildung A.1: Temperaturverlauf und Füllstand des HyCo während der Befüllung mit Inhalten aus Trockentoiletten der Finizo GmbH, Eberswalde.

Tabelle A.1: Laborbefund der Flüssigdünger der Eurofins Agraranalytik GmbH

Probenbezeichnung*:		AURIN	CROP	Vinasse
Produktfamilie:		Wirtschaftsdünger (flüssig)	Wirtschaftsdünger (flüssig)	Wirtschaftsdünger (flüssig)
Parameter	Einheit	Ergebnis	Ergebnis	Ergebnis
Physikochemische Parameter				
Trockensubstanz	Ma.-% OS	27,7	4,45	66,8
Dichte	g/l	1083	999,2	1265
Makronährstoffe Ma.-% OS				
Gesamtstickstoff (N)	Ma.-% OS	4,94	0,71	4,53
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	Ma.-% OS	2,42	0,26	0,18
Nitratstickstoff (NO ₃ -N)	Ma.-% OS	1,992	0,2160	0,2000
Makronährstoffe Ma.-% TS				
Gesamtstickstoff (N)	Ma.-% TS	17,9	15,9	6,79
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	Ma.-% TS	8,75	5,76	0,27
Nitratstickstoff (NO ₃ -N)	Ma.-% TS	7,202	4,852	0,2995

Tabelle A.2: Laborbefund Kompostanalysen der AGROLAB Agrar- und Umwelt GmbH

	Einheit	Wert i.d.OS	Wert i.d.TS	Grenzwert BioAbIV	Bewertung Methode
Chemische Parameter					
Salzgehalt (Wasserauszug 1:5)	gKCl/l	2,90			EN 13038 / DIN EN 13038 : 2012-01
pH-Wert (Suspension mit Wasser)		8,4			DIN EN 13037 : 2012-01
Physikalische Parameter					
Rohdichte (Volumengewicht)	g/l	820			Methodenbuch der BGK : 2006-09
Trockensubstanz	%	42,7			DIN EN 13040 : 2008-01
Wassergehalt	%	57,3			DIN EN 13040 : 2008-01
Bodenverbesserung					
C/N-Verhältnis			15,8		Berechnung aus Messwerten der Einzelparameter
Organische Substanz	%	17,6	41,3		Methodenbuch der BGK : 2013-05
Bas. wirks. Stoffe (CaO)	%	1,94	4,55		Methodenbuch der BGK : 2006-09
Pflanzennährstoffe					
Stickstoff gesamt (N)	%	0,65	1,52		DIN EN 16168 : 2012-11
Phosphat gesamt (P ₂ O ₅)	%	0,564	1,32		DIN EN ISO 11885 : 2009-09
Kalium gesamt (K ₂ O)	%	0,453	1,06		DIN EN ISO 11885 : 2009-09
Magnesium gesamt (MgO)	%	0,76	1,77		DIN EN ISO 11885 : 2009-09
Ammonium (NH ₄ -N)	mg/l	9,81			Methodenbuch der BGK : 2006-09
Bor (B) gesamt	mg/kg	14	32		DIN EN ISO 11885 : 2009-09
Natrium (Na)	mg/kg	1140	2670		DIN EN ISO 11885 : 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	200	480		DIN EN ISO 11885 : 2009-09
Molybdän (Mo)	mg/kg	0,5209	1,22		DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Eisen (Fe) gesamt	mg/kg	9610	22500		DIN EN ISO 11885 : 2009-09
Kobalt (Co)	mg/kg	4,24	9,93		DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Selen (Se)	mg/kg	0,3032	0,71		DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Hygiene					
Aerobe Gesamtkeimzahl (37°C)	^{u)} KBE/g	1600000		500000000	ISO 4833-1 : 2013-09(BB)
Enterokokken (MPN)	^{u)} KBE/g	<3,0		5000	Methodenbuch der BGK, Kapitel IV C : 2006-09(BB)
Fäkalcoliforme Bakterien (E.coli) (MPN)	^{u)} KBE/g	3,6		5000	DIN EN ISO 16649-3 : 2018-01(BB)
Salmonellen	^{u)} in 50 g	nicht nachgewiesen		nn	Methodenbuch der BGK, Kapitel IV C : 2006-09(BB)
Potentielle Schadstoffe					
Thallium (Tl)	mg/kg	0,060	0,14		DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Arsen (As)	mg/kg	2,1	5,0		DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	7,86	18,4	150	DIN EN ISO 17294-2 : 2005-02
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,129	0,303	1,5	DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	16,1	37,8	100	DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Kupfer (Cu)	mg/kg	13,8	32,3	100	DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Nickel (Ni)	mg/kg	16,7	39,0	50	DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,027	0,063	1	DIN EN 1483 : 2007-07
Zink (Zn)	mg/kg	64,9	152	400	DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Perfluorierte Verbindungen (PFC)					
Perfluorooctansäure (PFOA)	^{u)} µg/kg	<5,0	<5,0		DIN 38414-14 : 2011-08(OB)
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	^{u)} µg/kg	<5,0	<5,0		DIN 38414-14 : 2011-08(OB)
Summe PFT	µg/kg	n.b.	n.b.		DIN 38414-14 : 2011-08
Sonstige Untersuchungsparameter					
Ca gesamt	mg/kg	11287	26433		DIN EN ISO 11885 : 2009-09
Naphthalin	mg/kg	0,077	0,18		DIN EN 15527 : 2008-09
Acenaphthylen	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Acenaphthen	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Fluoren	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Benzo(a)anthracen	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Phenanthren	mg/kg	0,023	0,055		DIN EN 15527 : 2008-09
Anthracen	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Fluoranthren	mg/kg	0,035	0,083		DIN EN 15527 : 2008-09
Pyren	mg/kg	0,027	0,064		DIN EN 15527 : 2008-09
Chrysen	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Benzo(b)fluoranthren	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Benzo(k)fluoranthren	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Benzo(a)pyren	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Dibenz(ah)anthracen	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Benzo(ghi)perylene	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
Indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/kg	<0,050	<0,050		DIN EN 15527 : 2008-09
PAK-Summe (nach EPA)	mg/kg	0,16 ^{*)}	0,38		DIN EN 15527 : 2008-09
Clostridien	^{u)} KBE/g	1055			Methodenbuch der BGK, Kapitel IV C : 2006-09(BB)
Vorbehandlung					
Königswasseraufschluß					DIN EN 13657 : 2003-01

Tabelle A.3: Eingabewerte der Flüsse (Fl.) in STAN. Darstellung der Mittelwerte $\bar{x}$ und Standardabweichungen Δx von Stickstoff (N) und Phosphor (P) mit Angabe der relativen Unsicherheit RU. Quellen: 1.) ACN 2017, 2.) Arbestain u. a. 2015, 3.) Boldrin u. a. 2010, 4.) Chan u. a. 2009, 5.) Christensen 2011, 6.) DWA 2008, 7.) Eghball u. a. 1997, 8.) EGoS o.J. 9.) Etter, Gounden u. a. 2015, 10.) Friedler u. a. 2013, 11.) Heckman u. a. 1996, 12.) Jönsson, Stintzing u. a. 2004, 13.) López u. a. 2009, 14.) Maurer u. a. 2006, 15.) Meinzinger und Oldenburg 2009, 16.) Meinzinger 2010, 17.) MRG o.J. 18.) PDA 2009, 19.) Rana 2015, 20.) Remy 2010, 21.) Titova u. a. 2021, 22.) Udert, Buckley u. a. 2015, 23.) Vinnerås 2002

Fl.	Güter-Importe	N		P		Quellen
		$\bar{x} \pm \Delta x$ [kg a ⁻¹]	RU [%]	$\bar{x} \pm \Delta x$ [kg a ⁻¹]	RU [%]	
F1	Kot	63,0 ± 11,0	17	21,0 ± 4,27	20	6.)10.)15.)16.)20.)23.)
U1	Urin	378 ± 21,0	6	36,1 ± 1,04	3	6.)10.)12.)15.)16.)20.)
I1	Strohmehl	1,83 ± 0,34	18	0,24 ± 0,10	39	1.)18.)24.)
I2	Toilettenpapier	0 ±		0 ±		23.)
I3	Fehlwürfe	0 ±		0 ±		Annahme
I4	Tonmehl	0 ±		1,43 ± 0,07	5	17.)
I5	Kohle	1,82 ± 1,00	55	0,45 ± 0,23	50	2.)4.)8.)21.)
I6	Grünschnitt	6,83 ± 2,33	34	0,84 ± 0,14	17	3.)11.)13.)

Fl.	Güter-TK	N		P		Quellen
		$\bar{x} \pm \Delta x$ [%]	RU [%]	$\bar{x} \pm \Delta x$ [%]	RU [%]	
U-F	Urin-Fehleinleitung	10 ± 5	50	10 ± 5	50	Werte Finizio
Eg1	Verlust Urin	1,0 ± 0,4	35	0 ±		16.)19.)
Eg2	Verlust VUNA	3,0 ± 2,0	67	0 ±		9.)14.)22.)
P2	Destillat VUNA	1,0 ± 0,5	50	0 ±		9.)14.)22.)
Eg3	Verlust Kompost	25 ± 10	40	0 ±		5.)7.)16.)
Ef	Leaching Kompost	2,0 ± 1,0	50	1,0 ± 0,5	50	7.)16.)
F-R	Kompost-Rücklauf	10 ± 2,5	25	10 ± 2,5	25	Werte Finizio

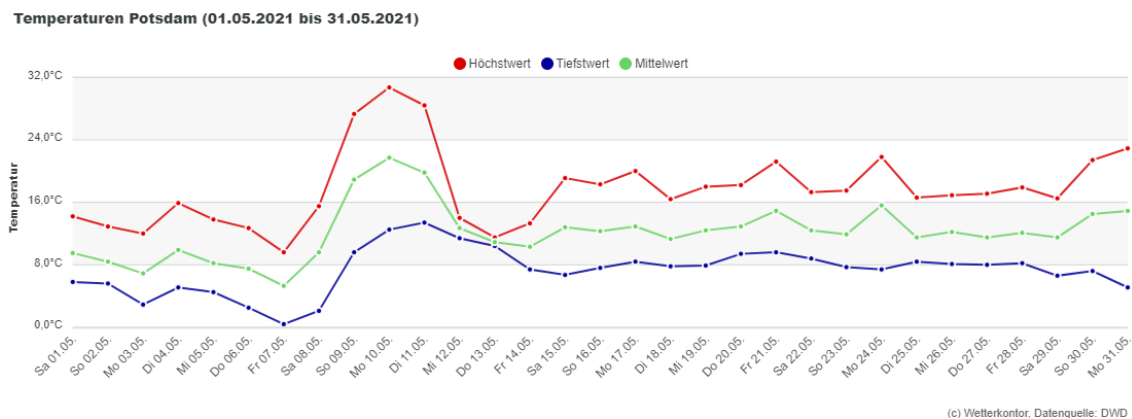


Abbildung A.2: Im Mai 2021 gemessene Temperaturen in Potsdam, Brandenburg. [wetterkontor.de 2021]

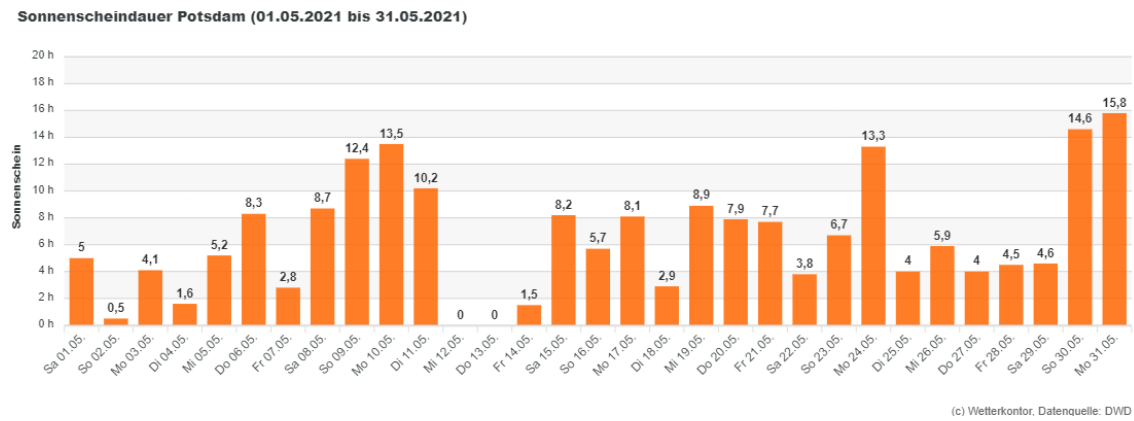


Abbildung A.3: Im Mai 2021 gemessene Sonnenstunden in Potsdam, Brandenburg. [wetterkontor.de 2021]