

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN DEPARTEMENT LIFE
SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Nährstoffkreislauf im KREIS-Haus

Eine Untersuchung von Urinverdunstungsmodulen und deren Anwendbarkeit in der Praxis

Bachelorarbeit

von

Lüthi Laila

Bachelorstudiengang: 2018

Abgabedatum: 28.07.2022

Studienrichtung: Umweltingenieurwesen

Fachkorrektorinnen ZHAW

Nadine Antenen

ZHAW Life Sciences und Facility Management

Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

Devi Bühler

ZHAW Life Sciences und Facility Management

Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

Fachkorrektor VUNA

Bastian Etter

Überlandstrasse 129

8600 Dübendorf

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde als Teil des «KREIS-Hauses» - einem Konzept der Kreislaufwirtschaft im Wohnbereich - die Urinverdunstung mit passiver, solarer Evaporation untersucht. Die direkte Urinverdunstung hat zum Ziel, wertvolle Nährstoffe wie Phosphor oder Stickstoff aus den menschlichen Ausscheidungen rückzugewinnen und diese im Rahmen des Kreislaufkonzepts als Düngemittel wiederzuverwenden.

Um diesen Ansatz im Alltag zu testen, wurde im KREIS-Haus in Feldbach ZH ein Prototyp eines Urinverdunstungsmoduls gebaut und sechs Monate lang im Betrieb getestet. In der Trockentrenntoilette gesammelter Urin wurde zu einem separaten Modul mit einem 6-schichtigem Röhrensystem, welches hohe Verdunstungsraten ermöglichen sollte, geleitet. Das Verdunstungsmodul war auf einem, nach der Sonneneinstrahlung ausgerichteten Gehäuse mit schwarzer Auskleidung und Plexiglasfenstern aufgebaut, um einen Gewächshauseffekt zu erzeugen und die Verdunstung durch Hitze zu fördern. Damit ausserdem genug Luft für die Verdunstung über die halboffenen Röhren strömen konnte, wurde an der Vorderseite des Gehäuses mehrere Löcher angebracht, durch welche die Luft einströmte, bevor sie durch eine Öffnung in der Oberseite wieder austreten konnte. Mit diesem Prototyp der Urinverdunstung konnten Verdunstungsraten von maximal $1.7 \text{ l/m}^2/\text{d}$ erreicht werden und durchschnittlich 24 g/l Stickstoff, 17.7 g/l Phosphat und 55 g/l Kaliumoxyd rückgewonnen werden. Der Einsatz des verdunsteten Urins als Düngemittel bei einer Verdünnung von 2 g/l führte zu einem Pflanzenwachstum, welches vergleichbar mit herkömmlichen Düngern ist. Damit erreicht unser Prototyp im Vergleich zu anderen Studien ähnliche Verdunstungsleistung und trägt ohne Einsatz von zusätzlicher Energie und mit geringen Mehrkosten zu einer effizienten Stickstoff-, Phosphor und Kaliumrückgewinnung bei.

Schlagwörter: Hydroponische Pflanzversuche, Low-Tech, Nährstoffrückgewinnung, passive Urinverdunstung, Prototyp, Säurestabilisierung, Urinseparierung, Urinverdunstung, Urinverdunstungsmodule

Abstract

As part of this bachelor thesis, urine evaporation with passive solar evaporation was investigated as part of the "KREIS-Haus" - a circular economy concept in the residential sector. Direct urine evaporation aims to recover valuable nutrients such as phosphorus or nitrogen from human excreta and reuse them as fertilizer as part of the circular economy concept.

To test this approach in everyday life, a prototype urine evaporation module was built at the KREIS-Haus in Feldbach ZH and tested in operation for six months. Urine collected in the dry separation toilet was directed to a separate module with a 6-layer tube system designed to allow high evaporation rates. The evaporation module was built on an enclosure oriented according to solar radiation, with a black lining and Plexiglas windows to create a greenhouse effect and promote evaporation by heat. In addition, to allow enough air to flow over the half-open tubes for evaporation, several holes were made in the front of the enclosure through which the air flowed in before exiting through an opening in the top. With this prototype of urine evaporation, evaporation rates of a maximum of 1.7 l/m²/d could be achieved and an average of 24 g/l of nitrogen, 17.7 g/l of phosphate and 55 g/l of potassium oxide could be recovered. The use of the evaporated urine as fertilizer at a dilution of 2 g/l resulted in plant growth comparable to conventional fertilizers. Thus, our prototype achieves similar evaporation performance compared to other studies and contributes to efficient nitrogen, phosphorus and potassium recovery without the use of additional energy and with low additional costs.

Keywords: hydroponic planting trials, low-tech, nutrient recovery, passive urine evaporation, prototype, acid stabilization, urine source separation, urine evaporation, urine evaporation modules.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	2
1 Einleitung	5
1.1. Zielsetzung.....	7
1.2. Forschungsfragen	8
2 Theorie	9
2.1. Kontaminierung.....	9
2.2. Hydrolyse.....	11
2.3. Stabilisierung.....	12
2.4. Volumenreduktion	13
2.5. Gesetzliche Anforderungen.....	13
3 Material und Methoden.....	16
3.1. Untersuchungsgebiet	17
3.2. Urinsammlung und Lagerung	17
3.3. Modulaufbau	18
3.3.1. Urinverdunstungsmodul 1	18
3.3.2. Urinverdunstungsmodule 2a und 2b	19
3.4. Wetterdaten, Säuredosierung, Pegelstand und Luftstrom.....	20
3.5. Versuche	21
3.5.1. Vorversuche	22
3.5.2. Verdunstungsversuche	22
3.5.3. Pflanzversuche	23
3.6. Chemische Analysen	25
3.7. Statistische Auswertung	25
4 Resultate.....	26
4.1. Wetterdaten, Säuredosierung, Pegelstand und Luftstrom.....	26
4.2. Vorversuch	27
4.2.1. Labor	27

4.2.2. Feldversuche	28
4.3. Verdunstungsversuche Urin.....	30
4.4. Nährstoffveränderung.....	35
4.5. Pflanzenversuche	38
4.5.1. Nährstoffaufnahme der Pflanze	42
5 Diskussion.....	45
5.1. Fazit und Ausblick	51
Literaturverzeichnis	53
Abbildungsverzeichnis	60
Tabellenverzeichnis	63
Anhang A – Nährstoffe in den Vorversuchen.....	64
Anhang B – Pflanzenwachstum von Basilikum	65
Anhang C – Fotos mit dem Raspberry-Pi	70
Anhang D – Nährstoffveränderungen der Hauptversuche.....	72
Anhang E – Rohdaten der Nährstoffkonzentration.....	75
Anhang F - Strömungsprüfung	76
Anhang G – pH-Wert Veränderungen.....	77
Anhang H - Eigenständigkeitserklärung	78

1 Einleitung

Schnellwachsende Städte und die zunehmende Urbanisierung stellen eine grosse Herausforderung für das konventionelle Klärsystem dar (Udert & Wächter, 2012). Bis zum Jahr 2050 werden von der UNO mehr als 10 Milliarden Menschen auf dem Globus prognostiziert (United Nation, 2019). Die zunehmende Konzentration der Bevölkerung auf Städte und die steigende Abwasserproduktion stellen herkömmliche Sanitäranlagen unter Druck (Larsen & Gujer, 2001). Gleichzeitig sind Nährstoffe in Form von Stickstoff unerlässlich, um die weltweite Bevölkerung nachhaltig ernähren zu können (Berry et al., 2002). Aus diesen Gründen besteht eine grosse Notwendigkeit, Nährstoffe in Zukunft in einem Kreislauf zu behalten. Forschung und Praxis zeigen, dass eine Transformation des konventionellen Sanitärsystems mit Fokus auf Nährstoffeliminierung hin zu Nährstoffrückgewinnung folglich unerlässlich ist (Guest et al., 2009).

Erste Versuche, Urin aus dem Haushaltabwasser zurückzugewinnen, gehen zurück in die neunziger Jahre (Larsen & Gujer, 1996; Udert & Wächter, 2012; Wilsenach & van Loosdrecht, 2003) und doch wird das grosse Potential von Urin bis heute nicht ansatzweise ausgeschöpft (Maurer et al., 2006). Dies, obwohl Urin den grössten Nährstoffanteil vom Abwasser stellt, aber nur 1% des Gesamtabwassers ausmacht. Die überwiegende Mehrheit von Stickstoff-, Phosphor- und Kalium-Nährstoffausscheidungen der Menschen sind im Urin zu finden (Larsen & Gujer, 1996). Diese Nährstoffe könnten dementsprechend durch die separate Aufarbeitung von Urin und Fäzes effizient rückgewonnen und damit laut Schätzungen 22% des weltweiten Phosphorverbrauchs gedeckt werden (Mihelcic et al., 2011). Durch die Kompostierung und Rückführung von menschlichen Ausscheidungen könnte dadurch die Abhängigkeit von synthetisch hergestellten Düngemitteln massgeblich verringert werden (Ramirez & Worrell, 2006). Pilotversuche in der Landwirtschaft haben gezeigt, dass die gewonnen Nährstoffe von Urin vergleichbare Steigerungen der Ernteerträge ergeben wie herkömmliche synthetische Dünger (Freguia et al., 2021). Durch die gezielte Trennung von Stoffströmen kann eine Eutrophierung der Gewässer und Überdüngung der Landwirtschaft verhindert werden und eine einfachere Rückgewinnung der Nährstoffe erfolgen (Reynaert et al., 2020). Weitere Vorteile der Urinwiederaufbereitung sind die gezielte Beseitigung von Mikroverunreinigungen (Escher et al., 2006) und Pharmazeutika im Urin sowie die Möglichkeit zur dezentralen Reinigung, welche zur Entlastung der herkömmlichen Kläranlagen beitragen kann (Larsen & Gujer, 2001).

Nebst den erwähnten Vorteilen kann die Urinseparierung aber auch nachteilige Wirkungen auf Mensch und Umwelt zeigen. Zwar ist die Urinwiederverwendung einiges sicherer als die von Fäzes, da der Anteil an Pathogenen um ein Vielfaches kleiner ist (Bethune et al., 2014). Trotzdem können unangenehme Gerüche (Ammoniak und Methanethiol etc.), sowie

fehlgeschlagene Stabilisierung und Hygienisierung die Handhabung von Urin erschweren (Larsen & Gujer, 2001). Die beschriebenen Probleme führen zu einer geringeren Akzeptanz bei der Bevölkerung und erschweren daher den Einsatz von Urin als Nährstoffquelle (Ren et al., 2021a). Es müssen entsprechend geeignete Konzepte erstellt werden, um die Handhabung von Urin möglichst sicher zu gestalten und somit die Akzeptanz von Urin als Nährstoffquelle zu erhöhen.

Für die Urinbehandlung werden verschiedene technische Optionen in der Literatur beschrieben; von einfachen Low-Tech Verfahren bis hin zu hochkomplexen und energieaufwändigen Systemen. Die einfachste Behandlung ist die Lagerung von Urin (Hellström et al., 1999). Weitere häufige angewandte Möglichkeiten sind die Gefrierung (Lind et al., 2001), die Ozonierung (Dodd et al., 2008), die Elektrolyse (Pronk et al., 2007) oder die Mikrofiltration (Merchant et al., 2010). Maurer et al., 2006 geben einen Überblick über die häufigsten Methoden der Urinbehandlung (Weitere Verfahren wie Umkehrosmose, Nitrifizierung, Ionenaustausch, Struvitbehandlung etc.). In jener Publikation wird die Verdunstung des Urins für Gebiete in der Nähe von landwirtschaftlichen Zonen und mit wenig Stromversorgung als am besten geeignet bewertet. Ohne zusätzlich benötigte Energie und mit niedrigen Betriebskosten kann durch die Verdunstung das Volumen reduziert werden und der Urin hygienisiert sowie stabilisiert werden (Bethune et al., 2014). Der Nährstoffkreislauf kann durch die Ernte des Düngers und die Wiederverwendung in der Landwirtschaft geschlossen werden.

Laboruntersuchungen (Bethune et al., 2014; Mayer, 2002) sowie Feldversuche (Antonini et al., 2012; Simha et al., 2020) zeigen, dass die Urinverdunstung grosses Potential birgt und eine Möglichkeit zur Nährstoffrückgewinnung darstellt. Bisher wurde aber nur wenig Forschung zur Urinverdunstung betrieben und die meisten Lösungen sind entweder technologisch anspruchsvoll, benötigen Energie oder erfordern den Einsatz von Chemikalien (Ek et al. 2006; Maurer et al. 2003 & 2006). Da die Verdunstungsrate je nach Exposition, Sonneneinstrahlung und Luftfeuchtigkeit variiert, können die Resultate aber nicht vereinheitlicht werden. Zudem gibt es weltweit erst einen zugelassenen Dünger aus Urin (VUNA, 2020). Für den Schritt von der Grundlagenforschung hin zur praktischen Umsetzung braucht es daher mehr angewandte Forschung.

Um das grosse Potential der Urinverdunstung auszunutzen, wurde im Rahmen einer Projektwoche ein Urinverdunstungsmodul entwickelt und gebaut. Über die Handhabung, das Verdunstungspotential und die Nährstoffrückgewinnung des Urinverdunstungsmodul in der Praxis sind noch keine Daten erhoben worden.

1.1. Zielsetzung

Um Aussagen über die Funktionstüchtigkeit von passiven Urinverdunstungseinheiten in der Schweiz machen zu können, befasst sich die vorliegende Arbeit mit einer Low-Tech Pilotanlage im Kanton Zürich. Diese Arbeit untersucht die Möglichkeit einer passiven Evaporation von Urin unter Einhaltung der folgenden Schritte der Urinbehandlung; Stabilisierung mit Säure, Nährstoffrückgewinnung und Volumenreduktion. Im Fokus stehen dabei die Funktionsweise des Moduls, die Dosierung und Menge der Säure mit schwankenden Urinmengen der Trockentrenntoilette sowie der langfristige Stabilisierungserfolg und damit die Verhinderung des Stickstoffverlustes an die Luft.

Ziel der Arbeit ist es, einen Prototyp zur passiven Urinverdunstung in einem energie- und wasserautarken Haus im Kanton Zürich zu entwickeln, zu installieren und das Potenzial im Einsatz während mehreren Monaten zu bewerten. Das Urinverdunstungsmodul hat den Anspruch passiv und günstig zu sein, damit es von Personen aus unterschiedlichen Einkommensschichten erwerbbar ist und der ökologische Fussabdruck klein bleibt. Materialien sollen einfach erhältlich sein und die Konstruktion ohne Einsatz von speziellen Geräten erfolgen. Die passive Ausführung ermöglicht eine Anwendung in abgelegenen Orten, an welchen keine Elektrizität vorhanden ist. Eine einfache, hygienische Handhabung ermöglicht einen Betrieb durch die Allgemeinbevölkerung. Zudem sollen mögliche Schwierigkeiten (Modulstabilität, Geruchsentwicklung, Nährstoffverlust etc.) erörtert und Lösungswege aufgezeigt werden. Durch den Zusammenhang mit Wetterdaten wie Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit und Temperatur wird versucht die Verdunstungsrate zu erklären und eine mögliche Abschätzung zum durchschnittlichen jährlichen Umsetzungsvolumen gemacht.

In einem zweiten Schritt wird das entstandene Endprodukt aus dem Urin in einer hydroponischen Anlage getestet und mit herkömmlichen Düngern verglichen. Damit der Urin zu Dünger aufbereitet werden kann, dürfen möglichst wenige Nährstoffe bei der Verdunstung verflüchtigen. Es wird beabsichtigt durch eine einfache Sensorik eine automatische Säuredosierung zu erreichen und dadurch die Stabilisierung des Urins zu gewährleisten. Das entstandene pulverartige Endprodukt in der Prototypanlage soll zu einem geeigneten Dünger aufbereitet werden und die Wachstumseigenschaften und Nährstoffaufnahme von Basilikum (*Ocimum basilicum*) in einem hydroponischen Versuch mit herkömmlichen Düngern verglichen werden.

1.2. Forschungsfragen

Die Arbeit verfolgt ein exploratives Design und untersucht folgenden Forschungsfragen:

F1: Ist die Konstruktion des Urinverdunstungsmoduls sowie die getestete Stabilisierung geeignet für den Einsatz im Feld? Gibt es Konstruktionsarten, die sich besonders gut eignen?

F2: Welchen Einfluss haben Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und Temperatur auf die Verdunstungsrate?

F3: Wie verändert sich der Nährstoffgehalt durch die Verdunstung des Urins?

F4: Fördert oder hemmt Urindünger das Pflanzenwachstum im Vergleich zu herkömmlichen Düngern.

2 Theorie

Bereits vor fünfzig Jahren beschäftigte sich eine Studie der NASA mit den Inhaltsstoffen von menschlichem Urin und fasste eine Liste von 158 chemischen Verbindungen zusammen (Putnam, 1971). Urin besteht grösstenteils aus Wasser (zirka 97%) und enthält nur ca. 3% gelöste Feststoffe. Von den gelösten Feststoffen sind zirka 60% organische Verbindungen und 40% lösliche Salze und Nährstoffe (Putnam, 1971). Zu Letzteren gehören Natrium, Calcium, Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Sulfat, allesamt interessant für die Düngemittelproduktion (Heinonen-Tanski et al., 2007; Volpin et al., 2018). Insbesondere für Phosphor ist Urin die grösste Quelle aus urbanen Gebieten (Zhang et al., 2014). Im Durchschnitt produziert jede Person zirka 15 g Nährstoffe (N,P,K) pro Tag (Del Porto & Steinfeld, 1999) und könnte dementsprechend ca. 300 – 400 m² Agrarland mit Stickstoff versorgen (gemäss herkömmlichen Düngemethoden; 50-100 kg/ha) (Finelegele, 2011; Stintzing et al., 2004). Der grösste Teil der organischen Verbindungen im Urin macht Harnstoff aus (Ren et al., 2021a). In frischem noch nicht hydrolysiertem (Spaltung einer chemischen Verbindung durch die Reaktion mit Wasser) Urin ist ca. 85% des Stickstoffes in Form von Harnstoff verfügbar (Pronk & Koné, 2009; Udert et al., 2003). Weitere organische Substanzen im Urin sind Harnsäure und Kreatin. Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Zusammensetzung von Inhaltsstoffen im frischen Urin.

2.1. Kontaminierung

Urin galt lange als sterile Flüssigkeit, wenn sie den Körper verlässt. Untersuchungen anhand von genetischer Sequenzierung von Mikroorganismen zeigen aber, dass Urin bereits Bakterien enthält, bevor er den Körper verlässt (Lewis et al., 2013; Wolfe & Brubaker, 2015). Darüber hinaus ist auch getrennter Urin in der Regel mit Fäkalien kontaminiert (Chandran et al., 2009; Schönning et al., 2002) und enthält zusätzlich Bakterien aus der Umgebung (Lahr et al., 2016). Urin enthält ausserdem 60-70% der Arzneimittel von menschlichen Ausscheidungen (Lienert et al. 2007). Arzneimittelrückstände sind in sehr unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden und können von null bis zu mehreren hundert Mikrogramm pro Liter (Winker et al., 2008), bei regelmässiger Medikamenteneinnahme sogar im Bereich Milligramm pro Liter ausmachen (Bischel et al., 2015).

Um Krankheitserreger zu verringern, empfiehlt die Weltgesundheitsorganisation menschlichen Urin vor der Verwendung als Dünger mindestens sechs Monate lang bei 20 °C zu lagern (WHO, 2006). Dieser gesammelte und gelagerte Urin ist aufgrund der spontanen Hydrolyse und des folgenden Anstieges des pH-Wertes reich an unprotoniertem Ammoniak (NH₃). Diese Form macht zirka 50 % des Ammoniakstickstoffes im Urin aus und wirkt als Biozid (Warren, 1962). Durch den hohen pH-Wert und die Ammoniakfreisetzung wird der Urin also regelrecht

desinfiziert. Doch im Falle von Antibiotika (Jaatinen et al., 2016) oder anderen starken Arzneimitteln (Bischel et al., 2015) reicht die alleinige Lagerung des Urins nicht, um die Konzentration der Arzneimittel zu verringern. Deshalb braucht es weitere Forschung etwa zur Beseitigung von Medikamentenrückständen, damit Urin sicher und ohne Bedenken als Dünger angewendet werden kann (Winker et al., 2008).

Tabelle 1: In der Literatur gefundene Nährstoffzusammensetzung von frischem Urin (Durchschnitt) aus Studien von 1977 bis 2021.

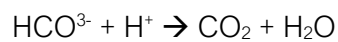
Quelle Jahr	Ciba-Geigy 1977	Eitter et al. 2014	Pronk & Koné 2009	Ren et al. 2021	Rose et al. 2015	Simha et al. 2020	Tilley et al. 2008	Udert et al. 2003
TN	8830		-	-	-	8600		7360
TNH ₃	-		-	-	-	-		384
NH ₃	-		477.647	-	480	-	300	0.24
CO(NH ₂) ₂	-	9550	3782.33	-	16300	-		6160
TP	800-2000		-	-	-	637		592
Ca ²⁺	233	89	180	6.27	230	96	70	152
Mg ²⁺	119	45	95	0.35	120	62	70	80
K ⁺	2737	1870	2200	1078	1680	1467		1760
TCO ₃ ²⁻	-		-	-	-	-		0
SO ₄ ²⁻	-		1500	150	2075	1200		1200
Cl ⁻	4970	6620	3900	-	1870-8400	3967		3040
Na ⁺	3450		2800	1739	2780	2533		2080
pH	6.20	5.6	-	9.5	6.2	-		6.2
COD	-	7660	-	-	-	-		8000
Ni	-		-	-	-	0.0028		-
EC	-		-	30	-	-		-
DOC	-		-	778	-	-		-
PO ₄ ³⁻	-	388	750.526	280	472	-	450	-

2.2. Hydrolyse

Unmittelbar nachdem der Urin den Körper verlässt liegt der pH-Wert im sauren Bereich zwischen 5.8 und 7 (Udert, Fux, et al., 2003). Durch das ubiquitäre Enzym «Urease» unterliegt der Urin beim Kontakt mit der Umwelt spontan einer Harnstoffhydrolyse. Durch die Hydrolyse (Spaltung einer chemischen Verbindung durch die Reaktion mit Wasser) von Harnstoff ($\text{NH}_2(\text{CO})\text{H}_2\text{N}$) entsteht das Gas Ammoniak folgendermassen (Kirchmann & Pettersson, 1994; Larsen, et al., 2003):

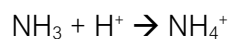


Mit der Speziation von anorganischem Hydrogencarbonat im pH-Wert zwischen 6 und 9:



Dieser Prozess führt zu einem starken Anstieg des pH-Wertes auf einen Wert von ungefähr 9 (Kirchmann & Pettersson, 1994; Warner, 1942). Schwerlösliche Salze wie Calcit, Struvit, Hydroxylapatit und Dolomit werden durch den alkalischen pH-Wert ausgefällt, da sie weniger löslich sind bei höherem pH-Wert (Bethune, 2015).

Der pKa-Wert von Ammoniak beträgt 9.24, so dass bei einem pH-Wert von 9 ein beträchtlicher Teil des Ammoniaks (37%) in der deprotonierten Form vorliegt. Wegen dem hohen Henry-Koeffizienten und der geringen Löslichkeit dieser Form verflüchtigt sich das Ammoniak bei Kontakt mit der Luft schnell und geht dadurch verloren (Kirchmann & Pettersson, 1994).



Wird der Urin ohne Stabilisation gelagert kommt es daher durch die Verflüchtigung zu Ammoniakverlusten. Bei roh ausgebrachtem Urin auf Feldern kommt es nebst Ammoniakverlusten auch zu einer Versauerung des Bodens (Srinivasamurthy, 2009). Die Ausbringungsart (Sprühen, Injektion, Bewässerung), die Bodenzusammensetzung und die Wetterbedingungen entscheiden zusätzlich über die Verflüchtigung von Ammoniak. Der hohe Anteil an Ammoniak in der Luft ist verantwortlich für den strengen Geruch. Durch den hohen pH-Wert und das freigesetzte Ammoniak wird der Urin von selbst hygienisiert und potentielle Pathogene innert vier bis sechs Monate eliminiert (Höglund, 2001; Stenström, 2009). Durch den pH-Wert Anstieg wird die Ausfällung von Calcium und Magnesium in Form von Carbonaten und Phosphaten ausgelöst (Udert, Fux, et al., 2003). Im gelagerten, unstabilierten Urin ist daher eine niedrige Calcium und Magnesium Konzentration zu erwarten.

Das Ergebnis der Harnstoffhydrolyse ist freies flüchtiges Ammoniak und Kohlendioxid. Durch die Verflüchtigung des Ammoniaks kommt es zu Stickstoffverlusten und zu einer Belastung für die Umwelt durch Versauerung (Randall et al., 2016).

2.3. Stabilisierung

Stark riechende Chemikalien (Ammoniak, Methanethiol etc.) und schädliche Bakterien sind verantwortlich, dass frischer, unstabiler Urin wenig akzeptiert ist in der Öffentlichkeit (Lienert & Larsen, 2010). Die Lagerung des unbehandelten Urins kann nebst dem Verlust von Stickstoff (Krajewska, 2009; Senecal & Vinnerås, 2017) durch die Ausfällung von Struviten zur Verstopfung von Leitungen führen (Udert, Larsen, Biebow, et al., 2003).

Eine mögliche Lösung der beschriebenen Probleme stellt die Stabilisierung von Ammoniak im Düngemittelprodukt dar (Pronk & Koné, 2009). Die Stabilisierung erfolgt entweder durch die Hemmung der Harnstoffhydrolyse oder durch die Stabilisierung von nichtflüchtigem Ammonium. Durch das Zuführen von Säuren kann die enzymatische Hydrolyse gestoppt werden und die Protonierungszustände am aktiven Zentrum werden inaktiviert (Maurer et al. 2003 & 2006; Ray et al., 2017). Kostengünstige und leicht zugängliche Varianten sind Essigsäure, Essig und Zitronensäure (Ray et al., 2017) Das sind handelsübliche Produkte, welche einfach erhältlich sind. Weitere Möglichkeiten sind Phosphorsäure, Salpetersäure, Schwefelsäure oder anorganische Säuren. Anorganische Säuren haben den Vorteil, dass sich die Nährstoffe (P, N oder S) im Dünger erhöhen. Diese Stabilisatoren sind aber teurer und bringen ein höheres Risiko beim Umgang mit sich (Pronk & Koné, 2009). Das Optimum der Ansäuerung zur Vermeidung von Stickstoffverlusten liegt bei pH-Wert von 4 (Jiang et al., 2017). Weitere Möglichkeiten zur Stabilisierung nebst der Ansäuerung sind Alkalisierung (Randall et al., 2016), Gefrierauftauung (Lind et al., 2001), Zugabe von Ureaseinhibitoren (Mitchell et al., 2015), elektrochemische Behandlung (Ikematsu et al., 2007) und Versalzung (Pahore et al., 2012).

Ist eine Hemmung der Hydrolyse nicht möglich, kann das Ammoniak-Ammonium Gleichgewicht zugunsten des Ammoniums verschoben werden (Ray et al., 2017), entweder durch Versauerung (Ek et al., 2006) oder durch Nitrifikation (Udert, Fux, et al., 2003).

Die oben beschriebenen Methoden sind in der Praxis einsetzbar, weisen aber unterschiedliche Mängel auf. Die Stabilisation mit Säure oder Lauge kann gefährlich sein und erfordert eine exakte Dosierung. Bei der elektrochemischen Behandlung kann eine langfristige Hemmung der Hydrolyse nicht gewährleistet werden und schliesslich übersteigen die Nitrifikation, die Gefrierauftauung und die Versalzung die Komplexität bei Low-Tech Anlagen (Fumasoli et al., 2016).

2.4. Volumenreduktion

Im frischen Urin macht Wasser ca. 97% des Gewichtes aus (Rose et al., 2015). Gewicht und Volumen limitieren den Transport von Urin (Chipako & Randall, 2020) und verursachen durch schwer beladene Fahrzeuge einen CO₂-Ausstoss, der langfristig zu zusätzlichen Umweltbelastungen führen kann (Larsen, 2020).

Um die Nährstoffe zu konzentrieren und das Volumen zu reduzieren werden in der Literatur verschiedene Verfahren beschrieben; Destillierung (Etter et al., 2015; Tettenborn, 2011; Udert & Wächter, 2012), Vorwärtsosmose (Zhang et al., 2014), Rückwärtsosmose (Ek et al., 2006), Gefrierauftauung (Lind et al., 2001), Lyophilisierung (Udert & Wächter, 2012), Membrandestillierung (Tun et al., 2016; Volpin et al., 2020) und Verdunstung (Antonini et al., 2012a). Die Verfahren unterscheiden sich sehr in ihrem Energieverbrauch (Martin et al., 2020). Die aktive Verdunstung ermöglicht mittels elektrisch erzeugter Wärme die Entfernung von Wasser; dabei wird flüssiges Wasser in Form von Wasserdampf entzogen (Antonini et al., 2012a). Bei der passiven Verdunstung wird lediglich mithilfe von Sonnenlicht und Wind das Volumen reduziert. Diese Methode ist daher nicht auf externe Stromzufuhr angewiesen. Die Verdunstung kann verschiedene Stadien erreichen, von einer leichten Konzentrierung bis zur vollständigen Austrocknung, bei der ein Pulver als Endprodukt entsteht (Martin et al., 2020). Um den chemischen Abbau von Harnstoff zu reduzieren, sollte die Verdunstung des stabilisierten Urins bei weniger als 40 - 60 °C erfolgen (Randall et al., 2016). Durch passive Verdunstung wird der Urin UV-Strahlen ausgesetzt, die bei der Beseitigung von hygienischen Risikofaktoren wirksam sind. Sangare et al. (2020) zeigen, dass nach drei Tagen Sonneneinstrahlung der Urin bakteriologisch desinfiziert wurde.

2.5. Gesetzliche Anforderungen

Fehlende rechtliche Rahmenbedingungen sind derzeit das grösste Problem beim Vertrieb von Dünger aus menschlichen Ausscheidungen. Anforderungen in Form von Gesetzen, Normen oder Standards sind für anthropogene Ausgangsprodukte auf europäischer Ebene noch nicht vorhanden. Bisher gibt es lediglich Richtlinien von Recyclingdünger, die aus Ausgangssubstraten pflanzlicher oder tierischer Herkunft hergestellt werden. Auf dem deutschen oder österreichischen Markt befindet sich daher derzeit kein Recyclingdünger aus anthropogenen Ausgangsprodukten. Lediglich in der Schweiz wurde bisher weltweit die erste Zulassung eines Düngers aus menschlichem Urin erteilt. In der Schweiz unterstehen Dünger einer Zulassungspflicht, wofür das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) zuständig ist (*SR 916.171, DüV*, 2001).

Um rechtliche Grundlagen zu erarbeiten und die Hygienestandards festzulegen wird in Deutschland an der allerersten Erarbeitung einer DIN SPEC 91421, welche die Qualität von Recyclingdüngern aus menschlichen Fäkalien aus Trockentoiletten festlegt, gearbeitet. Die DIN SPEC 91421 hat drei zentrale Aufgaben (i) Unsicherheiten bei der Vermarktung abzubauen, (ii) Diskurs mit der Politik fördern und die (iii) Etablierung von alternativem Dünger. In Tabelle 2 und 3 sind die zentralen Punkte aufgelistet; die Sicherstellung der seuchenhygienischen Unbedenklichkeit bzw. Infektionsschutz, die Phytohygiene, Schadstoffarmut und gartenbauliche Eignung (Nährstoffgehalt und Verfügbarkeit). Die Spezifikation orientiert sich an der europäischen Gesetzgebung für Düngemittel bzw. Recyclingdünger und schlägt verschiedene Analysen vor, die vor einem Inverkehrbringen durchzuführen sind (Entwurf DIN SPEC 91421, 2020).

Tabelle 2: Analyseparameter des Entwurfes der DIN SPEC 91421, (2020).

Parameter	Gruppe	Inhaltstoffe
Standardparameter		(Trockensubstanz, organische Trockensubstanz, pH-Wert, Salzgehalt, basisch wirksame Bestandteile)
Nährstoffe	Hauptnährstoffe	Stickstoff (Gesamt und löslich), Phosphor (Gesamt; je nach Düngemitteltyp zusätzlich lösliche Formen), Kalium
	Nebennährstoffe	Calcium, Magnesium, Natrium, Selen, Schwefel
	Spurennährstoffe	Bor, Kobalt, Kupfer, Eisen, Mangan, Molybdän, Zink
Fremdstoffe		Steine, Altpapier, Karton, Glas, Metalle, Plastik
Schadstoffe	Schwermetalle	(Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium, Zink)
	Organische Schadstoffe	(Perfluorierte Tenside, Dioxine und dl-PCB, PAKs)
	Pharmazeutische Rückstände	Ciprofloxacin, Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac und Ethinylestradiol bzw. Estradiol)
Seuchenhygienische Parameter		Salmonellen, Escherichia coli (E. coli), Enterokokken, Clostridium perfringens und Sporen, somatische Coliphagen
Physikalische Struktur		flüssig, Pulver, Schüttgut, Stückgut usw.

Die Spezifikation bezieht sich bei der Erarbeitung der Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte hauptsächlich auf die deutsche Düngemittelverordnung (DüMV), Bioabfallverordnung (BioAbfV) und der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) (Entwurf DIN SPEC 91421, 2020).

Tabelle 3: Ausgewählte Kennzeichnungsschwellenwerte des DIN SPEC 91421 Entwurfes (2020).

Parameter	Inhaltstoffe	Kennzeichnungsschwelle
Standardparameter	Trockensubstanz (TM)	k.A
	organische Trockensubstanz (oTS) / Glühverlust	5% TM
	pH	Jeder Wert
	Salzgehalt/Leitfähigkeit (in g KCl/l)	
Hauptnährstoffe	Stickstoff (N)	1.5% TM
	Phosphat (P ₂ O ₅)	0.5% TM
	Kaliumoxyd (K ₂ O)	0.75% TM
Weitere Nährstoffe	Magnesium (MgO)	0.3% TM
	Natrium (Na)	0.2% TM
	Chlorid (Cl)	jeder Gehalt

3 Material und Methoden

Im folgenden Kapitel werden die Teilschritte der passiven Urinverdunstung und der Pflanzenversuche beschrieben. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Arbeitsschritte in dieser Studie. 1) Der Urin stammt vom KREIS-Haus in Feldbach ZH. 2) Mit der Trockentrenntoilette wird der Urin von Fäzes abgetrennt und gelangt durch die Schwerkraft in einen Tank unter der Erde. 3) Ein Sensor detektiert Bewegungen über der Trockentrenntoilette und leitet einen Impuls an die Schlauchquetschpumpe weiter, die Putzessig in den Urintank unter der Erde einspeist und so den Urin stabilisiert. 4) Das Modul wird mit dem stabilisierten Urin manuell befüllt und der Zeitraum der Verdunstung gemessen. 5) Die wöchentlich gesammelten Proben der Urinrückstände werden im Labor der ZHAW aufbereitet und auf deren Nährstoffgehalt, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit analysiert. 6) Das Endprodukt der Verdunstung wird zu Dünger aufbereitet und in hydroponischen Versuchen mit herkömmlichen Düngern verglichen. In den weiteren Kapiteln werden diese Teilschritte detaillierter beschrieben.

Passive Urinverdunstung im KREIS-Haus

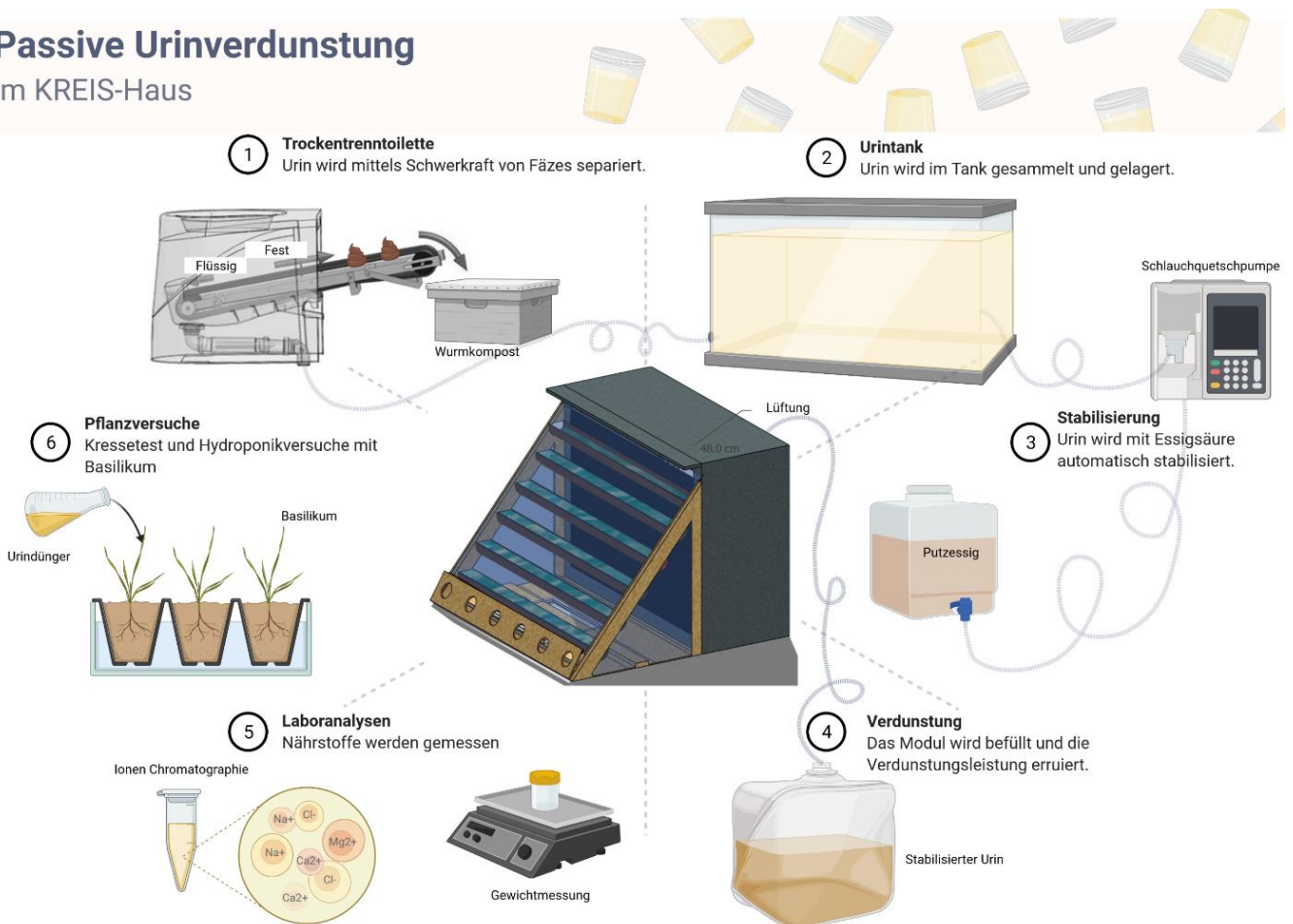


Abbildung 1: Überblick über die passive Urinverdunstung in Feldbach ZH. Die Abbildung gibt einen Überblick über die Versuche dieser Studie. 1) Mittels einer Trockentrenntoilette wird der Urin von den Fäzes abgetrennt und gelangt durch die Schwerkraft in einen 2) Tank. Durch einen 3) Sensor wird Putzessig in den Urintank geleitet. Um die Verdunstungsleistung zu messen, wird das 4) Modul befüllt. Die 5) Proben werden auf Nährstoffgehalt, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit analysiert. Das entstandene Pulver wird zu 6) Dünger aufbereitet und in hydroponischen Versuchen mit herkömmlichen Düngern verglichen. Eigene Darstellung mit Biorender.

3.1. Untersuchungsgebiet

Die Urinverdunstungsanlage steht in Feldbach ZH (Abbildung 2). Der Untersuchungsstandort liegt auf einer Höhe von 414 m.ü.M und ist Luftlinie ca. 320 m vom Zürichsee entfernt. Feldbach liegt in der gemässigten Klimazone, mit gleichmässig verteilten Niederschlägen übers Jahr und vier ausgeprägten Jahreszeiten. Das Wetter wird hauptsächlich von den herrschenden Winden beeinflusst. Die Klima- und Wetterinformationen beziehen sich auf die Meteodaten von MeteoSchweiz, die zwischen 1991 - 2022 aufgenommen wurden. Sie stammen aus der Wetterstation Wädenswil, da sie die geographisch nächstgelegene Wetterstation ist. Klimanormwerte zwischen 1991 - 2020 zeigen, dass der Wind über das Jahr ähnlich ausgeprägt ist und zwischen 1.6 - 1.9 m/s variiert. Der Januar ist mit durchschnittlich 1.0 °C der kälteste Monat, im wärmsten Monat Juli ist es durchschnittlich zirka 19.3 °C warm. Das Temperaturjahresmittel liegt bei 10.0 °C. Die geringste Niederschlagsmenge fällt im Februar, dort wird mit nur 77.5 mm/m² gerechnet. Mit 163,3 mm/m² stellt der August der niederschlagsreichste Monat dar.



Abbildung 2: Standort des Urinverdunstungsmodul in Feldbach ZH. Eigene Darstellung in QGIS.

3.2. Urinsammlung und Lagerung

Das im KREIS-Haus angenommene Urinvolumen beträgt 48 Liter pro Monat (1.5 Liter/Person/Tag, bei angenommener viertägiger Bewohnung mit zwei Personen). Bis zur Inbetriebnahme der Trockentrenntoilette wurde Urin in Plastikkanistern gesammelt und die Verdunstungsanlage damit gespeisen. Ab März 2022 wurde frischer Urin durch die Trockentrenntoilette (Ecodomeo, X-ECO-TO, Abbildung 3), welche Urin von den Fäkalien mittels eines Förderbandes trennt, für die Anlage verwendet. Das Förderband der Trenntoilette wird durch ein mechanisches Pedal aktiviert und bleibt durch zwei Reinigungsschieber sauber. Aufgrund der Schwerkraft fliesst der Urin durch eine eingebaute Schräge ab und wird in einem Sammelbehälter (1 m³) unter der Erde gesammelt. Da weder Wasser noch Einstreu benötigt

wird, bleibt der Urin unverdünnt. Fäzes und Toilettenpapier werden im angrenzenden Kompostier- oder Betriebsraum von Regenwürmern und Bakterien in Kompost umgewandelt.



Abbildung 3: Ecodomeo Trockentrenntoilette mit Förderband. Bild von www.kompotoi.ch

Um den Urin unmittelbar nach Austritt zu Hygienisieren wurde ein Präsenzmelder (Loxone, 100466) oberhalb der Toilette eingebaut. Der Präsenzmelder erkennt Bewegung und Präsenz von Personen durch PIR- Anwesenheits- und Akustiksensoren. Damit nur Ereignisse auf der Toilette und nicht alle einzelnen Eintritte ins Badezimmer detektiert werden, wurde der Erfassungswinkel der Sensoren eingeschränkt. Bei der Bewegungs-Erkennung im gewünschten Bereich bei der Toilette wird ein Signal an die Schlauchquetschpumpe (Hydrodreams, BL-PHC, BlueLab pH Controller) im Technikraum weitergegeben. Die Pumpe wurde so programmiert, dass sie mit ihrer Maximalleistung von vier Litern pro Minute bei jeder Detektion 18 Sekunden lang pumpt. Dadurch wird ein angenommener Standardwert von 250 ml Urin mit 18 ml Essigsäure (Oecoplan Putzessig, Coop, 25%, 72.36 ml/l) stabilisiert, damit der pH-Wert unter 4 fällt und die Hydrolyse inaktiviert wird.

3.3. Modulaufbau

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Urinverdunstungsmodule getestet. Das Urinverdunstungsmodul 1 (UVM 1) wurde während einer Projektwoche der Zürcher Hochschule der Angewandten Wissenschaften (ZHAW) erstellt. Aufgrund von technischen Schwierigkeiten (Dachrinnen zu wenig stabil, undichte Stellen, Risse im Plexiglas) wurde ein weiteres Modul erstellt, welches auf einem ähnlichen Prinzip der Verdunstung basiert. Dieses Modul wurde wiederum in zwei Versionen (UVM 2a und UVM 2b) getestet.

3.3.1. Urinverdunstungsmodul 1

Das UVM 1 wurde mit einem vertikalen Röhrensystem gebaut, sodass auf möglichst kleiner Grundfläche eine optimale Verdunstung passieren kann. Das Gehäuse von UVM 1 wurde aus alten Holzpaletten konstruiert. Im Inneren des Moduls befinden sich zugeschnittene Dachrinnen aus PVC-Material (Durchmesser 10 cm). Um die grösstmögliche Verdunstungsrate zu erzielen, wurde die Holzkonstruktion im Inneren mit einer schwarzen Plastikfolie ausgekleidet. Zur Abdeckung der Seitenwände wurde ein durchsichtiges Plexiglas verwendet. Zusätzlich wurde

das Modul im freien Raum platziert, um die Exposition des Sonnenlichts zu erhöhen. Die Einstrahlung der Sonne führt zur Erhöhung der Konvektion und des Treibhauseffektes und der Urin erwärmt sich. Der Einlass der Luft befindet sich im unteren Bereich, dafür wurden sechs Löcher mit einem Durchmesser von 5 cm gebohrt. Der Verdunstungsauslass wird am oberen Ende des Moduls durch einen Spalt ermöglicht. Somit kann kontinuierlich Luft mit niedrigerer Luftfeuchtigkeit von aussen durch den Einlass über die Verdampfungsflächen der Schalen gezogen werden und gesättigt über den Auslass wieder in die Umgebung gelangen (Abbildung 4). Durch den Wind wird die Plexiglasabdeckung gekühlt, der Dampf kondensiert an der Scheibe und bildet kleine Tropfen, welche durch die Schwerkraft abgeleitet werden.

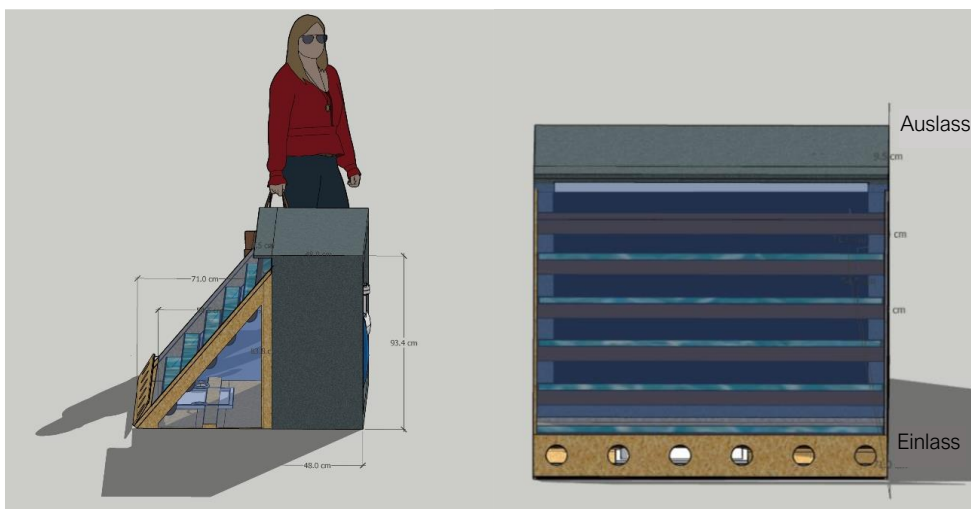


Abbildung 4: Planung des Urinverdunstungsmodul 1. Eigene Darstellung in Sketchup.

Das Modul besteht aus sechs standardisierten PVC-Dachrinnen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 121 cm. Die Röhren sind leicht versetzt übereinander angeordnet (siehe Abbildung 4). Wenn die Rinnen maximal gefüllt werden (bis 7 cm) hat jede Rinne ein Fassungsvermögen von 7.47 Litern. Insgesamt haben die Röhren ein Fassungsvermögen von 45 Litern. Die Röhren wurden horizontal gestellt, sodass keine Flüssigkeit von den oberen in die unteren Rinnen gelangt. An den Enden wurden die Röhren mit Silikon verklebt, um zu verhindern, dass Flüssigkeiten nicht auf der Seite austreten können.

Im hinteren Bereich des Moduls befindet sich Stauraum für Materialien zur Probeentnahme (Tubes, Spritzen, Handschuhe, Wasser etc.).

3.3.2. Urinverdunstungsmodule 2a und 2b

UVM 2a und 2b sind aus nur wenigen Materialien zusammengesetzt und erlauben im Vergleich zu UVM 1 eine einfachere Handhabung (Abbildung 5 und 6). Damit der Einfluss der Dachschräge auf die Verdunstung verglichen werden kann wurden zwei verschiedene Module erstellt. Beide Module sind aus Rako Kisten (*utz Stapelbehälter RAKO 500 x 400 x 323 mm*) gebaut. Die maximale Füllmenge der beiden Module beträgt je ca. 28 Liter. Die beiden Kisten

haben eine Grundfläche von 40 x 50 cm und sind mit einem Plexiglas bedeckt. Der Einlass von UVM 2a befindet sich auf der Vorderseite, der Auslass auf der Rückseite (ähnlich wie bei UVM 1). Zusätzlich ist das Dach von UVM 2a abgeschrägt, sodass die kondensierte Flüssigkeit ablaufen kann. Zwischen Plexiglas und Kiste wurde dieses Modul mit Schaumstoff ausgekleidet, damit der Luftstrom konzentrierter durch Einlass und Auslass fließt. Die Kontinuitätsgleichung von Bernoulli besagt, dass der Querschnitt eines Rohres und die Geschwindigkeit einer darin strömenden Flüssigkeit umgekehrt proportional ist, weshalb die Öffnung daher weitgehend auf Einlass/Auslass begrenzt ist. An der Vorderseite des UVM 2a wurde auf Schaumstoff verzichtet, damit das Kondensat abfließen kann. UVM 2b wurde ohne Dachschräge erstellt und ist nicht schwarz, sondern grau. Der Einlass und der Auslass befinden sich seitlich. Abgedeckt ist das Modul mit Plexiglas.

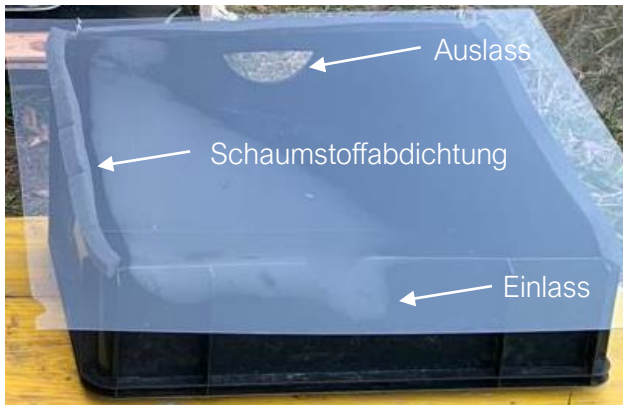


Abbildung 5: UVM 2a mit Dachschrägung und Plexiglas.



Abbildung 6: UVM 2b ohne Dachschräge mit Plexiglas.

3.4. Wetterdaten, Säuredosierung, Pegelstand und Luftstrom

Um gewisse Schritte bei den Messungen der Wetterdaten, der Säuredosierung, der Pegelstandergebung und der Luftströmung zu automatisieren wurden diverse Sensoren eingebaut. Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Sensoren beschrieben.

Präsenzmelder: Der Präsenzmelder (Loxone, 100466) ist in Kapitel 3.2 beschrieben.

Raspberry Pi: Ein Raspberry Pi (Raspberry Pi 3 Model B+) mit Kamera Modul (Raspberry Pi Camera Board Night Vision "IR-CUT" (5MP) - Tag/Nacht Schaltung) wurde programmiert, um im Stundentakt Fotos vom Wasserstand in den Verdunstungsmodulen zu machen. Dadurch soll der genaue Zeitpunkt der vollständigen Verdunstung erfasst, sowie unmittelbare, starke Veränderungen durch das Wetter ermittelt werden. Der Raspberry Pi kann über einen Telegrambot (@Urinverdunstungsmodul) gesteuert werden. Dadurch können Testversuche der Kamera gleich vor Ort mit dem Smartphone vorgenommen werden. Zudem erfolgte die Programmierung so, dass die Kamera ohne WLAN und trotz Stromunterbrüchen weiterläuft und somit auch einsetzbar wäre in abgelegenen Gebiet.

Pyranometer: Die äussere Sonneneinstrahlung (W/m^2) wurde minütlich mit einem Pyranometer (Campbell Scientific, CR6Series) erhoben und durch die Datalogger Software PC400 abgelesen.

Wassermelder: Der Wasserstand wurde durch den WLAN-Wassermelder (Pearl, ZX5004) gemessen. Der Sensor zeigt nur 0 (kein Wasser) oder 1 (Wasser) an und sendet eine Nachricht auf das Mobiltelefon, sobald das Wasser verdunstet ist.

Temp Data Logger: Die Innen- und Aussentemperatur und Luftfeuchtigkeit der drei Module wurde mittels Temperatursensoren (Temp Data Logger, EL-USB-2+) sechs Mal stündlich gemessen und durch die Software EasyLog USB (Lascar Electronics Ltd, Version 7.6.0.0.) ausgewertet.

Dräger Strömungsprüfer: Der Luftstrom der Module wurde einmal mit dem Dräger Strömungsprüfer (Dräger Safety AG, 392.5301) gemessen.

3.5. Versuche

In der vorliegenden Arbeit haben zwei Vorversuche stattgefunden; die Verdunstung mit Wasser im Feld und die Verdunstung mit Urin im Labor. Die beiden Hauptversuche untersuchten die Verdunstungsrate und Nährstoffrückgewinnung mit Urin im Feld, sowie die Wachstumsleistung von Urindünger in hydroponischen Versuchen. Abbildung 7 gibt einen Überblick über den zeitlichen Versuchsablauf.

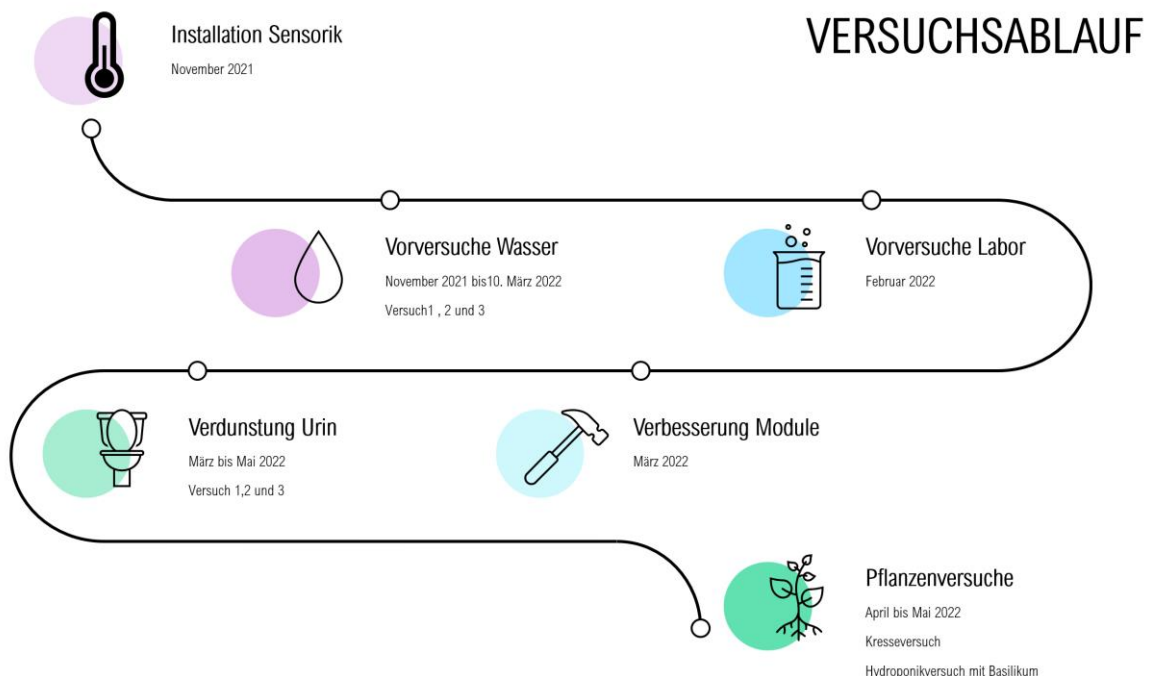


Abbildung 7: Zeitstrahl und Ablauf der Vorversuche und Versuche.

3.5.1. Vorversuche

Um die Verdunstungsleistung unter standardisierten Bedingungen zu messen, haben zwei Vorversuche zwischen dem 10. und 25. Februar 2022 im Labor stattgefunden. Zusätzlich wurden die Nährstoffe (Natrium, Kalium, Calcium, Ammonium, Magnesium, Nitrit, Sulfat, Chlorid, Phosphat, Nitrat) sowie die Veränderung des pH-Wertes über die Zeit erhoben. Gemessen wurde die Verdunstung von a) frischem, unstabilem Urin oder b) mit Essig stabilisiertem Urin unter 1) Raumtemperatur oder 2) unter der Zufuhr von Hitze (40 °C). Die 40 °C als Verdunstungstemperatur wurden ausgewählt, weil diese Temperatur oft auch im Urinverdunstungsmodul erreicht werden kann. Zur Stabilisierung des Urins wurde Essigsäure benutzt und ein pH-Wert von 4 angepeilt. Für den Versuch mit den vier verschiedenen experimentellen Anordnungen wurden jeweils 400 ml gekühlter, 18 h alter Urin in einem Rührmixer (HYCC Labor Magnetrührer) gerührt, bis die Flüssigkeit verdunstet war (Abbildung 8, oben). Das übriggebliebene Pulver wurde in vier Behälter abgefüllt und gemessen (Abbildung 8, unten).

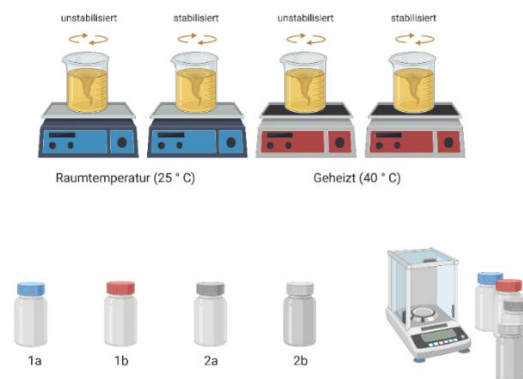


Abbildung 8: Vorversuchsaufbau in Labor mit frischem, unstabilem Urin a) mit Essig stabilisiertem Urin b) wurden unter 1) Raumtemperatur oder 2) der Zufuhr von Hitze (40°C) verdunstet. Eigene Darstellung mit Biorender.

Zusätzlich zu den Vorversuchen im Labor, wurden im Zeitraum vom 12. November 2021 bis zum 10. März 2022 drei Vorversuche am Urinverdunstungsmodul in Feldbach durchgeführt. In den Vorversuchen wurde das UVM 1 manuell vollständig mit Leitungswasser befüllt (ca. 7 Liter pro Rinne) und die Verdunstungsleistung ermittelt, sowie Verbesserungen am Modul vollzogen.

3.5.2. Verdunstungsversuche

Im Zeitraum vom 10. März bis zum 11. Mai 2022 wurden drei identische Verdunstungsversuche mit stabilisiertem Urin durchgeführt. Der stabilisierte Urin aus dem Sammeltank wurde mit einer grösseren Schlauchquetschpumpe ausgepumpt und in die UVM 1, 2a und 2b befördert. Jede Rinne im UVM 1 und UVM 2a und 2b erhielten drei Liter Urin. Proben wurden zu Beginn der Befüllung genommen, nach 7 Tagen und nach 14 Tagen. Nach der Versuchsdauer von 21 Tagen wurde die verdunstete Flüssigkeit (Endprodukt) in Form einer klebrigen Brühe aus den

Modulen abgeschabt und in Probebehälter gefüllt. Unmittelbar nach der Beprobung wurde der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Danach wurden sie filtriert, damit die Konzentration der abbaubaren Stoffe nicht verändert wird. Die Proben wurden bis zur Analyse gefroren und in 15 ml und 50 ml Plastiktubes gelagert.

3.5.3. Pflanzversuche

Im ersten Versuch wurde das gewonnene Endprodukt des verdunsteten Urins aus UVM 1, 2a und 2b in einem Kresstest auf seine Toxizität untersucht. Verglichen wurde der hergestellte Urindünger in verschiedenen Konzentrationen (1:1, 1:10, 1:100, 1:1000) mit deionisiertem Wasser als Blindlösung. Es wurden Triplikate für den Versuch verwendet. Die 1:1 Konzentration des Urindüngers betrug 100 g/l. Kressesamen (*Lepidium sativum*) wurden in Petrischalen (Semadeni) mit Rundfiltern (Whatman, Grade 1; Poren: 11 µm) kultiviert. Jede Petrischale enthielt 20 Kressesamen und wurde mit 5 ml Testgut befeuchtet. Die Petrischalen wurden nebeneinander bei Raumtemperatur bis zur Auswertung gelagert. Nach einem Zeitraum von 72 Stunden wurden die Kressekeimfähigkeit (Anzahl gekeimter Samen) und das Kressewachstum (Wurzellänge) erhoben (Abbildung 9). Die Ergebnisse (Mittelwert und Standardabweichung) wurden tabellarisch erfasst und graphisch anhand einer Dosis-Wirkungs-Kurve dargestellt. Ermittelt wurde der LC50 (Konzentration, bei welcher 50% der Population stirbt), NOEC (Konzentration, bei welcher noch keine signifikanten Effekte erkennbar sind) und der LOEC (Konzentration, bei welcher erste signifikante Effekte erkennbar sind).

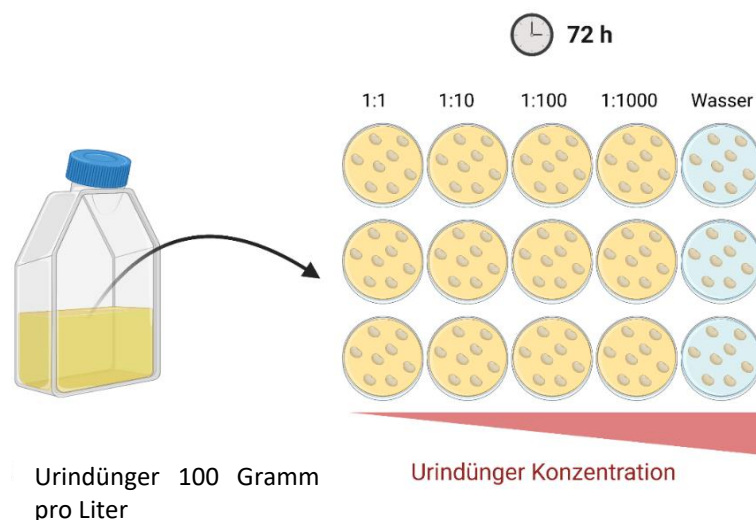


Abbildung 9: Kresseversuch mit Urindünger. Urindünger (100 g/l) wurde in verschiedenen Konzentrationen (1:1, 1:10, 1:100, 1:1000) mit der Kontrolle verglichen. Dafür wurden Kressesamen (*Lepidium sativum*) in Petrischalen (Semadeni) mit Rundfiltern (Whatman, Grade 1; Poren: 11 µm) kultiviert. Jede Petrischale enthielt 20 Kressesamen und wurde mit 5 ml Testgut befeuchtet. Eigene Darstellung mit Biorender.

In einem zweiten Versuch wurde das hydroponische Wachstum von Basilikum (*Ocimum Basilicum*) unter Verwendung des eigenen Urindüngers, eines zugelassenen Urindüngers (Vuna, Aurin) und eines konventionellen Düngers (Wuxal Universaldünger, Hauert) untersucht. Die Wachstumsleistung des Basilikums mit Urindünger wurde ab dem Keimlingsstadium verglichen. 5-7 Samen in 64 Steinwolle-Quadraten wurden zehn Tage ohne Dünger in einem Gewächshaus der ZHAW mit Leitungswasser angezogen. Die Samen wurden am 21. April 2022 gesetzt und für 10 Tage ohne Dünger angezogen. Nach der Keimung wurde jedes Quadrat auf fünf einzelne Keimlinge reduziert und fünf Wochen lang beobachtet (Abbildung 10). Je eine Rako-Kiste wurden mit 5 Liter Urindünger 1 (High: 2 g/l), Urindünger 2 (Low: 0.2 g/l), Aurin (10 ml/l) oder Wuxal (20 ml/l) befüllt. Für den Urindünger wurde ein Gemisch der Pulver der UVM 1 und 2a verwendet. Je zwölf Replikate mit fünf Basilikumkeimlingen wurden pro Anwendung verwendet. Die Nährstofflösungen wurden zwei-wöchentlich verbraucht und wieder aufgefüllt.

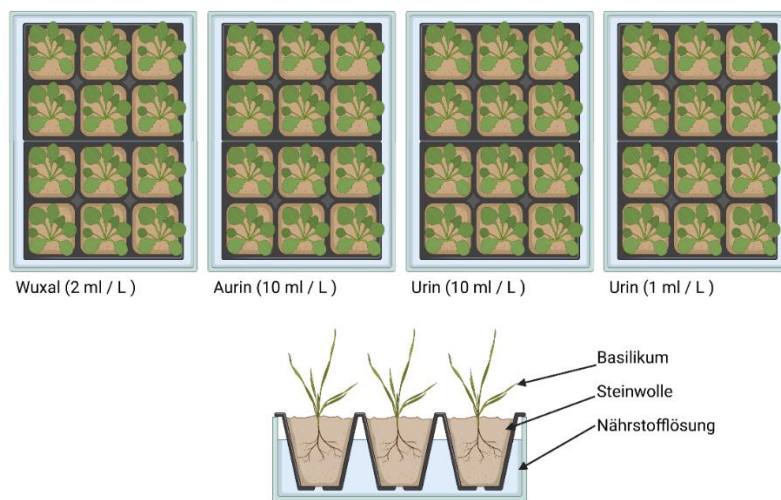


Abbildung 10: Hydroponischer Pflanzversuch mit Basilikum (*Ocimum Basilicum*) mit den vier verschiedenen Düngern (Wuxal, Aurin, Urin High und Urin Low). Je zwölf Steinwollequadrate wurden auf fünf Basilikumkeimlinge reduziert. Eigene Darstellung mit Biorender.

Der Wachstumsstand der Pflanzen wurde jede Woche dokumentiert und Fotos der Versuche gemacht. Nach einem Zeitraum von fünf Wochen wurden Länge und Gewicht von Blättern, Wurzeln und Anzahl Keimblätter gemessen, um die Wachstumsleistung des Basilikums unter den verschiedenen Düngebedingungen zu vergleichen. Zudem wurde die Farbe der Blätter qualitativ verglichen. Die Blätter der Proben wurden an NovaCropControl gesendet, um die aktuelle Nährstoffaufnahme der Pflanze zu analysieren (Zucker, pH-Wert, EC, Kalium, Kalzium, Magnesium, Natrium, Ammonium, Nitrat, N-gesamt, Chlorid, Schwefel, Phosphat, Silizium, Eisen, Mangan, Zink, Bor, Kupfer, Molybdän, Aluminium).

3.6. Chemische Analysen

Alle Urinproben wurden an der ZHAW auf ihren Nährstoffgehalt analysiert. Die Kationen (Natrium, Potassium, Calcium, Ammonium, Magnesium) und Anionen (Nitrit, Sulfat, Chlorid, Phosphat, Nitrat) wurden mittels Ionenchromatographie (Metrohm, 930 Compact IC Flex) gemessen. In einem Vorversuch wurden verschiedene Verdünnungsreihen getestet (1:10, 1:20, 1:50, 1:100, 1:200, 1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000). Der totale Stickstoffgehalt und der totale Phosphorgehalt wurden mittels Photometrie bestimmt (Standardmethode Hach-Lange, AP3900). Die elektrische Leitfähigkeit (EC) und der pH-Wert wurden mittels Multisonde getestet (Hach, HQ40d). Das Endprodukt der Verdunstung wurde mit Wasser aufgelöst (1 g Pulver / 10 ml Wasser) um so einen Flüssigdünger zu erstellen.

3.7. Statistische Auswertung

Die untersuchten Parameter (Wurzellänge und Gewicht von Basilikum von verschiedenen Düngern; Verhältnis Chlorid / Ammonium zu Ausgangsverhältnis) wurden mit einer einfaktoriellem Varianzanalyse (ANOVA) verglichen, vorausgesetzt Normalverteilung und Homoskedastizität konnten nachgewiesen werden. Bei heterogenen Varianzen wurden zentrale Tendenzen mit einem Welch-*t* Test nachgewiesen. Bei Verletzung der Normalverteilung ist der Kruskal-Wallis Test eingesetzt worden. Für die *post-hoc* Analyse wurde der paarweise Wilcoxon Test mit Fehlerinflationskorrektur nach Holm, sowie der Tukey Honest Significance Difference (HSD) Test, zur Bestimmung von signifikanten Unterschieden von Gruppenmittelwerten, eingesetzt. Die Normalverteilung wurde mittels Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov Test untersucht. Die Varianzhomogenität über alle Stichproben wurde mit Hilfe des Bartlett Test nachgewiesen. Alle Analysen wurden mit R (Version 3.5.1) in Kombination mit RStudio (Version 1.1.171) realisiert (R Development Core Team, 2019). Statistische Tests wurden zweiseitig durchgeführt, das Signifikanzniveau wurde auf Alpha = 5% (α -Wert= 0.05) festgelegt.

Der Prüfgrösse der Kresseversuche wurde wie folgt berechnet:

$$PG = \frac{x_1 + x_2}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}}$$

Überschreitet die Prüfgrösse PG den Tabellenwert *t* der *t*-Verteilung in Abhängigkeit der gewählten Wahrscheinlichkeit (95%) sind die Mittelwerte unterschiedlich.

4 Resultate

4.1. Wetterdaten, Säuredosierung, Pegelstand und Luftstrom

Um eine optimale Nährstoffrückgewinnung aus dem Urinverdunstungsmodul zu ermöglichen, benutzten wir ein Set von Sensoren um etwa den Zeitpunkt der Toilettenbenutzung, den Pegelstand der zu verdunstenden Flüssigkeit und die Wetterdaten im Verdunstungsgehäuse zu verfolgen.

Der Präsenzmelder in der Trockentrenntoilette erwies sich als geeignet. Die durch den Sensor geregelte zugeführte Säuremenge, sowie der Zeitpunkt der Injektion stabilisierten den Urin und der pH-Wert war zu den fünf Messzeitpunkten nie höher als 4. Ab Mitte März musste dieser Sensor aufgrund eines Steuerungsproblem, welches auf den Hersteller Comtexis zurückzuführen ist, ausgeschaltet werden. Ab diesem Zeitpunkt wurde der gesammelte Urin einmal wöchentlich manuell mit Putzessig stabilisiert. Die manuelle Stabilisierung erwies sich aber als ungeeignet: die wöchentlichen pH-Messungen ergaben immer Werte über pH-Wert 4.

Das Steuerungsproblem verursachte zusätzlich Stromunterbrüche. Bei Stromunterbruch schaltete die programmierte Time Lapse Kamera aus und Fotos wurden nur bis zum ersten Stromunterbruch aufgenommen. Deshalb wurde der Raspberry Pi umprogrammiert, sodass die Kamera ohne WLAN und trotz Stromunterbrüchen weiterläuft. Beispiele von Bildern der Kamera sind im Anhang C zu finden. Da die Verdunstung viel zu langsam fortschritt, waren die Bilder keine geeignete Methode, um den genauen Urinstand zu messen. Auf den Bildern konnte nur schwer abgelesen werden, wie viel Urin verdunstet wurde. Zudem reflektierte der Messmeter je nach Sonnenstand, was die Bilder zum Teil unbrauchbar machte. Ein weiteres Problem war, dass die Kamera lediglich das rechte Ende der Rinne fotografierte, da die Rinne aber leicht gebogen war, verdunstete die Flüssigkeit am Rand schneller als in der Mitte.

Auch der Pyranometer (Campbell Scientific, CR6Series) zeichnete Daten nur bis zum erwähnten Stromunterbruch auf. Das Problem konnte gelöst werden, indem der Pyranometer an eine externe Stromversorgung angeschlossen wurde.

Die Sonde des installierten WLAN-Wassermelder (Pearl, ZX5004) erwies sich als geeignet für Flüssigkeiten im neutralen Bereich. Er löste sich aber im sauren Milieu (pH-Wert 4) des Urins bereits nach der ersten Woche im Urin auf (Abbildung 11).

Die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren erwiesen sich als geeignet und waren kongruent mit den Daten von MeteoSchweiz.

Die Prüfröhrchen von Dräger erwiesen sich als wirksame Methode zur Überprüfung der Luftströmungen. Bilder der Luftströmung sind im Anhang F zu finden.



Abbildung 11: Von links nach rechts: Aufgelöster WLAN-Wassermelder, Datenlogger des Pyranometers und Sensor für Sonneneinstrahlung.

4.2. Vorversuch

4.2.1. Labor

Mit den Vorversuchen im Labor wurde die ungefähre Verdunstungsleistung ermittelt. Die Experimente ergaben eine Verdunstungsleistung bei Raumtemperatur von im Durchschnitt 28.18 ml/d und bei 40 °C eine um das 10-Fach höhere (Durchschnitt 282.35 ml/d). Pro Quadratmeter würden bei Raumtemperatur also 3.5 l pro Tag verdunsten, während es bei 40 °C entsprechend bereits 35.3 l wären. Neben der Temperatur, zeigte sich - auch wenn viel weniger deutlich - trotzdem ein Unterschied in der Verdunstungsrate von stabilisiertem und ungestabilisiertem Urin, dies aber aufgrund der Platzierung, da die Beiden stabilisierten Proben in der Mitte standen und so mehr Abwärme der Heizplatten erhielten. Das Resultat der Verdunstung war eine zähflüssige Masse. In Abbildung 12 ist die Volumereduktion von stabilisiertem und ungestabilisiertem Urin abgebildet unter den beiden experimentellen Bedingungen (Raumtemperatur und 40 °C).

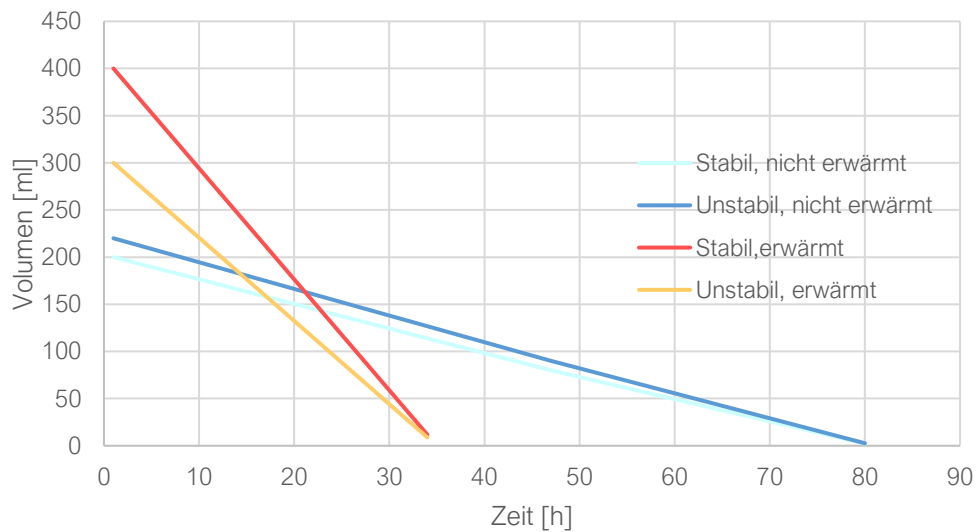


Abbildung 12: Volumen des Vorversuchs im Labor von stabilisiertem und unstabilisiertem Urin während Raumtemperatur und während der Erwärmung auf 40°C. In ca. 40 h konnte im erwärmten Versuch ca. 400 ml stabilisierter Urin verdunsten und ca. 300 ml unstabilisierter Urin. Bei Raumtemperatur konnte in der doppelten Zeit nur gerade die Hälfte verdunstet werden.

In allen vier Bedingungen veränderte sich der pH-Wert über die Zeit. Beim unstabilisierten Urin lag der pH-Wert bei 6.57 und stieg bei Lagerung bei Raumtemperatur auf 7.69 (1a). Beim unstabilisierten Urin unter erwärmten Bedingungen stieg er auf 7.39 (2a). Das weist darauf hin, dass der Urin verdunstete, bevor die vollständige Hydrolyse stattgefunden hatte (vollständige Hydrolyse bei pH-Wert über 9). Auch der pH-Wert des stabilisierten Urins stieg leicht an, bei Raumtemperatur von 3.92 auf 4.04 (1b) und bei 40 °C von 3.97 auf 5.17 (2b). Im Anhang G ist die Veränderung des pH-Wertes über die Zeit dargestellt.

Im Labor wurden zusätzlich erste Nährstoffmessungen vorgenommen um sinnvolle Verdünnungsreihen mit Wasser zu eruieren. Die Messungen mit Hach-Lange-Photometrie erwiesen sich bei hohen, stark schwankenden Nährstoffkonzentrationen als ungeeignet. Deshalb wurden für die weiteren Messungen Anionen und Kationen mit Ionenaustauschchromatographie gemessen (Metrohm, 930 Compact IC Flex. Die gemessenen Nährstoffkonzentrationen sind im Anhang A zu finden.

4.2.2. Feldversuche

Den Labor-Vorversuchen folgten Vorversuche im Feld, welche zum Ziel hatten, das UVM 1 im Einsatz zu testen und erste Verdunstungsleistungen in Abhängigkeit der Wetterdaten zu untersuchen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Zusammenfassung der Vorversuche im Feld mit Wasser für den Versuch 1, 2 und 3 im Urinverdunstungsmodul 1 (UVM 1) über den Zeitraum vom 12.11 2021 bis zum 10.03 2022. Überblick über die durchschnittliche innere und äussere, maximale und minimale Temperatur, sowie die durchschnittliche Feuchtigkeit und die Verdunstungsrate der verschiedenen Versuche (Versuch 1, 2 und 3) im UVM 1. Die Oberfläche von UVM 1 beträgt 0.47 m² (Alle sechs Rinnen).

Versuch	Temperatur		Min. innen		ø Luftfeuchtigkeit		Verdunstung	
	ø innen	ø aussen			innen	ausssen	[l/d]	[l/m ² /d]
V1	4.8	3.8	-1.5	24.0	91.5	91.0	0.55	1.16
V2	3.4	2.1	1.5	24.0	89.1	9.7	0.88	2.24
V3	7.2	5.5	-3.5	48.5	75.3	30.2	0.47	1.00

Der Vorversuch 1 mit Wasser im Feld lief vom 12. November bis zum 9. Dezember 2021. Während den 28 Tagen wurden 15.37 Liter Wasser verdunstet. Pro Quadratmeter wäre das eine Verdunstung von 1.16 l/d. Die durchschnittliche Temperatur im Inneren des Moduls war allgemein sehr tief, lag aber ein Grad höher als die Aussentemperatur (ausssen 3.8 °C, innen 4.8 °C). Die Maximale Temperatur innerhalb lag bei 24 °C und war somit über 10 °C höher als die maximale Aussentemperatur. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit im Innern und Äussern waren sehr hoch (nahezu gesättigt) und vergleichbar miteinander (innen 91.5% und aussen 91.0%). In Abbildung 13 (oben, links) ist zu erkennen, dass die Verdunstungsrate sich mit abnehmender Temperatur verkleinert. Eine Ausnahme bildeten die Tage 26 – 28. In dieser Zeitspanne war die durchschnittliche Temperatur zwar am kältesten (2.5 °C innen, 1.1 °C aussen) allerdings fand eine relativ hohe Verdunstung statt. Der mittlere Temperaturunterschied von Aussen nach Innen betrug +1.0 °C (± 0.5).

Der Vorversuch 2 lief zwischen dem 10. und dem 21. Dezember 2021. Da bei Rinne 5 eine undichte Stelle lokalisiert wurde, wurde sie für die Berechnungen nicht miteinbezogen. In den 11 Tagen des Verdunstungsvorversuches konnten 9.66 Liter Leitungswasser verdunstet werden. Pro Quadratmeter wäre das eine Verdunstung von 2.24 l/d. Die durchschnittliche Temperatur im Innern war ähnlich tief wie im Vorversuch 1 und lag 1.3 °C über der Aussentemperatur. Die maximale gemessene Temperatur ist mit 24 °C genau gleich wie im Vorversuch 1 und lag 7.5 °C höher als aussen. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit innen und aussen war wiederum sehr hoch und unterschied sich kaum. In der Abbildung 13 (oben, rechts) ist zu sehen, dass die Innentemperatur und Aussentemperatur parallel zueinander verlaufen. Der mittlere Unterschied von Aussen nach Innen betrug +1.3 °C (± 0.6). Die Verdunstungsrate verkleinerte sich mit abnehmender Temperatur.

Im Vorversuch 3 ist die Verdunstung zwischen dem 28. Dezember 2021 und dem 10. März 2022 gemessen worden. Zuvor wurden die erwähnten tropfenden Rinnen neu abgedichtet. Zwischen dem 13. März und dem 21. März 2022 konnten keine Veränderung der Verdunstung festgestellt werden, beziehungsweise fand teils sogar eine Zunahme des Pegelstandes in den Röhren statt. Eine Erklärung dafür wäre, dass das Moduldach nicht richtig verschlossen wurde und Regen eintreten konnte. Daher wurde diese Zeitperiode nicht in die Berechnung mit

einbezogen. In den übrigen 64 Tagen konnten 30.16 Liter Wasser verdunstet werden. Mit der Verdunstung von $1.00 \text{ l/m}^2/\text{d}$ war die Verdunstungsrate kleiner als in den anderen Vorversuchen, obwohl die durchschnittliche Temperatur im Inneren des Moduls am höchsten war ($7.2 \text{ }^\circ\text{C}$) und auch die maximale Temperatur fast doppelt so hoch wie in den anderen Versuchen lag. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit sank innen stärker als aussen. In der Abbildung 13 (unten) ist zu sehen, dass Innen- und Aussentemperatur auch hier parallel zueinander verlaufen. Der mittlere Unterschied von Aussen nach Innen war grösser als in den anderen Versuchen ($+1.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (± 1.9)). Im Allgemeinen ist zu sehen, dass je wärmer die Temperaturen, desto grösser mittlere Unterschied von Aussen nach Innen. Die Verdunstungsrate zeigte aber bei Vorversuch 3 keine klaren Zusammenhänge mit der Durchschnittstemperatur, der Maximaltemperatur oder der Luftfeuchtigkeit.

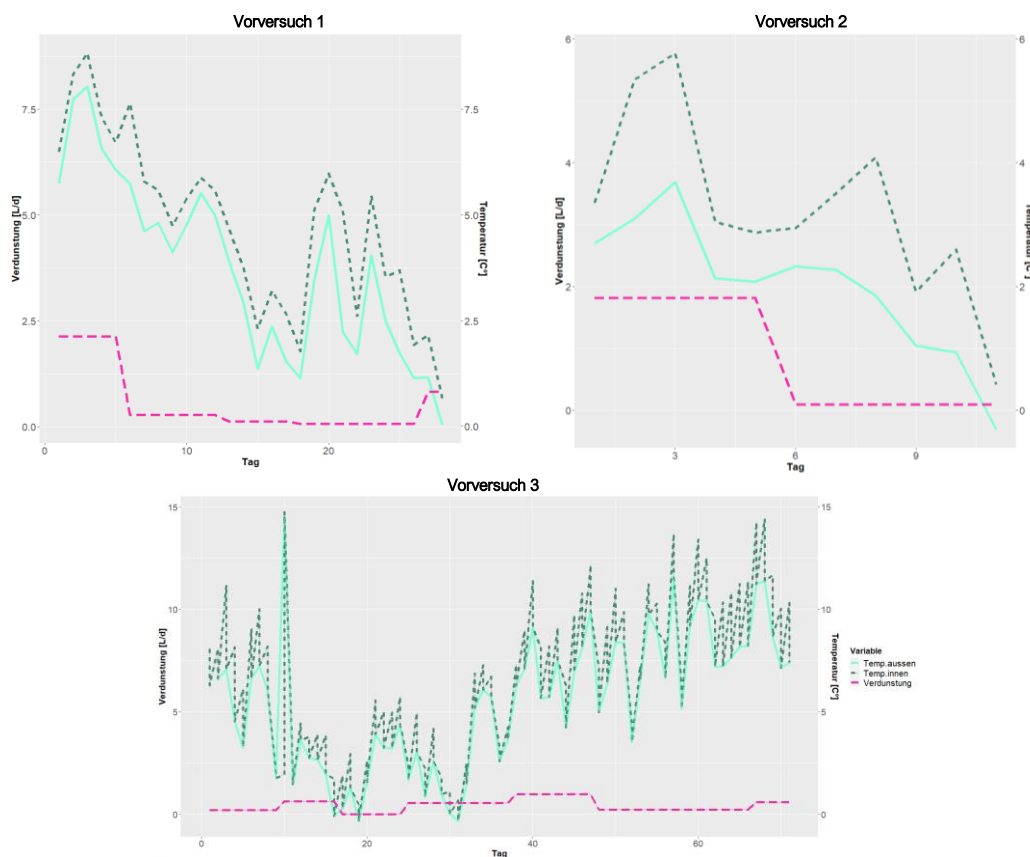


Abbildung 13: Verdunstungsrate [L/d] der Vorversuche 1-3 in Abhängigkeit der Temperatur [$^\circ\text{C}$] über die Zeitdauer von 21, 11 und 64 Tagen. Pink ist die Verdunstungsrate [L/d], hellgrün die Temperatur aussen und dunkelgrün die Temperatur innen. Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden alle 10 Minuten gemessen und danach Tagesmittelwerte gebildet. Der Pegelstand wurde nur einmal pro Woche gemessen und daraus die durchschnittliche tägliche Verdunstung berechnet.

4.3. Verdunstungsversuche Urin

Die Vorversuche wiesen zwar darauf hin, dass die Verdunstung mit der Aussentemperatur zusammenhängt, doch aufgrund technischer Probleme, konnte diese Frage nicht abschliessend

beantwortet werden. Trotzdem wurde der Hauptversuch gestartet, in welchem die Urinverdunstung der Module 1-2b gemessen wurden. Vor Beginn des Hauptversuches wurden die in der Testphase beobachteten Mängel an den Modulen behoben.

Der Hauptversuch bestand aus drei, jeweils einen Monat versetzten, Wiederholungen (V1, V2, V3) von Verdunstungsmessungen in den drei verschiedenen UVMs. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die durchschnittliche innere und äussere sowie maximale und minimale Temperatur, die durchschnittliche innere und äussere Feuchtigkeit, die Sonneneinstrahlung sowie die Verdunstungsrate der verschiedenen Versuche in den Modulen UVM 1- 2b. Die Oberfläche von UVM 1 beträgt 0.47 m² (alle Rinnen), während die Oberfläche von UVM 2a und 2b je 0.2 m² beträgt.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Verdunstungsversuche von Urin für den Versuch 1, 2 und 3 im Urinverdunstungsmodul 1 (UVM 1), Urinverdunstungsmodul 2a (UVM 2a) und dem Urinverdunstungsmodul (UVM 2b) über den Zeitraum vom 11.03 2022 bis zum 11.05 2022.

Versuche Urin										
Versuch	UVM	Temperatur				ø Luftfeuchtigkeit		Sonneneinstrahlung [W/m ²]	Verdunstung	
		ø innen	ø aussen	Min. innen	Max. innen	innen	aussen		[l/d]	[l/m ² /d]
V1	1	16.7	13.3	-1.0	56.5	52.8	63.1	170.7	0.76	1.62
V1	2a	11.4		-1.5	46.0	75.4			0.20	0.98
V1	2b	11.2		-1.0	47.5	87.5			0.10	0.54
V2	1	17.1	10.1	0.5	62.5	59.6	86.3	320.6	0.76	1.62
V2	2a	12.3		-1.5	44.0	81.0			0.16	0.80
V2	2b	12.1		-1	55.5	92.3			0.13	0.66
V3	1	20.2	15.1	6	64.5	63.9	76.5	303.1	0.87	1.85
V3	2a	16.1		4	52.5	85.5			0.16	0.80
V3	2b	15.2		4	47.5	95.9			0.14	0.70
Vorversuche Wasser										
VV1	1	4.8	3.8	-1.5	24.0	91.5	15.4	n.m	0.55	1.16
VV2	1	3.4	2.1	1.5	24.0	89.1	99.5		0.88	2.24
VV3	1	7.2	5.5	-3.5	48.5	75.3	30.2		0.47	1.00

Versuch 1 im Feld lief vom 10. bis zum 31. März 2022. In den 21 Tagen konnten im UVM 1 16.07 Liter Urin verdunstet werden. Pro Quadratmeter wäre das eine Verdunstung von 1.62 l/d. Tabelle 5 zeigt, dass die Durchschnittstemperatur im Inneren des UVM 1 16.7 °C betrug,

während die Aussentemperatur um 3.4 °C tiefer lag. Die Sonneneinstrahlung lag bei mit 170.7 W/m² relativ tief, trotzdem wurde eine Maximaltemperatur im Innern von 56.5 °C gemessen. Im Vergleich zu den Vorversuchen ist die durchschnittliche und maximale Temperatur stark gestiegen und die Luftfeuchtigkeit gesunken. Die durchschnittliche Temperatur im Inneren des Moduls und im Äusseren verlaufen relativ parallel zueinander, mit einem durchschnittlichen Unterschied von 3.5 °C (± 1.1).

Wie erwartet verdunstete aufgrund der fehlenden Dachschräge der Urin im UVM 2b langsamer als im UVM 2a (Tabelle 5). Die Verdunstung im UVM 2a war mit 0.98 l/m²/d fast doppelt so hoch als im UVM 2b (0.54 l/m²/d). Die im Inneren gemessene Durchschnittstemperatur (UVM 2a: 11.4 °C, UVM 2b 11.1 °C) unterschied sich in den beiden Modulen nicht gross, obschon UVM 2a schwarz ausgekleidet ist, während UVM 2b grau ist. Die durchschnittliche Feuchtigkeit war im UVM 2a um zirka 12% tiefer als im UVM 2b. Die Luftfeuchtigkeit innerhalb von UVM 2a (75.4%) und 2b (87.5 %) ist um mindesten 20% höher als im UVM 1 (52.8%).

Versuch 2 im Feld lief vom 31. März bis zum 21. April 2022. In den 21 Tagen wurden im UVM 1 16.03 Liter Urin verdunstet. Pro Quadratmeter wäre das eine Verdunstung von 1.62 l/d. Die Durchschnittstemperatur im Inneren des UVM 1 ist mit 17.0 °C fast gleich hoch wie im Versuch 1, während die Aussentemperatur bei 10.1 °C lag. Gemäss Pyranometermessung war die Sonneneinstrahlung im Versuch 2 aber fast doppelt so hoch wie im Versuch 1 (V1:170.7 W/m², V2: 320.6 W/m²). Mit steigender Sonneneinstrahlung stieg auch die maximale innere Temperatur an (62.5 °C). Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit innen und aussen lag leicht höher als im Versuch 1. Die durchschnittliche Temperatur im Inneren des Moduls und im Äusseren verlaufen relativ parallel zueinander. Sie unterscheiden sich im Durchschnitt um 6.8 °C (± 3.5).

Auch im zweiten Versuch war die Verdunstungsrate im UVM 2a (0.80 l/m²/d) höher als im UVM 2b (0.66 l/m²/d). Die innere Durchschnittstemperatur (UVM 2a: 12.0 °C, UVM 2b 12.1 °C) unterscheiden sich in den beiden Modulen nicht gross.

Versuch 3 im Feld lief vom 21. April bis zum 11. Mai 2022. In den 20 Tagen wurden im UVM 1 17.43 Liter Urin verdunstet. Im Versuch 3 wurde die höchste Verdunstung (1.85 l/d/m²) gemessen sowie auch die höchste Durchschnittstemperatur im Inneren (20.0 °C), während die Aussentemperatur zirka 5 °C tiefer lag. Die Sonneneinstrahlung sank im Vergleich zu dem Versuch 2 leicht (303.1 W/m²), obschon die die Maximaltemperatur leicht stieg (64.5 °C). Die durchschnittliche Temperatur im Inneren und Äusseren des Moduls verlaufen, wie bereits in den vorherigen Messungen relativ parallel zueinander. Sie unterscheiden sich im Durchschnitt 5.6 °C (± 3.4).

Im dritten Versuch war die Verdunstungsrate von UVM 2a (0.80 l/m²/d) nur noch leicht höher als im UVM 2b (0.7 l/m²/d). Im UVM 2a und 2b lag die durchschnittliche Temperatur innen in allen drei Versuchen zirka 5 °C tiefer als beim UVM 1, obwohl die gleiche Aussentemperatur gemessen worden war.

Innerhalb eines Versuches sind keine klaren Zusammenhänge der Temperatur und der Verdunstung zu sehen. In Abbildung 14 und 15 ist zu erkennen, dass die Verdunstung eher vom Zeitpunkt innerhalb des Verdunstungsexperimentes als von der Durchschnitts- oder von der Maximaltemperatur abhängt: Je fortgeschrittener der Versuch und je weniger Flüssigkeit sich innerhalb des Moduls befindet, desto schlechter verdunstet sie.

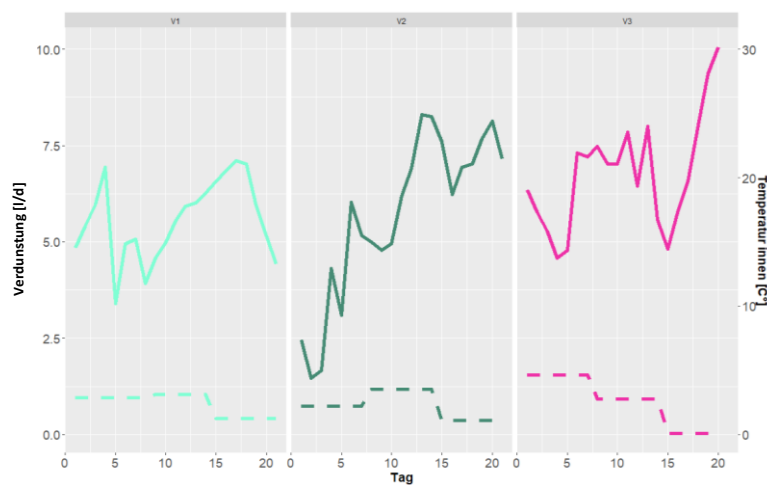


Abbildung 14: Verdunstung [l/d] über die Zeitdauer von 21 Tagen für den Versuch 1, 2 und 3 im Modul 1. Es ist keine klare Abhängigkeit von Temperatur und Verdunstung zu sehen. Gestrichelte Linien stellen die verschiedenen Verdunstungsraten dar und ausgezogene Linien bilden die Temperatur ab. Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden alle 10 Minuten gemessen und danach Tagesmittelwerte gebildet. Der Pegelstand wurde nur einmal pro Woche gemessen und daraus die durchschnittliche tägliche Verdunstung berechnet.

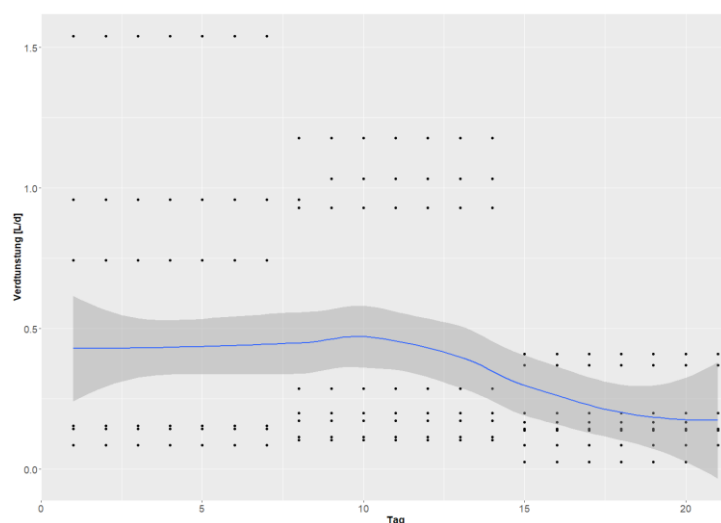


Abbildung 15: Abnehmende Verdunstungsrate gemittelt über alle drei Versuche und alle drei Module. In der letzten Woche sinkt sie Verdunstungsrate.

Auch die Sonneneinstrahlung zeigte keinen erkennbaren direkten Effekt auf die Verdunstungsrate (Abbildung 16).

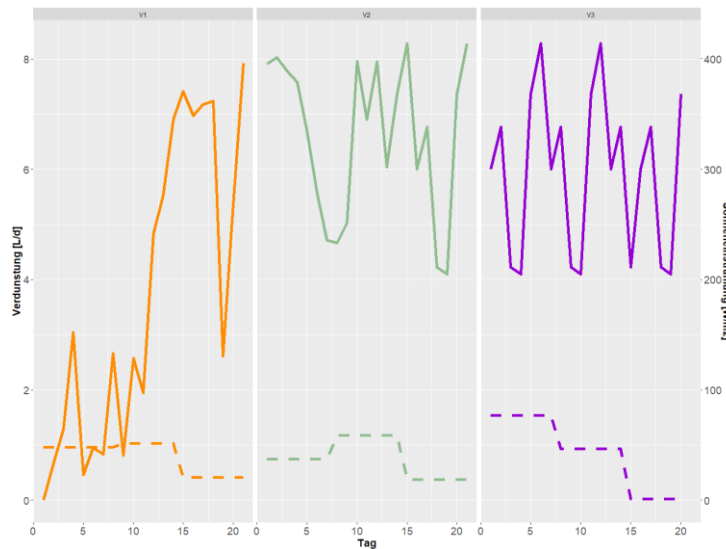


Abbildung 16: Sonneneinstrahlung im UVM 1 über den Versuch 1, 2 und 3. Gestrichelte Linien stellen die verschiedenen Verdunstungsraten dar und ausgezogene Linien bilden die Sonneneinstrahlungsstärken ab. Orange ist der Versuch eins, Grün der Versuch 2 und Violett der Versuch 3. Die Sonneneinstrahlung würde minütlich gemessen, während der Pegelstand nur einmal in der Woche gemessen wurde und daraus die tägliche Verdunstung berechnet wurde.

Im Tank konnte der Urin durch die automatische Säurezugabe stabil gehalten werden. Während den Verdunstungsversuchen änderte sich der pH-Wert allerdings trotzdem. Durch die Erwärmung stieg der pH-Wert bis auf maximal 6 an. Abbildung 17 zeigt der durchschnittliche Anstieg des pH-Wertes der drei Versuche über die Zeit. Zu Beginn ist der Anstieg flacher als am Ende des Versuches. Die Stabilisierung von Urin half auch gegen den beissenden Uringeruch. Ganz geruchslos war die Urinverdunstungsanlage jedoch nicht.

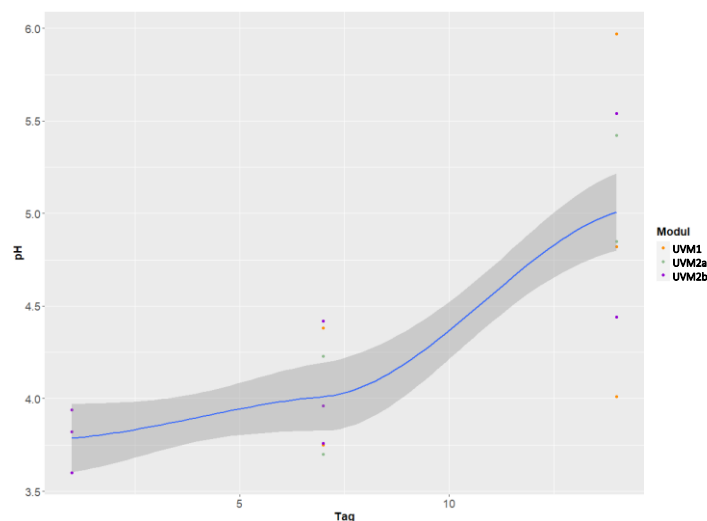


Abbildung 17: Veränderung des pH-Wertes in allen drei Versuchen über die Zeit. In der Woche 3 sind keine Messdaten vorhanden, da das Endprodukt für die Messung bereits zu trocken war. Obwohl der Urin im Tank erfolgreich stabilisiert wurde, stieg er während den Verdunstungsversuchen an.

4.4. Nährstoffveränderung

Zwar konnten wir in unseren Versuchen bezüglich Verdunstungsrate soweit keine direkte Korrelation mit der Aussentemperatur oder der Sonneneinstrahlung erkennen, doch per se funktionierte die Verdunstung in vergleichbarem Masse wie bei anderen Pilotversuchen mit Urinverdunstung (Antonini et al., 2012; Bethune et al., 2014; Bethune et al., 2016). Deshalb wollten wir in einem nächsten Schritt untersuchen, wie viel Nährstoffe in unseren Modulen aus dem verdunsteten Urin gewonnen werden können. Dabei lag der Fokus auf den Nährstoffen Ammonium, Chlorid, Kalium, und Phosphat, welche wie in der Einleitung beschrieben vor allem als Dünger eine wichtige Rolle spielen. Die Nitritkonzentration wurde unregelmässig erhoben und wird daher nicht berücksichtigt. Totaler Stickstoff (TN) und Totaler Phosphor (TP) Messungen sind fehlerbehaftet. Es wird davon ausgegangen, dass der Hach-Lange Test für TN und TP nicht funktioniert hat (Anhang G).

Die elektrische Leitfähigkeit (EC) ist ein Summenparameter aller gelösten Ionen. In Abbildung 18 ist zu erkennen, dass die Leitfähigkeit stark zunimmt von Woche 0 bis Woche 2, was auf eine Konzentration der Nährstoffe hinweist.

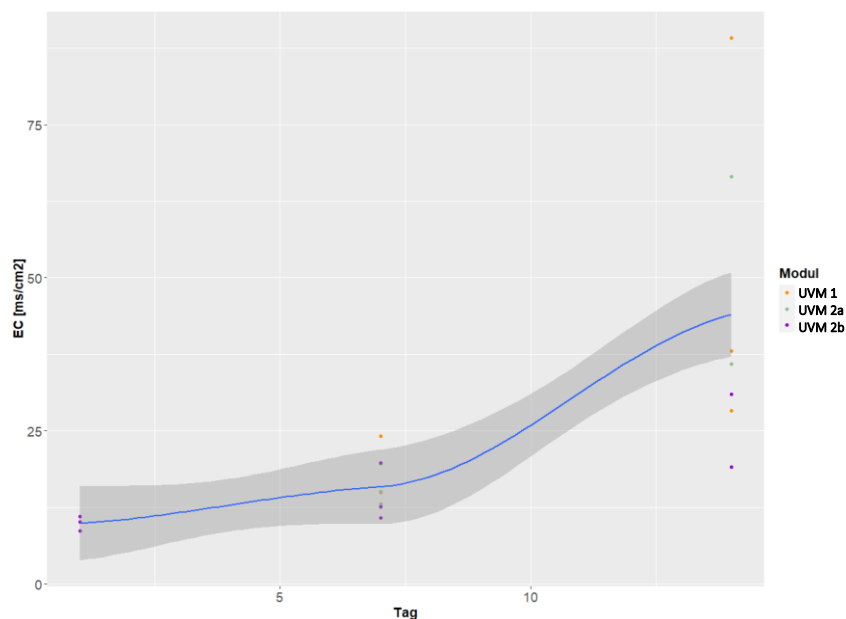


Abbildung 18: Starker Anstieg der Leitfähigkeit (EC) vom Tag 1 bis zum Tag 14. Danach konnte die Leitfähigkeit vor Ort nicht mehr überprüft werden, da das Konzentrat zu trocken war.

Schaut man die einzelnen Nährstoffe an, zeigten auch diese einen durchschnittlichen Anstieg über die Messwochen 0 bis 3 (Abbildung 19). Eine vollständige Übersicht über alle gemessenen Nährstoffe ist im Anhang D - E zu finden.

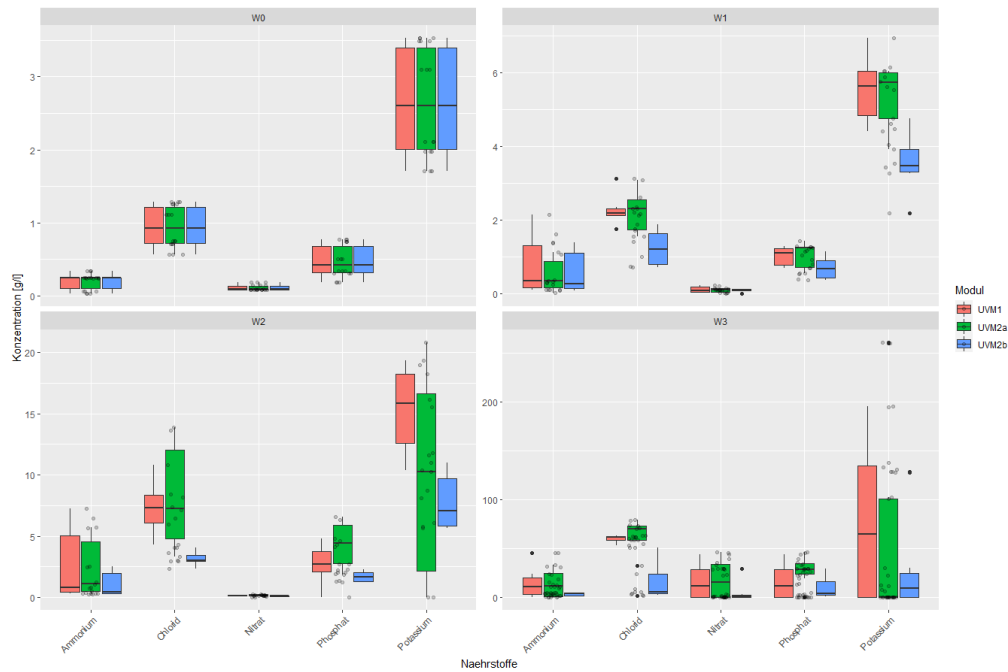


Abbildung 19: Konzentration der Nährstoffe Ammonium, Chlorid, Kalium, und Phosphat in Gramm über die Zeitdauer von drei Wochen für die UVM 1, 2a und 2b. Grundsätzlicher Anstieg der Nährstoffkonzentration ist zu erkennen.

Der Anstieg der Nährstoffkonzentrationen war über alle drei Module hinweg sehr ähnlich. Den steilsten Anstieg über die Zeit wies Kalium ($\text{coeff}=1.34$) auf, gefolgt von Nitrat ($\text{coeff}=1.32$), Ammonium ($\text{coeff}=1.29$) und Chlorid ($\text{coeff}=1.03$) (Abbildung 20 und Anhang G).

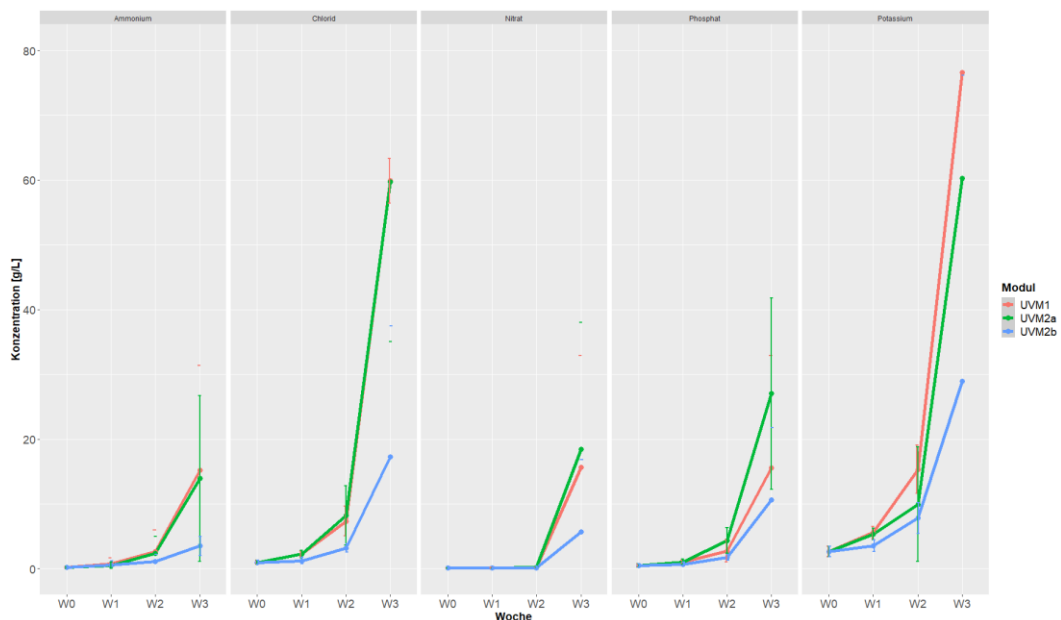


Abbildung 20: Nährstoffkonzentration von Ammonium, Chlorid, Nitrat, Phosphat und Kalium. Ein Anstieg aller Nährstoffe ist von der Woche 0 bis zur Woche 3 zu erkennen. Die Ammoniumkonzentration ist durchschnittlich um den Faktor 57 gestiegen. Die Nitratkonzentration stieg während der Versuchsdauer um den Faktor 75. Die Chloridkonzentration stieg ähnlich hoch wie die Ammoniumkonzentration um den Faktor 50. Die durchschnittliche Phosphatkonzentration ist um den Faktor 37 gestiegen und die Kaliumkonzentration um den Faktor 21.

Für die Düngeleistung ist vor allem die Endkonzentration der Nährstoffe interessant. Gemittelt über alle drei Versuche waren die meisten Nährstoffe im UVM 2a (im übrigbleibenden Pulver nach kompletter Urinverdunstung in Woche 3) enthalten (UVM 1: 301.8 g/l, UVM 2a 343.6 g/l; UVM 2b 104.6) (Abbildung 21). In allen drei Modulen wurden die höchsten Konzentrationen für Kalium gemessen, gefolgt von Chlorid.

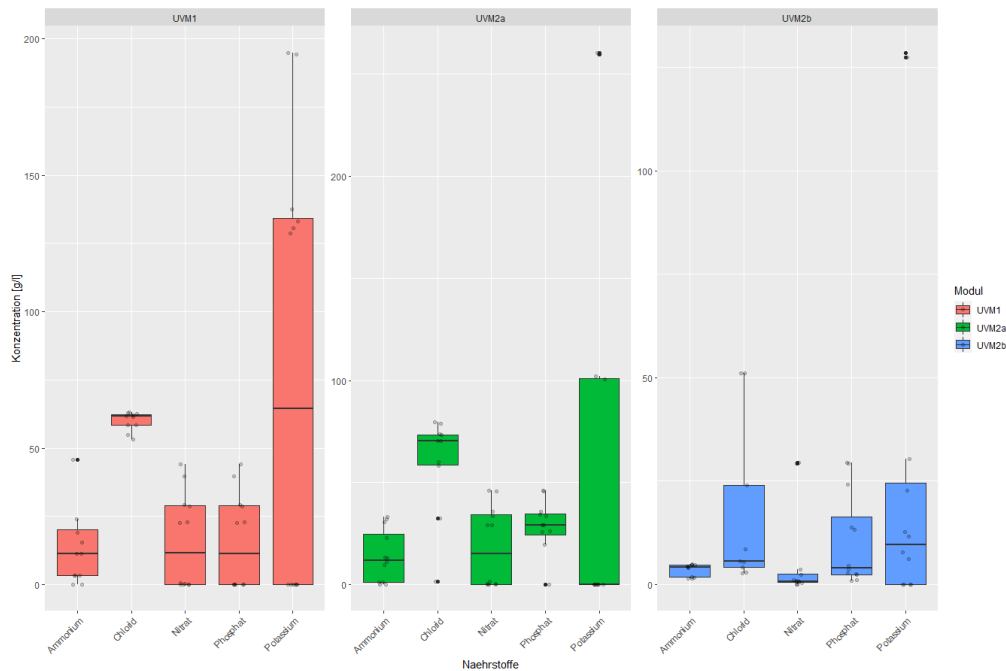


Abbildung 21: Endkonzentration der Nährstoffe im Pulver in Woche 3 (W3) vom UVM 1, 2a und 2b, gemittelt über alle drei Versuche. Im UVM 1 war 108.9 g/l Kalium, 61.0 g/l Chlorid, 7.7 g/l Nitrat, 7.6 g/l Phosphat und 5.7 g/l Ammonium enthalten. Im UVM 2a war 90.4 g/l Kalium enthalten, 53.5 g/l Chlorid, 20 g/l Phosphat, 11.6 g/l Ammonium und 7.5 g/l Nitrat. Das UVM 2b weist 28.9 g/l Kalium, 17.3 g/l Chlorid, 10.6 g/l Phosphat und 3.5 g/l Ammonium und 5.7 g/l Nitrat auf.

Der Erfolg der Stabilisierung wird über das Verhältnis von Chlorid zu Ammonium ermittelt, da Chlorid ein stabiler Nährstoff ist und sich über die Zeit nicht verändert. Wird das Verhältnis signifikant grösser, hat ein Ammonium-Verlust stattgefunden, beziehungsweise bedeutet das einen Stickstoffverlust. Für die Signifikanzprüfung wurde der Deltawert der Verhältnisse (Differenz von dem ursprünglichen Verhältnis Chlorid/Ammonium in der Woche 0 zu dem Verhältnis in Woche 1, 2 und 3) verwendet. Das Delta des Verhältnisses von Chlorid zu Ammonium unterschied sich aber in keinem Versuch signifikant über die Wochen (Abbildung 22).

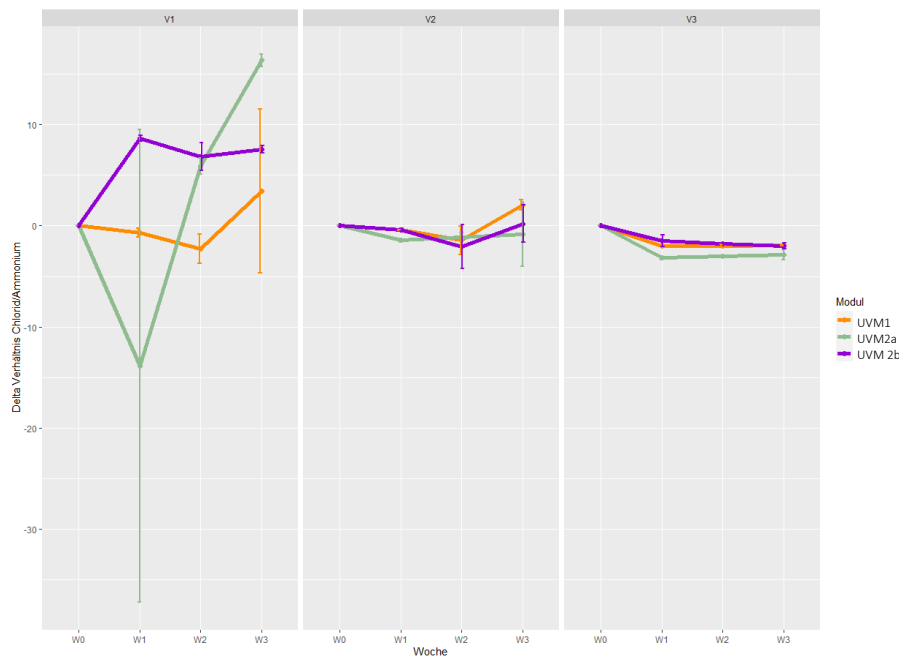


Abbildung 22: Delta des Verhältnisses von Chlorid zu Ammonium über die drei Versuche aufgeteilt in UVM1, 2a und 2b. Das Ausgangsverhältnis von Chlorid zu Ammoniak (Woche 0) war im Versuch 1 über 3-mal grösser (18.6) als im Versuch 2 (5.2) und über 8-mal grösser als im Versuch 3 (2.5). Das durchschnittliche Delta im Versuch 1,2 und 3 im UVM 1(p-wert = 0.14), 2a (p-Wert = 0.35) und 2b (p-Wert = 0.93) unterscheidet sich nicht signifikant über die Wochen.

4.5. Pflanzenversuche

Da wir durch unser Chlorid und Ammoniak-Messungen auf eine erfolgreiche Nährstoffrückgewinnung aus unseren Verdunstungsmodulen schliessen konnten, wollten wir in einem nächsten Schritt, die gewonnen Nährstoffe in Bezug auf das Pflanzenwachstum testen. Dazu wurde zuerst im Kressetest verschiedene Konzentrationen auf ihre Toxizität untersucht. Wir fanden einen signifikanten Unterschied der Wurzellänge der behandelten Pflanzen in jeder Verdünnung nachgewiesen. Alle Prüfgrössen der Verdünnungsreihen (1:1, 1:10, 1:100 und 1:1000) des Kressetests überschritten den kritischen T-Wert der t-Verteilung (95%). In der Tabelle 6 sind die Prüfgrössen, T-Wert und Wurzellängen für jede Bedingung zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung des Kressetest für die Verdünnungsreihen von 1:1, 1:10, 1:100 und 1:1000.

Verdünnung	Prüfgrösse	T-Wert	Mittelwert Wurzellänge	Standardabw. Wurzellänge	Varianz Wurzellänge
1:1	23.16	2	0	0	0
1:10	19.83	2	0.19	0.12	0.02
1:100	11.19	2	0.70	0.41	0.17
1:1000	6.56	2	1.17	0.44	0.19
Kontrolle			1.84	0.61	0.38

In der Abbildung 24 ist die Letalität dargestellt und gibt Hinweise auf toxische Nährstoffüberschüsse. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Konzentration auch die Letalität ansteigt. Derselbe Trend ist auch beim Effekt zu erkennen.

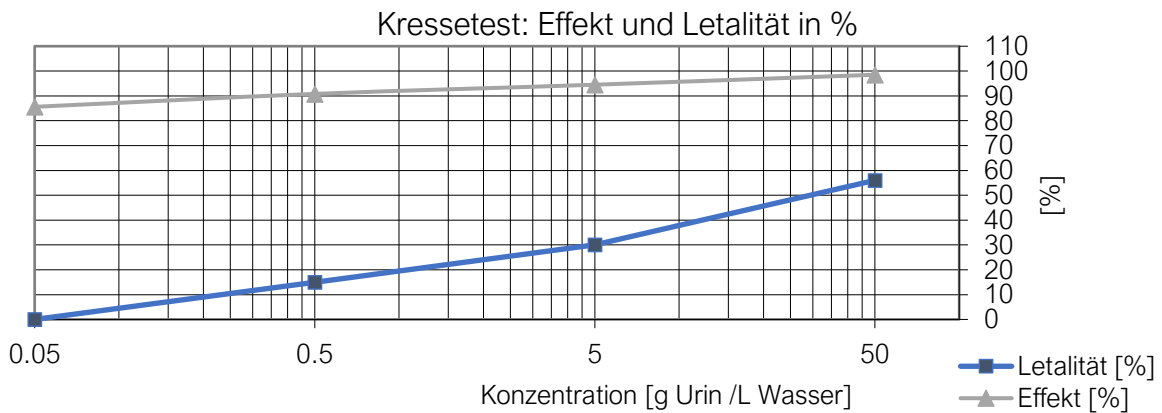


Abbildung 23: Letalität und Effekt in % in Abhängigkeit der jeweiligen Konzentration [g/l] 0.05, 0.5, 5 und 50.

Der LC50 liegt bei einer Konzentration von 30 mg/l. Der NOEC konnte nicht bestimmt werden, da schon mit der geringsten Konzentration ein signifikanter Effekt aufgetreten ist. LOEC und EC50 sind demnach schon bei einer Konzentration von 0.05 g/l erreicht (Tabelle 7). Für genauere Angaben müsste man stärkere Verdünnungsreihen testen.

Tabelle 7: Ergebnisse des Kressetests für die Parameter LC50, NOEC, LOEC und EC50.

Parameter	Erklärung	Konzentration
LC50	Konzentration, bei welcher 50% der Population stirbt.	30 g/l
NOEC	Konzentration, bei welcher noch keine signifikanten Effekte erkennbar sind.	k.E.
LOEC	Konzentration, bei welcher erste signifikante Effekte erkennbar sind.	0.05 g/l
EC50	Entweder Konzentration, bei welcher die Hälfte der Population erkennbare Effekte zeigt oder Konzentration, bei welcher der Durchschnitt der Population einen halbmaximalen Effekt zeigt.	0.05 g/l

Im zweiten Pflanzversuch wurde das hydroponische Wachstum von Basilikum untersucht. Dabei befinden sich die Pflanzenwurzeln nicht in Erde, sondern ausschliesslichen in mit Nährstoffen angereichertem Wasser. Das Basilikumwachstum wurde fotografisch während fünf Wochen festgehalten (Anhang B und Tabelle 8).

Tabelle 8: Qualitative Merkmale des Basilikumwachstum. Für High (Urindünger mit 2 g/l Verdünnung), Low (Urindünger mit 0.2 g/l Verdünnung), Aurin und Wuxal.

Dünger	Wachstum	Farbe	Wurzel	Blätter
High	Anfänglich eher langsames Wachstum, Aufholung ab Woche 4	Helles, kräftiges Grün	Sehr kurze, dicke Wurzeln	Keine Flecken
Low	Stagnation ab Woche 1	Gelb, blass	Dünne Wurzeln	Gelbe Flecken
Aurin	Kontinuierliches Wachstum	Helles, kräftiges Grün	Lange, eher Dünne Wurzeln	Dunkle Flecken, braune Flecken, Blätter sind zerknittert
Wuxal	Sehr schnelles Wachstum, danach eher stagnierend	Dunkles, intensives Grün	Sehr lange, eher dünne Wurzeln	Dunkle Flecken, braune Flecken, Blätter sind zerknittert

Die Mittelwerte des Gesamtgewichts von Pflanzen gedüngt mit Wuxal ($7.32g \pm 5.67$), High ($3.57g \pm 2.20$), Aurin ($3.51g \pm 2.69$) und Low ($0.309g \pm 0.15$) wichen allesamt signifikant voneinander ab ($p = 2.2e-16$, Anova). In der Post-Hoc Analyse unterschieden sich High und Aurin nicht voneinander, Wuxal und Low jedoch signifikant von High und Aurin (Abbildung 25).

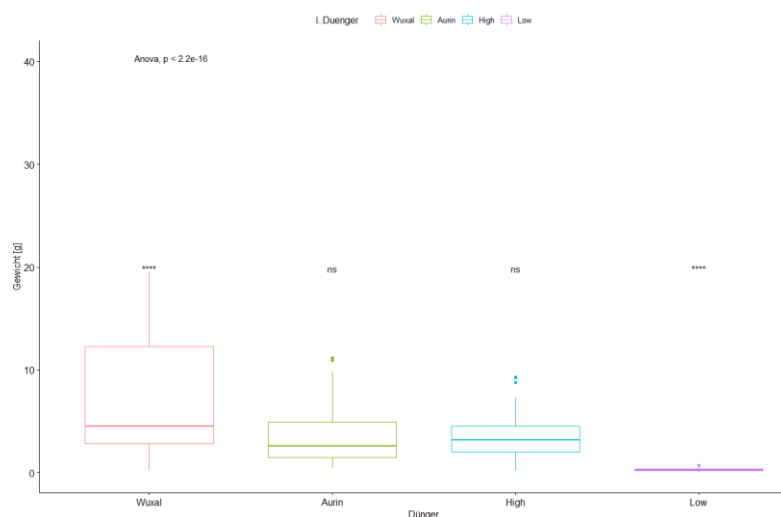


Abbildung 24: Endgewicht der Basilikumpflanzen nach 5 Wochen in den vier verschiedenen Dünger; Wuxal, Aurin, High und Low. Die Mittelwerte des Gesamtgewichts von Basilikumpflanzen gedüngt mit Wuxal ($7.32g \pm 5.67$), High ($3.57g \pm 2.20$), Aurin ($3.51g \pm 2.69$) und Low ($0.309g \pm 0.15$) weichen signifikant voneinander ab ($p = 2.2e-16$, Anova). In der Post-Hoc Analyse unterscheiden sich High und Aurin nicht voneinander, die Mittelwerte von Wuxal und von Low weichen jedoch signifikant von den anderen Treatments ab. Tukey_HSD ergab folgende p Werte; High-Aurin $p = 0.9996505$, Low-Aurin $p = 0.0000018$, Wuxal- Aurin $p = 0.0000000$, Low-High $p = 0.0000011$, Wuxal-High $p = 0.0000000$ Wuxal- Low = 0.0000000 .

Die Pflanzen unterschieden sich auch in ihrer Grösse (Abbildung 26). Die mittlere Länge der Stängel war mit dem Wuxal Dünger am grössten (22.98 cm ± 11.15) und signifikant grösser als High (19.70 cm ± 7.88), Aurin (16.06 cm ± 6.94) und Low (4.53cm ± 1.19). Mit hohen Konzentrationen des eigenen Verdunstungsdüngers (high) konnten sogar signifikant längere Stängel gemessen werden als mit dem kommerziell erhältlichen Urindünger Aurin.

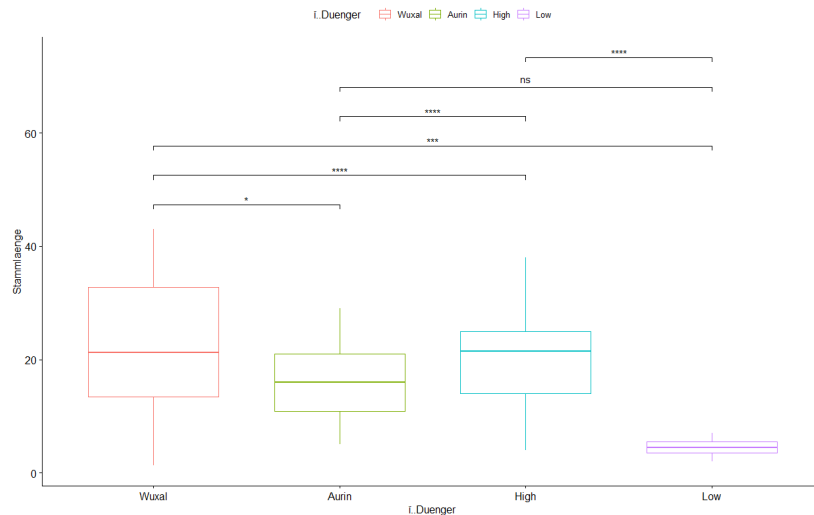


Abbildung 25: Die mittlere Länge der Stängel ist mit dem Wuxal Dünger am grössten (22.98 cm ± 11.15) und signifikant grösser als High (19.70 cm ± 7.88), Aurin (16.06 cm ± 6.94) und Low (4.53cm ± 1.19). Lediglich Aurin und High unterscheiden sich nicht signifikant. Tukey_HSD ergab folgende p Werte; High-Aurin p = 0.04, Low-Aurin p = 0.000000, Wuxal- Aurin p = 0.0000091, Low-High p = 0.0000000, Wuxal-High p = 0.0926773, Wuxal- Low = 0.0000000.

Die Nährstoffe in den unterschiedlichen Düngern wurde nach den Pflanzversuchen gemessen. Tabelle 9 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Konzentrationen.

Tabelle 9: Nährstoffinhalte der vier verschiedenen Dünger. Kein Kalium und kein Nitrit konnten gemessen werden. Angaben der Nährstoffe sind in Gramm, EC in mS/cm.

	pH	EC	Cl	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Na	Ca	NH ₄ ⁺	Mg
A	7.27	2.39	NA	7.43	0	0.02	26.39	0.51	0	5.50
W	6.90	2.00	1.71	0.17	0	3.08	NA	0.02	0	0
High	6.78	1.27	11.67	2.37	0.44	4.87	6.93	0.52	1.47	2.38
Low	7.25	0.64	1.17	0.24	0.04	0.48	0.69	0.05	0.15	0.23

Wuxal und Aurin haben deklarierte Nährstoffangaben, welche zum Teil grosse Unterschiede zu den von uns gemessenen Werten aufwiesen (Tabelle 10).

Tabelle 10 : Deklarierte Nährstoffgehalte der Dünger Aurin und Wuxal.

	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	K	NH ₄ ⁺	TN
Aurin Flasche	0.24	0.05	0.17	0.24	0.48
Wuxal Flasche	0.57	1.98	1.28	0.92	1.98

4.5.1. Nährstoffaufnahme der Pflanze

In einem weiteren Schritt wurde die Nährstoffaufnahme in der Pflanze (Basilikum) mit NovaCropControl gemessen und analysiert (Tabelle 11). Das Optimum verschiedener Parameter für das Basilikumwachstum wurde von NovaCropControl in diversen vorgängigen Versuchen ausfindig gemacht (NovaCropControl, 2022). Verglichen damit war die Düngung mit Wuxal in unserem Versuch am besten: 8 Parameter lagen im optimalen Bereich (grün). Zu hoch (rot) lagen Zucker, Stickstoff, Phosphor sowie Kalium und elf weitere lagen zu tief (gelb). Der höherdosierte Urindünger (High) hatte Stickstoff und fünf weitere Parameter im optimalen Bereich, wobei sechs Parameter zu hoch und Phosphor, Kalium und sieben weitere zu tief lagen. Aurin hat fünf Parameter im optimalen Bereich, während Stickstoff, Phosphor, Kalium und zehn weitere zu hoch lagen. Vier Parameter lagen unterhalb des optimalen Bereiches. In dem geringer dosierten Urindünger (Low) waren nur zwei Parameter im Optimum. Phosphor, Kalium und elf weitere Parameter waren zu tief, während totaler Stickstoff und sechs weitere Parameter zu hoch lagen.

Tabelle 11: Nährstoffaufnahme der Basilikumpflanzen unter den vier verschiedenen Dünger– High, Low, Wuxal und Aurin. In grün dargestellt, sind die Werte, die im optimalen Bereich lagen für das Wachstum von Basilikum. Orange Werte sind zu tief und rote Werte liegen zu hoch. Alle Nährstoffparameter sind in ppm angegeben.

Parameter	High	Low	Wuxal	Aurin
Zucker %	1.1	0.6	0.5	0.2
pH	6.5	6.2	5.8	6.6
EC mS/cm	10.9	9.3	12	17.2
K - Kalium	3841	2960	3914	6143
Ca - Kalzium	675	2426	336	139
K / Ca	5.69	1.22	11.64	44.25
Mg - Magnesium	148	515	56	66
Na - Natrium	177	17	7	86
NH ₄ -Ammonium	52	200	380	1525
NO ₃ - Nitrat	120	226	1841	3607
N aus Nitrat	27	51	416	814
N - Gesamt	814	1927	1657	3716
Stickstoff				
Cl - Chlorid	1878	959	982	2144
S - Schwefel	232	178	196	232
P - Phosphor	163	29	806	864
Si - Silizium	40.5	17.5	27.9	28.5

Fe - Eisen	1.04	0.8	0.5	1.66
Mn - Mangan	1.32	1.8	2.3	3.08
Zn - Zink	1.51	10.92	1.29	3.82
B - Bor	0.89	0.75	2.36	2.91
Cu - Kupfer	0.37	0.25	0.41	0.61
Mo - Molybdän	0	0.07	0	0
Al - Aluminium	0.97	1.18	0	0.69

Die Abbildung 27 verdeutlicht wie erwartet, dass Aurin eher hohe Anteile an Nährstoffen aufweist, während Low eher zu geringe Nährstoffkonzentrationen zeigt.

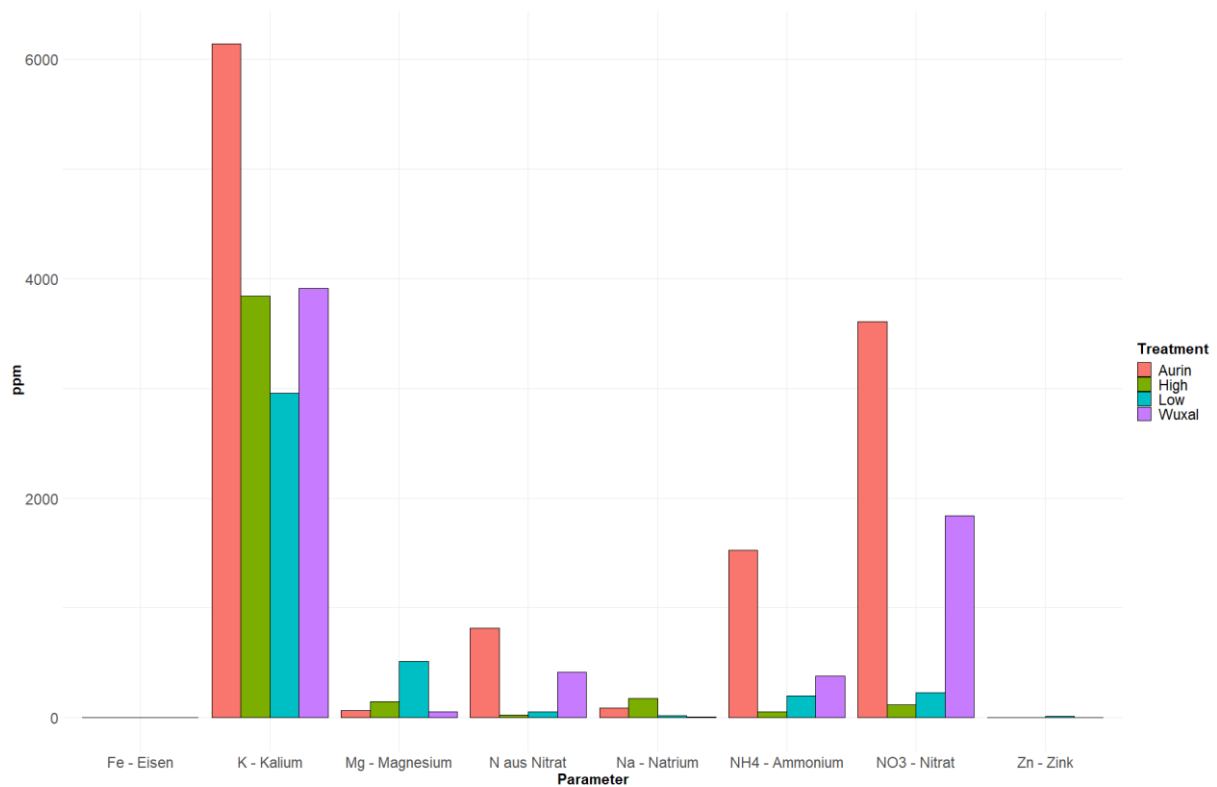


Abbildung 26: Verschiedene Nährstoffe (ppm) der Basilikumpflanzen in Aurin, High, Low und Wuxal. Aurin weist eher hohe Anteile an Nährstoffen auf, während Low eher zu geringe Nährstoffkonzentrationen zeigt.

Am Ende des Versuches wurden die Basilikumpflanzen auf Farbveränderungen der jungen und alten Blätter untersucht, um negative Effekte der Urindüngung auszuschliessen. In Abbildung 28 ist ersichtlich, dass mit Low gedüngte Pflanzen sehr helle Blätter entwickelten und fast keine jungen Blätter wuchsen. Vereinzelt sind braune Flecken zu erkennen. Die Pflanzen sind klein und verkümmert. Die Blätter sind zudem hart und zerknittert. Pflanzen mit dem Aurin hingegen hatten ein kräftiges Grün und sahen insgesamt gesund aus. Zum Teil waren aber an den jungen und älteren Blättern braune und graue Verfärbungen zu sehen. An den alten Blättern sah man

zudem vereinzelt auch schwarze Flecken. Ähnliche Verfärbungen waren auch an den Blättern mit Wuxal-Treatment zu erkennen. Das Grün war intensiver als in allen anderen Treatments. Die Pflanzen waren buschig und kräftig und schienen sehr stabil. Die älteren Blätter waren zerknittert. Die Blätter mit dem High-Treatment waren hellgrün und hatten keine Verfärbungen.

Low**Aurin****Wuxal****High**

Abbildung 27: Blätter von Basilikumpflanzen mit verschiedenen Verfärbungen.

5 Diskussion

F1: Ist die Konstruktion des Urinverdunstungsmoduls sowie die getestete Stabilisierung geeignet für den Einsatz im Feld? Gibt es Konstruktionsarten, die geeigneter sind als andere?

Die erste Forschungsfrage untersuchte die Eignung der Urinverdunstungsmodule und der Urinstabilisierung für den Einsatz im KREIS-Haus. Die Daten haben gezeigt, dass die Evaporation von menschlichem Urin durch verschiedene Urinverdunstungsmodule möglich ist. Mit dem Dräger-Prüfröhrchen konnte in allen drei Modulen einen Luftstrom vom Einlass über die Urinfläche bis zum Auslass nachgewiesen werden. Bei einer Oberfläche von 0.47 m^2 (UVM1) dauerte es ca. 21 Tage, um die vollständige Verdunstung der flüssigen Fraktion von ± 18 Litern unverdünntem Urin zu erreichen. Dies entspricht einer durchschnittlichen Verdunstungsrate von $1.7 \text{ l/m}^2/\text{d}$. Die durchschnittlichen Verdunstungsraten von den UVM 2a ($0.86 \text{ l/m}^2/\text{d}$) und 2b ($0.63 \text{ l/m}^2/\text{d}$) sind kleiner als die des UVM 1 ($1.7 \text{ l/m}^2/\text{d}$). Beim UVM 2b ist das auf den fehlenden Kondensationsablauf zurückzuführen. Das am Glas kondensierte Wasser kann durch die fehlende Dachschräge nicht ablaufen und so aus dem Modul austreten. Überprüft werden müsste, ob dadurch auch die erhöhte Luftfeuchtigkeit im Inneren des UVM 2b erklärt werden könnte (Durchschnittlich 11% höher als UVM 2a). Beim UVM 2a könnte die geringeren Oberflächen/Volumenverhältnis für die geringere Verdunstungsleistung ausschlaggebend sein. Zudem sind der Einlass und Auslass beim UVM 2a relativ klein, was den durchfliessenden Luftstrom verringert. Es wird vermutet, dass der Unterschied aber nicht ganz so gross ist wie angegeben, da das Endprodukt von UVM 2a trockener aussah als das des UVM 1. Die Verdunstungswerte sind vergleichbar mit anderen Feldstudien. In einem ähnlichen Versuchsaufbau erreichten Antonini et al. (2012) mit passiver Verdunstung eine Verdunstungsrate von $1 \text{ l/m}^2/\text{d}$. Bethune et al. (2014) erzielten in ihrem ersten Versuch eine Verdunstungsrate von $1.5 \text{ l/m}^2/\text{d}$. Durch eine verbesserte Luftströmung steigerten Bethune et al. (2016) die Verdunstungsrate auf $2.7 \text{ l/m}^2/\text{d}$. Dutta & Vinnerås (2016) erzielten $0.64 \text{ l/m}^2/\text{d}$ bei $35 \text{ }^\circ\text{C}$, 70% relativer Luftfeuchtigkeit und einem Luftstrom von 1 L/min . Im Vergleich zu den durchgeführten Laborversuchen, ist die in den Versuchen erreichte Verdunstungsleistung aber relativ klein. Unter Raumtemperatur konnte im Labor eine Verdunstung von $3.5 \text{ l/m}^2/\text{d}$ und bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ sogar eine Verdunstung von $35.3 \text{ l/m}^2/\text{d}$ erreicht werden. Zusätzlich wurde im Laborversuch einen Luftabzug verwendet, um Gerüche zu entfernen. Dieser sorgte für einen konstanten Luftstrom, was die Verdunstung beschleunigte. Ähnliche Ergebnisse erzielten Simha, Lalander, et al. (2020) bei Versuchen mit aktiver (zusätzlicher Energie) Verdunstung. Bei einer Temperatureinstellung von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ erzielten sie eine Verdunstungsrate von $27 \text{ l/m}^2/\text{d}$.

Im KREIS-Haus fallen pro Monat ca. 48 Liter Urin an. In 30 Tagen würden aber nur durchschnittlich 26 Liter Urin verdunsten. Dieses Resultat ist jedoch aufgrund Mängel an der Messmethode nur bedingt interpretierbar. Da die Fotos vom Raspberry Pi zu wenig genau waren und nicht verwendet werden konnten, konnte der exakte Zeitpunkt der Verdunstung nicht eruiert werden. Die vollständige Verdunstung fand daher zwischen dem Tag 14 und 21 statt. Würde man annehmen, dass die Verdunstung bereits am 15. Tag erfolgte, wären trotzdem erst 36 Liter der 48 angefallenen Liter pro Monat verdunstet. Das Modul müsste daher grösser konzipiert werden. Um eine vollständige Verdunstung der 48 Liter zu erreichen, müsste das UVM 1 mit fünf zusätzlichen Rinnen ausgestattet werden (Annahme: Verdunstung dauert 21 Tage).

Hinweise, dass die Verdunstung schon früher beendet war, gibt die abnehmende Verdunstungsrate in der letzten Woche des Versuchs (Kapitel 4.3). Eine weitere Erklärung für die abnehmende Verdunstungsrate gegen Versuchsende könnte die Zunahme der Viskosität sein. Je tiefer der Wassergehalt in der Brühe ist, desto langsamer schreitet die Verdunstung voran. Am Ende der Verdunstung war die Urinbrühe zusätzlich mit einer harten Schicht überzogen, die den Austausch mit der Luft erschwerte. Ren et al. (2021) berichten in ihrem Versuch von einer Bildung von festen Nährstoffen, welche die Oberfläche bedeckten und die Lichtabsorption behinderten.

Eine weitere Schwierigkeit bei der genauen Bestimmung des Verdunstungszeitpunktes liegt bei der Definition von «vollständiger Verdunstung». Die Verdunstung kann verschiedene Stadien annehmen (Kapitel 2.5). Damit das Stadium der Verdunstung abgeschätzt werden kann, müssten genauere optische Erfahrungswerte vorliegen oder Gewichtsmessungen vorgenommen werden, welche den exakten Wassergehalt bestimmen.

Säurestabilisierung

Die automatische Säurestabilisierung mittels Präsenzsensoren stellt sich als geeignet heraus. Durch die gleichzeitige Injektion von Urin und Säure werden diese im Moment des Austretens durchmischt und stabilisiert. Durch das beschriebene Steuerungsproblem musste der Urin über eine gewisse Zeitdauer manuell stabilisiert werden. Durch die manuelle Stabilisierung erreichte der Urin ungenügende Stabilisierungswerte (pH-Wert grösser als 4) und es kam zu unwirtschaftlichem Einsatz von Essigsäure. Möglicherweise konnte keine geeignete Durchmischung zwischen Essig und Urin erreicht werden. Riechmann et al. (2021) lösten dieses Problem mit einer Mischungsanlage. Auch andere Studien zeigen, dass die direkte Zugabe von Säure wesentlich effizienter und wirtschaftlicher ist als die nachträgliche (Hellstrom et al., 1999; Udert et al., 2006).

Die Stabilisierung mit Säure ergab entgegen den Erwartungen kein kristallartiges Pulver, sondern eine zähflüssige Brühe (Abbildung 28, Mitte). Zu den gleichen Erkenntnissen führte auch eine andere Studie mit Säurestabilisierung (Telefon Michel Riechmann, 2022). Eine kristallartige Pulverform wird eher durch eine basische Stabilisierung mit Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) erreicht (Riechmann et al., 2021).

Die Stabilisierung im Tank hat mit einer automatischen Dosierung gut funktioniert. In den Modulen ist der pH-Wert aber trotzdem angestiegen, jedoch weniger stark als in den unstabilierten Versuchen im Labor. Andere Versuche bestätigen den leichten Anstieg des pH-Wertes bei Essigstabilisiertem Urin (Boncz et al., 2003). In unserem Versuch gab es Hinweise, dass die Steigung des pH-Wertes am Anfang weniger steil war als am Ende. Das könnte darauf hindeuten, dass die Zunahme des pH-Wertes nicht linear, sondern exponentiell ansteigen könnte. Dies müsste aber in weiteren Versuchen über einen längeren Zeitraum geprüft werden.

Konstruktion

Die Handhabung des UVM 1 im Feld erwies sich als mässig geeignet. Durch die saure Umgebung wurde die Abdichtungsmasse beschädigt und undicht. Daher musste das Modul zu drei Zeitpunkten neu abgedichtet werden. Undichte Stellen haben zum einen die Messungen verfälscht und zum anderen die hygienische Handhabung erschwert. Im sauren Milieu sind diverse Schrauben in kürzester Zeit gerostet und hielten schlechter. Dadurch waren die Rinnen zum Teil nicht mehr horizontal ausgerichtet. Die meisten eingesetzten Teile waren Restmaterialien mit ungleichen Massen, was die horizontale Montage zusätzlich erschwerte. Durch hohe Temperaturen im Inneren des Moduls wurden die PVC-Rinnen stark verbogen (Abbildung 28 rechts). Das Plexiglas zur Abdeckung erhielt durch starke Temperaturunterschiede vom Glas zur Aussentemperatur einen Riss. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass das Modul zu jedem Zeitpunkt dicht war. Um die Handhabung und Messgenauigkeit zu erhöhen, müssten stabilere und widerstandsfähige Konstruktionsmaterialien verwendet werden. Eine Möglichkeit wäre eine wellblechartige, metallische Konstruktion, die auf den Seiten geschweisst wird. Beim Einsatz von Metallen muss darauf geachtet werden, dass diese durch die Säure nicht korrodieren; eine Möglichkeit wäre Edelstahl. Eine solche Konstruktion würde mit erhöhten Kosten einhergehen, weshalb eine ausgeprägte Kosten-Nutzen-Analyse der eingesetzten Materialien wichtig ist, um das Verdunstungsmodul nachhaltig zu optimieren.

Nach der Verdunstung musste das Endprodukt abgeschabt werden. Da die Rinnen gewölbt sind, hatte sich ein Küchenlöffel als für diese Aufgabe geeignet herausgestellt. Die Arbeit wurde dadurch aber unhygienisch.



Abbildung 28: Von links nach rechts: Nährstoffschicht auf dem Urin; Zähflüssige Brühe; Verbogene Rinnen.

Aufgrund der eruierten Defizite am UVM 1 wurden die UVM 2a und 2b erstellt. Das sind einfachere Module, welche aus stabilerem Material gebaut wurden. Da sie nur aus einer Einheit mit Deckel bestehen, ist die Handhabung und Wartung einfacher. Die UVM 2a und 2b haben einen flachen Boden, was die Entfernung des Endproduktes erleichtert. Aber auch die UVM 2a und 2b haben sich mit der Zeit leicht verbogen. Die Abdichtung des Deckels des UVM 2a wurde mit einem Schaumstoff vorgenommen. Witterungsbedingt musste dieser mehrfach ersetzt werden. Daher konnte auch bei diesem Modul nicht zu jedem Zeitpunkt eine Verdünnung mit Regen ausgeschlossen werden.

Im Hinblick auf die Skalierung von Urinverdunstungsmodulen sollten die Module eine einfache und hygienische Handhabung erlauben. Es wird vermutet, dass die soziale Akzeptanz bei UVM 2a und 2b grösser ist als bei UVM 1, da deren Betrieb und Wartung weniger komplex ist.

F2: Welchen Einfluss haben Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und Temperatur auf die Verdunstungsrate?

Um den Einfluss der Temperatur, Sonneneinstrahlung und der Luftfeuchtigkeit zu messen, wurden verschiedene Sensoren innerhalb und ausserhalb der Module installiert. Es war in diesem Versuch nicht möglich, einen direkten Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Temperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit und der Verdunstungsrate aufzuzeigen. Dazu sind die Messungen des Urinstandes zu ungenau und wurden zu wenig oft ausgeführt.

Urinstandmessungen mit dem Massstab können schnell zu einer Ungenauigkeit von bis zu fünf Millimetern führen. Für eine klare Aussage müsste ein Gewichtslogger eingebaut werden. Zusätzlich müssten Messungen mindestens täglich, besser aber stündlich erfolgen.

Eine gewisse Abhängigkeit der Verdunstungsrate von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ist aber trotzdem zu erkennen. In den Versuchen mit Wasser (zwischen Dezember und März) waren die Temperaturen durchschnittlich 12.9°C tiefer und die Luftfeuchtigkeit 26.3% höher (keine Vergleiche für Sonneneinstrahlung). In dieser Periode war auch die Verdunstungsleistung im UVM 1 um ca. $0.3 \text{ l/m}^2/\text{d}$ kleiner. Zusätzlich ist bei einem Versuch durch undichte Stellen wahrscheinlich Wasser ausgetreten. Würde man diesen Versuch vernachlässigen, wäre die Verdunstungsrate um fast $0.7 \text{ l/m}^2/\text{d}$ kleiner. Zudem wurde ersichtlich, dass mit steigenden Temperaturen der Unterschied zwischen den Modulen kleiner wurde.

Andere Studien konnten aufzeigen, dass die Verdunstungsrate mit stabilisiertem Urin mit der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur der Umgebung korrelieren (Riechmann et al., 2021). Je höher die Temperatur, desto höher die Wasserhaltekapazität der Luft und desto schneller der Stoffübergang vom Wasser in die Gasphase (Riechmann et al., 2021). Auch Dutta & Vinnerås (2016) wiesen einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Luftstroms, der Temperatur und der Verdunstungsrate nach.

Nebst der Steigerung der Verdunstungsrate hat die direkte Sonneneinstrahlung den Vorteil, dass der Urin mit ultravioletter Strahlung und Infrarotwärme bestrahlt wird. Diese sind am Abbau von mikroverunreinigtem Wasser beteiligt (Ren et al., 2021b). Joyce et al. (1996) fanden heraus, dass Sonnenlicht eine vollständige Inaktivierung von Fäkalbakterien bewirken kann, wenn die Temperatur 55°C übersteigt.

F3: Wie verändert sich der Nährstoffgehalt durch die Verdunstung des Urins?

Alle Nährstoffe konnten durch die Verdunstung konzentriert werden. Die Ammoniumkonzentration ist durchschnittlich um den Faktor 57 gestiegen. Die Nitratkonzentration stieg während der Versuchsdauer um den Faktor 75. Die Chloridkonzentration stieg ähnlich hoch wie die Ammoniumkonzentration, und zwar um den Faktor 50. Die durchschnittliche Phosphatkonzentration ist um den Faktor 37 gestiegen und die Kaliumkonzentration um den Faktor 21.

In unserem Versuch liegt der Fokus auf der Rückgewinnung von Stickstoff. Ammoniak ist flüchtig und ohne dessen Stabilisierung können erhebliche N-Verluste auftreten, vor allem bei der Lagerung und dem Transport von getrenntem Urin (Udert et al., 2006). Um die Module hinsichtlich der Stickstoffrückgewinnungseffizienz zu vergleichen, wurde das Verhältnis von Chlorid zu Ammonium untersucht. Aufgrund von Messungen von Riechmann et al. (2021) wird davon ausgegangen, dass sich Chlorid nicht ablagert und ein stabiler Parameter im Urin darstellt. Da sich auch das Delta von Chlorid zu Ammonium nicht signifikant unterscheidet, kann in den Versuchen von einer erfolgreichen Stabilisierung ausgegangen werden. Es wurde gezeigt,

dass durch das Ansäuern des Urins die Verflüchtigung von Ammoniak grösstenteils unterbunden werden konnte. Andere Versuche zeigen ähnliche Ergebnisse durch die Ansäuerung von Urin. In einer Studie von Antonini et al. (2012) wurde gezeigt, dass durch Ansäuern des Urins mit Phosphor- oder Schwefelsäure der Stickstoffgehalt der Endprodukte zwischen drei und viereinhalb Mal grösser war, als unter nicht stabilisierten Bedingungen.

F4: Fördert oder hemmt Urindünger das Pflanzenwachstum im Vergleich zu herkömmlichen Düngern.

Im hydroponischen Pflanzversuch wurde untersucht, wie sich der Urindünger auf das Wachstum von Basilikumpflanzen auswirkt. Das höchste Gewicht und die grössten Pflanzen wurden mit dem Wuxaldünger erzielt. Urindünger «High» war aber vergleichbar mit dem synthetischen Dünger Wuxal und dem in der Schweiz zugelassenen Urindünger «Aurin». Auch Antonini et al. (2012) und Ren et al. (2021) bestätigen die Eignung von Urindünger in Pflanzenversuchen. Der Urindünger «Low» schneidet schlechter ab, da er für ein geeignetes Basilikumwachstum zu wenig Nährstoffe aufweist.

Wuxal ist ein flüssiger NPK-Dünger mit 99g/l Stickstoff (TN), 99 g/l Phosphat (P_2O_5) und 74 g/l Kaliumoxyd (K_2O) und hat somit ein sehr ausgeglichenes Verhältnis der drei Hauptnährstoffe. Aurin hat in einem Liter 50 g TN, 5 g P_2O_5 und 22 g K_2O und ist somit ein Stickstoffdünger (Phosphat und Kaliumoxid weniger stark vertreten). Im Endprodukt des Urins hat es durchschnittlich 24 g/l TN (nur Ammonium und Nitrat), 18 g/l P_2O_5 und 55 g/l K_2O . Das Verhältnis des Endproduktes von Urin ist wie der Wuxaldünger eher ausgeglichen.

Um eine geeignete DüngeLösung zu erhalten, wurden die Ausgangsprodukte mit Leitungswasser verdünnt (Wuxal; 20 ml/l, Aurin: 10 ml/l, Urin High: 2 g/l und Urin Low: 0.2 g/l). In der DüngeLösung erreicht Urin «High» ähnliche Stickstoffwerte wie Wuxal (TN wird nicht mitberücksichtigt) und höhere Phosphatwerte. Kalium konnte im Dünger «High» nicht gemessen werden. Aurin hingegen hat tiefere Stickstoff-, Phosphat- und Kaliumgehalte als Wuxal und Urin «High». Aufgrund des Verfahrens bei VUNA wird Phosphat ausgefällt und ist nicht mehr im Dünger enthalten (Besprechung mit Bastian Etter 2022, Vuna). Die Pflanzen mit Aurin hatten schwarz-braune Verfärbungen an den alten Blättern, was auf Phosphor- oder Kalzium-Mangel hinweisen könnte (Interpretation und Besprechung mit Zala Schmutz, 2022; Goddek et al., 2016; Maucieri et al., 2018). In den NovaCropControl-Analysen wird ersichtlich, dass Aurin zu wenig Kalzium und Magnesium und zu viel Phosphat aufwies. Die Pflanzen mit Wuxal haben leichte schwarz-braune Verfärbungen an den jungen Blättern, was durch den Mangel von Mikronährstoffen wie Magnesium und Eisen erklärt werden könnte (Interpretation und Besprechung mit Zala Schmutz, 2022). Die Analysen von NovaCropControl bestätigen, dass

die Pflanzen mit Wuxal zu wenig Magnesium, Eisen und Kalzium enthalten. Urin «High» hat keine Verfärbungen, das Grün der Blätter ist aber heller als Wuxal und Aurin. Totaler Stickstoff und Ammoniumwerte befinden sich in der NovaCropAnalyse im optimalen Bereich, aber die Phosphorwerte liegen zu tief. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Urindünger für hydroponische Pflanzversuche geeignet ist, solange er eine geeignete Verdünnung aufweist. Da beim Kressetest der LC50 erst bei einer Konzentration von 30 mg/l liegt, sollte in einem nächsten Versuch auch noch höhere Konzentrationen von Urin als Dünger getestet werden.

5.1. Fazit und Ausblick

Urinverdunstung birgt grosses Potential und stellt eine alternative Möglichkeit zur Nährstoffrückgewinnung dar. In dieser Arbeit wurde ein Prototyp zur passiven Urinverdunstung in einem nahezu energie- und wasserautarken Haus im Kanton Zürich entwickelt, installiert und das Potenzial im ganzjährigen Einsatz untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, die Nährstoffe aus 18 Liter unverdünntem menschlichen Urin in festes Düngemittelmaterial zu konzentrieren, nachdem sie 21 Tage lang nur direktem Sonnenlicht ausgesetzt waren. Investitions- und Betriebskosten waren gering, da die Urinverdunstungsmodule einfach konstruiert waren, das heisst, vollständig aus rezyklierten Materialien oder aus Materialien, die in örtlichen Baumärkten erhältlich waren, gebaut wurde. Es wurden Verdunstungsraten von 1.7 l/m²/d (UVM 1), 0.86 l/m²/d (UVM 2a) und 0.63 l/m²/d erzielt. Besonders bewährt hat sich der Kondensationsablauf in den UVM1 und 2a. UVM 1 erzielte zwar die beste Verdunstungsrate, ist aber ungeeigneter für den Betrieb und die Überwachung als UVM 2a und 2b. Damit Betrieb und Überwachung besser funktionieren, sollten für weitere Versuche stabilere Materialien verwendet und die Module einfacher aufgebaut werden. Da exakte Messdaten fehlen, können genaue Abhängigkeiten von Temperatur, Sonneneinstrahlung und Luftfeuchtigkeit auf die Verdunstungsrate nicht bestimmt werden. Die Tendenz, dass mit steigender Temperatur und sinkender Luftfeuchtigkeit die Verdunstungsrate gesteigert wird, konnte nachgewiesen werden. Frühere Studien zeigen, dass die Sonneneinstrahlung Krankheitserreger im Urin abtöten. Die Mechanismen der solaren Desinfektion sollten in einer weiteren Untersuchung genauer analysiert werden.

Die Harnstoffhydrolyse konnte erfolgreich verhindert werden, indem der Urin automatisiert mit Putzessig bei einem pH-Wert um 4 stabilisiert wurde. Durch die erfolgreiche Stabilisierung vom Urin kann der Stickstoff im Urin zurückbehalten werden und steht für das Pflanzenwachstum zur Verfügung. Das Endprodukt der Verdunstung hat ausgeglichene NPK-Werte und der Einsatz als Dünger ist mit einer Verdünnung von 2g/L geeignet. Somit konnte in der vorliegenden Arbeit

gezeigt werden, dass sich das passive Urinverdunstungsmodul im Einsatz bewährt und Nährstoffe zurückgewonnen werden können, sodass sie als effizienter Dünger eingesetzt werden können.

Literaturverzeichnis

- Antonini, S., Nguyen, P. T., Arnold, U., Eichert, T., & Clemens, J. (2012a). Solar thermal evaporation of human urine for nitrogen and phosphorus recovery in Vietnam. *The Science of the Total Environment*, 414, 592–599.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.055>
- Antonini, S., Nguyen, P. T., Arnold, U., Eichert, T., & Clemens, J. (2012b). Solar thermal evaporation of human urine for nitrogen and phosphorus recovery in Vietnam. *The Science of the Total Environment*, 414, 592–599.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.055>
- Berry, P. M., Sylvester-Bradley, R., Philipps, L., Hatch, D. J., Cuttle, S. P., Rayns, F. W., & Gosling, P. (2002). Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? *Soil Use and Management*, 18(SUPPL.), 248–255.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00266.x>
- Bethune, D. (2015). *A Novel Urine Evaporation and Collection System for Dry Toilets*.
<https://doi.org/10.11575/PRISM/24932>
- Bethune, D., Chu, A., & Ryan, M. (2016). *Passive evaporation of source-separated urine from dry toilets: UES optimization and dry product accumulation over time*.
<https://doi.org/10.2166/WASHDEV.2016.103>
- Bethune, D. N., Chu, A., & Ryan, M. C. (2014a). Passive evaporation of source-separated urine from dry toilets: A lab study. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 4(4), 654–662. <https://doi.org/10.2166/washdev.2014.058>
- Bethune, D. N., Chu, A., & Ryan, M. C. (2014b). Passive evaporation of source-separated urine from dry toilets: A lab study. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 4(4), 654–662. <https://doi.org/10.2166/washdev.2014.058>

- Bischel, H. N., Duygan, B. D. Ö., Strande, L., McArdeall, C. S., Udert, K. M., & Kohn, T. (2015). Pathogens and pharmaceuticals in source-separated urine in eThekweni, South Africa. *Water Research, 85*, 57–65.
- Boncz, M. A., Formagini, E. L., Arima, F. X. C., & Paulo, P. L. (o. J.). *Methods for stabilising and concentrating human urine for use as a fertilizer. 8.*
- Chandran, A., Pradhan, S., & Heinonen-Tanski, H. (2009). Survival of enteric bacteria and coliphage MS2 in pure human urine. *Journal of applied microbiology, 107*(5), 1651–1657.
- Chipako, T. L., & Randall, D. G. (2020). Investigating the feasibility and logistics of a decentralized urine treatment and resource recovery system. *Journal of Water Process Engineering, 37*, 101383. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101383>
- Del Porto, D., & Steinfeld, C. (1999). *The composting toilet system book: A practical guide to choosing, planning and maintaining composting toilet systems, a water-saving, pollution-preventing alternative.* Center for Ecological Pollution Prevention.
- Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau, 91421, DIN SPEC (2020).
- Dutta, S., & Vinnerås, B. (2016). Fertilizer from dried human urine added to ash and lime – a potential product from eco-sanitation system. *Water Science and Technology, 74*(6), 1436–1445. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.324>
- Ek, M., Bergström, R., Bjurhem, J. E., Björleinius, B., & Hellström, D. (2006). Concentration of nutrients from urine and reject water from anaerobically digested sludge. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 54*(11–12), 437–444. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.924>
- Etter, B., Udert, K. M., & Gounden, T. (2015). *VUNA: Valorisation of Urine Nutrients. Promoting Sanitation & Nutrient Recovery through Urine Separation. Final Project Report 2015.* ETH Zurich.

- Freguia, S., Sharma, K., Benichou, O., Mulliss, M., & Shon, H. K. (2021). Sustainable engineering of sewers and sewage treatment plants for scenarios with urine diversion. *Journal of Hazardous Materials*, *415*, 125609. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125609>
- Heinonen-Tanski, H., Sjöblom, A., Fabritius, H., & Karinen, P. (2007). Pure human urine is a good fertiliser for cucumbers. *Bioresource Technology*, *98*(1), 214–217. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.024>
- Höglund, C. (2001). *Evaluation of microbial health risks associated with the reuse of source-separated human urine*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-3090>
- Jaatinen, S. T., Palmroth, M. R. T., Rintala, J. A., & Tuhkanen, T. A. (2016). The effect of urine storage on antiviral and antibiotic compounds in the liquid phase of source-separated urine. *Environmental Technology*, *37*(17), 2189–2198. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1144799>
- Kirchmann, H., & Pettersson, S. (1994). Human urine—Chemical composition and fertilizer use efficiency. *Fertilizer Research*, *40*(2), 149–154. <https://doi.org/10.1007/BF00750100>
- Lahr, R. H., Goetsch, H. E., Haig, S. J., Noe-Hays, A., Love, N. G., Aga, D. S., Bott, C. B., Foxman, B., Jimenez, J., Luo, T., Nace, K., Ramadugu, K., & Wigginton, K. R. (2016). Urine Bacterial Community Convergence through Fertilizer Production: Storage, Pasteurization, and Struvite Precipitation. *Environmental Science & Technology*, *50*(21), 11619–11626. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02094>
- Larsen, T. A., & Gujer, W. (1996). Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). *Water Science and Technology*, 87–94. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00560-4](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00560-4)
- Larsen, T. A., & Gujer, W. (2001). Waste design and source control lead to flexibility in wastewater management. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, *43*(5), 309–317.

- Lewis, D. A., Brown, R., Williams, J., White, P., Jacobson, S. K., Marchesi, J., & Drake, M. J. (2013). The human urinary microbiome; bacterial DNA in voided urine of asymptomatic adults. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, *3*, 41.
- Lind, B.-B., Ban, Z., & Bydén, S. (2001). Volume reduction and concentration of nutrients in human urine. *Ecological Engineering*, *16*(4), 561–566. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00107-5)
- Martin, T. M. P., Esculier, F., Levavasseur, F., & Houot, S. (2022). Human urine-based fertilizers: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *52*(6), 890–936. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1838214>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, *13*(1), 1–11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Maurer, M., Pronk, W., & Larsen, T. A. (2006). Treatment processes for source-separated urine. *Water Research*, *40*(17), 3151–3166. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.012>
- Pronk, W., & Koné, D. (2009). Options for urine treatment in developing countries. *Desalination*, 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.076>
- Putnam, D. F. (1971). *Composition and concentrative properties of human urine* (NASA-CR-1802). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710023044>
- Ramirez, C. A. [|info:eu-repo/dai/nl/284852414](https://info.eu-repo/dai/nl/284852414), & Worrell, E. [|info:eu-repo/dai/nl/106856715](https://info.eu-repo/dai/nl/106856715). (2006). Feeding fossil fuels to the soil: An analysis of energy embedded and technological learning in the fertilizer industry. *Resources, Conservation and Recycling*, *46*(1), 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.06.004>
- Randall, D. G., Krähenbühl, M., Köpping, I., Larsen, T. A., & Udert, K. M. (2016). A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition. *Water Research*, *95*, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.007>
- Ren, J., Hao, D., Jiang, J., Phuntsho, S., Freguia, S., Ni, B.-J., Dai, P., Guan, J., & Shon, H. K. (2021a). Fertiliser recovery from source-separated urine via membrane bioreactor and

- heat localized solar evaporation. *Water Research*, 207, 117810.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117810>
- Ren, J., Hao, D., Jiang, J., Phuntsho, S., Freguia, S., Ni, B.-J., Dai, P., Guan, J., & Shon, H. K. (2021b). Fertiliser recovery from source-separated urine via membrane bioreactor and heat localized solar evaporation. *Water Research*, 207, 117810.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117810>
- Riechmann, M. E., Ndwandwe, B., Greenwood, E. E., Reynaert, E., Morgenroth, E., & Udert, K. M. (2021). On-site urine treatment combining Ca(OH)₂ dissolution and dehydration with ambient air. *Water Research X*, 13, 100124.
<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100124>
- Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., & Cartmell, E. (2015). The characterization of feces and urine: A review of the literature to inform advanced treatment technology. *Critical reviews in environmental science and technology*, 45(17), 1827–1879.
- Sangare, D., Brou, A. L., Sou/dakoure, M., & Tagro, P. V. (2020). Urine treatment by solar disinfection for agriculture reuse purpose in a poor rural context: Case of Burkina Faso. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 11(1), 1–9.
<https://doi.org/10.2166/washdev.2020.075>
- Schönning, C., Leeming, R., & Stenström, T. A. (2002). Faecal contamination of source-separated human urine based on the content of faecal sterols. *Water Research*, 36(8), 1965–1972.
- Simha, P., Lalander, C., Nordin, A., & Vinnerås, B. (2020). Alkaline dehydration of source-separated fresh human urine: Preliminary insights into using different dehydration temperature and media. *Science of The Total Environment*, 733, 139313.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139313>
- SR 916.171—Verordnung vom 10. Januar 2001 über das Inverkehrbringen von Düngern (Dünger-Verordnung, DüV). (o. J.). Abgerufen 8. Mai 2022, von <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2001/105/de>

- Stenström, T. A. (2009). *Guidelines on the Safe Use of Urine and Faeces in Ecological Sanitation Systems*. <https://www.sei.org/publications/guidelines-safe-use-urine-faeces-ecological-sanitation-systems/>
- Tettenborn, F. (2011). *Aspects of systems for separate urine collection and treatment-selected techniques and potential implementation in an urban context*. Technische Universität Hamburg.
- Tun, L. L., Jeong, D., Jeong, S., Cho, K., Lee, S., & Bae, H. (2016). Dewatering of source-separated human urine for nitrogen recovery by membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 512, 13–20.
- Udert, K. M., Fux, C., Münster, M., Larsen, T. A., Siegrist, H., & Gujer, W. (2003). Nitrification and autotrophic denitrification of source-separated urine. *Water Science and Technology*, 48(1), 119–130. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0031>
- Udert, K. M., Larsen, T. A., & Gujer, W. (2003). Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. *Water Research*, 37(11), 2667–2677. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00071-X)
- Udert, K. M., Larsen, T. A., & Gujer, W. (2006). Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Science and Technology*, 54(11–12), 413–420. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.921>
- Udert, K. M., & Wächter, M. (2012). Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. *Water Research*, 46(2), 453–464. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.020>
- Volpin, F., Chekli, L., Phuntsho, S., Cho, J., Ghaffour, N., Vrouwenvelder, J. S., & Kyong Shon, H. (2018). Simultaneous phosphorous and nitrogen recovery from source-separated urine: A novel application for fertiliser drawn forward osmosis. *Chemosphere*, 203, 482–489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.193>
- Volpin, F., Jiang, J., El Saliby, I., Preire, M., Lim, S., Johir, M. A. H., Cho, J., Han, D. S., Phuntsho, S., & Shon, H. K. (2020). Sanitation and dewatering of human urine via

- membrane bioreactor and membrane distillation and its reuse for fertigation. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122390.
- Warner, R. C. (1942). THE KINETICS OF THE HYDROLYSIS OF UREA AND OF ARGININE. *Journal of Biological Chemistry*, 142(2), 705–723. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)45072-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)45072-7)
- Warren, K. S. (1962). Ammonia toxicity and pH. *Nature*, 195(4836), 47–49.
- WHO, U. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. *Wastewater use in agriculture*, 2, 222.
- Winker, M., Tettenborn, F., Faika, D., Gulyas, H., & Otterpohl, R. (2008). Comparison of analytical and theoretical pharmaceutical concentrations in human urine in Germany. *Water research*, 42(14), 3633–3640.
- Wolfe, A. J., & Brubaker, L. (2015). “Sterile urine” and the presence of bacteria. *European urology*, 68(2), 173.
- Zhang, J., She, Q., Chang, V. W., Tang, C. Y., & Webster, R. D. (2014). Mining nutrients (N, K, P) from urban source-separated urine by forward osmosis dewatering. *Environmental science & technology*, 48(6), 3386–3394.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die passive Urinverdunstung in Feldbach ZH. Die Abbildung gibt einen Überblick über die Versuche dieser Studie. 1) Mittels einer Trockentrenntoilette wird der Urin von den Fäzes abgetrennt und gelangt durch die Schwerkraft in einen 2) Tank. Durch einen 3) Sensor wird Putzessig in den Urintank geleitet. Um die Verdunstungsleistung zu messen, wird das 4) Modul befüllt. Die 5) Proben werden auf Nährstoffgehalt, pH und elektrische Leitfähigkeit analysiert. Das entstandene Pulver wird zu 6) Dünger aufbereitet und in hydroponischen Versuchen mit herkömmlichen Düngern verglichen. Eigene Darstellung mit Biorender.	16
Abbildung 2: Standort des Urinverdunstungsmodul in Feldbach ZH. Eigene Darstellung in QGIS.	17
Abbildung 3: Ecodomeo Trockentrenntoilette mit Förderband. Bild von www.kompotoi.ch	18
Abbildung 4: Planung des Urinverdunstungsmodul 1. Eigene Darstellung in Sketchup.	19
Abbildung 5: UVM 2a mit Dachschrägung und Plexiglas.	20
Abbildung 6: UVM 2b ohne Dachschräge mit Plexiglas.	20
Abbildung 7: Zeitstrahl und Ablauf der Vorversuche und Versuche.	21
Abbildung 8: Vorversuchsaufbau in Labor mit frischem, unstabilem Urin a) mit Essig stabilisiertem Urin b) wurden unter 1) Raumtemperatur oder 2) der Zufuhr von Hitze (40°C) verdunstet. Eigene Darstellung mit Biorender.	22
Abbildung 9: Kresseversuch mit Urindünger. Urindünger (100 g/l) wurde in verschiedenen Konzentrationen (1:1, 1:10, 1:100, 1:1000) mit der Kontrolle verglichen. Dafür wurden Kressesamen (<i>Lepidium sativum</i>) in Petrischalen (Semadeni) mit Rundfiltern (Whatman, Grade 1; Poren: 11 µm) kultiviert. Jede Petrischale enthielt 20 Kressesamen und wurde mit 5 ml Testgut befeuchtet. Eigene Darstellung mit Biorender.	23
Abbildung 10: Hydroponischer Pflanzversuch mit Basilikum (<i>Ocimum Basilicum</i>) mit den vier verschiedenen Düngern (Wuxal, Aurin, Urin Hihg und Urin Low). Je zwölf Steinwolleguadrate wurden auf fünf Basilikumkeimlinge reduziert. Eigene Darstellung mit Biorender.	24
Abbildung 11: Von links nach rechts: Aufgelöster WLAN-Wassermelder, Datenlogger des Pyranometers und Sensor für Sonneneinstrahlung.	27
Abbildung 12: Volumen des Vorversuchs im Labor von stabilisiertem und unstabilisiertem Urin während Raumtemperatur und während der Erwärmung auf 40°C. In ca. 40 h konnte im erwärmten Versuch ca. 400 ml stabilisierter Urin verdunsten und ca. 300 ml unstabilisierter Urin. Bei Raumtemperatur konnte in der doppelten Zeit nur gerade die Hälfte verdunstet werden.	28

Abbildung 13: Verdunstungsrate [L/d] der Vorversuche 1-3 in Abhängigkeit der Temperatur [C°] über die Zeitdauer von 21, 11 und 64 Tagen. Pink ist die Verdunstungsrate [L/d], hellgrün die Temperatur aussen und dunkelgrün die Temperatur innen. Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden alle 10 Minuten gemessen und danach Tagesmittelwerte gebildet. Der Pegelstand wurde nur einmal pro Woche gemessen und daraus die durchschnittliche tägliche Verdunstung berechnet.	30
Abbildung 14: Verdunstung [l/d] über die Zeitdauer von 21 Tagen für den Versuch 1, 2 und 3 im Modul 1. Es ist keine klare Abhängigkeit von Temperatur und Verdunstung zu sehen. Gestrichelte Linien stellen die verschiedenen Verdunstungsraten dar und ausgezogene Linien bilden die Temperatur ab. Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden alle 10 Minuten gemessen und danach Tagesmittelwerte gebildet. Der Pegelstand wurde nur einmal pro Woche gemessen und daraus die durchschnittliche tägliche Verdunstung berechnet.	33
Abbildung 15: Abnehmende Verdunstungsrate gemittelt über alle drei Versuche und alle drei Module. In der letzten Woche sinkt sie Verdunstungsrate.	33
Abbildung 16: Sonneneinstrahlung im UVM 1 über den Versuch 1, 2 und 3. Gestrichelte Linien stellen die verschiedenen Verdunstungsraten dar und ausgezogene Linien bilden die Sonneneinstrahlungsstärken ab. Orange ist der Versuch eins, Grün der Versuch 2 und Violett der Versuch 3. Die Sonneneinstrahlung würde minütlich gemessen, während der Pegelstand nur einmal in der Woche gemessen wurde und daraus die tägliche Verdunstung berechnet wurde.	34
Abbildung 17: Veränderung des pH-Wertes in allen drei Versuchen über die Zeit. In der Woche 3 sind keine Messdaten vorhanden, da das Endprodukt für die Messung bereits zu trocken war. Obwohl der Urin im Tank erfolgreich stabilisiert wurde, stieg er während den Verdunstungsversuchen an.	34
Abbildung 18: Starker Anstieg der Leitfähigkeit (EC) vom Tag 1 bis zum Tag 14. Danach konnte die Leitfähigkeit vor Ort nicht mehr überprüft werden, da das Konzentrat zu trocken war.	35
Abbildung 19: Konzentration der Nährstoffe Ammonium, Chlorid, Kalium, und Phosphat in Gramm über die Zeitdauer von drei Wochen für die UVM 1, 2a und 2b. Grundsätzlicher Anstieg der Nährstoffkonzentration ist zu erkennen.	36
Abbildung 20: Nährstoffkonzentration von Ammonium, Chlorid, Nitrat, Phosphat und Kalium. Ein Anstieg aller Nährstoffe ist von der Woche 0 bis zur Woche 3 zu erkennen. Die Ammoniumkonzentration ist durchschnittlich um den Faktor 57 gestiegen. Die Nitratkonzentration stieg während der Versuchsdauer um den Faktor 75. Die Chloridkonzentration stieg ähnlich hoch wie die Ammoniumkonzentration um den Faktor 50. Die durchschnittliche Phosphatkonzentration ist um den Faktor 37 gestiegen und die Kaliumkonzentration um den Faktor 21.	36

Abbildung 21: Endkonzentration der Nährstoffe im Pulver in Woche 3 (W3) vom UVM 1, 2a und 2b, gemittelt über alle drei Versuche. Im UVM 1 war 108.9 g/l Kalium, 61.0 g/l Chlorid, 7.7 g/l Nitrat, 7.6 g/l Phosphat und 5.7 g/l Ammonium enthalten. Im UVM 2a war 90.4 g/l Kalium enthalten, 53.5 g/l Chlorid, 20 g/l Phosphat, 11.6 g/l Ammonium und 7.5 g/l Nitrat. Das UVM 2b weist 28.9 g/l Kalium, 17.3 g/l Chlorid, 10.6 g/l Phosphat und 3.5 g/l Ammonium und 5.7 g/l Nitrat auf.	37
Abbildung 22: Delta des Verhältnisses von Chlorid zu Ammonium über die drei Versuche aufgeteilt in UVM1, 2a und 2b. Das Ausgangsverhältnis von Chlorid zu Ammoniak (Woche 0) war im Versuch 1 über 3-mal grösser (18.6) als im Versuch 2 (5.2) und über 8-mal grösser als im Versuch 3 (2.5). Das durchschnittliche Delta im Versuch 1, 2 und 3 im UVM 1 (p-wert = 0.14), 2a (p-Wert = 0.35) und 2b (p-Wert = 0.93) unterscheidet sich nicht signifikant über die Wochen.	38
Abbildung 23: Letalität und Effekt in % in Abhängigkeit der jeweiligen Konzentration [g/l] 0.05, 0.5, 5 und 50.....	39
Abbildung 24: Endgewicht der Basilikumpflanzen nach 5 Wochen in den vier verschiedenen Dünger; Wuxal, Aurin, High und Low. Die Mittelwerte des Gesamtgewichts von Basilikumpflanzen gedüngt mit Wuxal (7.32g ± 5.67), High (3.57g ± 2.20), Aurin (3.51g ± 2.69) und Low (0.309g ± 0.15) weichen signifikant voneinander ab (p = 2.2e-16, Anova). In der Post-Hoc Analyse unterscheiden sich High und Aurin nicht voneinander, die Mittelwerte von Wuxal und von Low weichen jedoch signifikant von den anderen Treatments ab. Tukey_HSD ergab folgende p Werte; High-Aurin p = 0.9996505, Low-Aurin p = 0.0000018, Wuxal- Aurin p = 0.0000000, Low-High p=0.0000011, Wuxal-High p=0.0000000 Wuxal- Low = 0.0000000.....	40
Abbildung 25: Die mittlere Länge der Stängel ist mit dem Wuxal Dünger am grössten (22.98 cm ± 11.15) und signifikant grösser als High (19.70 cm ± 7.88), Aurin (16.06 cm ± 6.94) und Low (4.53cm ± 1.19). Lediglich Aurin und High unterscheiden sich nicht signifikant. Tukey_HSD ergab folgende p Werte; High-Aurin p = 0.04, Low-Aurin p = 0.00000, Wuxal- Aurin p = 0.0000091, Low-High p=0.0000000, Wuxal-High p=0.0926773, Wuxal- Low = 0.0000000...	41
Abbildung 26: Verschiedene Nährstoffe (ppm) der Basilikumpflanzen in Aurin, High, Low und Wuxal. Aurin weist eher hohe Anteile an Nährstoffen auf, während Low eher zu geringe Nährstoffkonzentrationen zeigt.	43
Abbildung 27: Blätter von Basilikumpflanzen mit verschiedenen Verfärbungen.....	44
Abbildung 28: Von links nach rechts: Nährstoffschicht auf dem Urin; Zähflüssige Brühe; Verbogene Rinnen.....	48

Tabellenverzeichnis

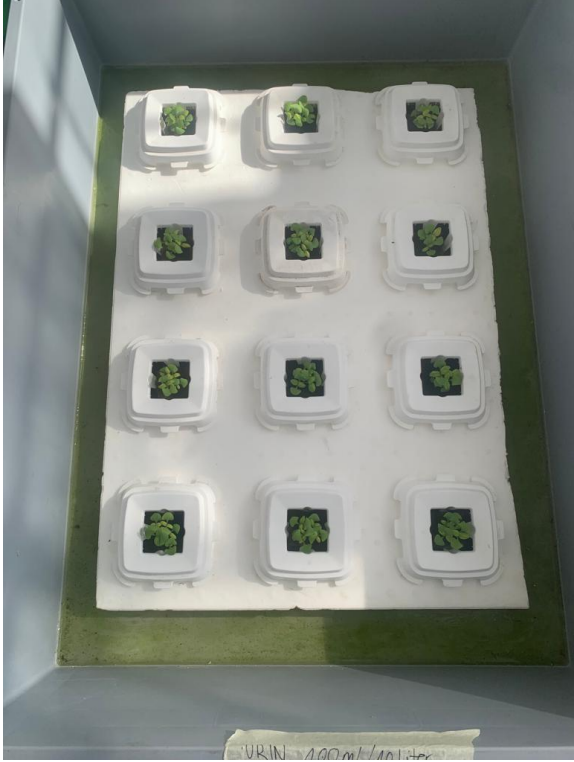
Tabelle 1: In der Literatur gefundene Nährstoffzusammensetzung von frischem Urin (Durchschnitt) aus Studien von 1977 bis 2021.	10
Tabelle 2: Analyseparameter des Entwurfes der DIN SPEC 91421, (2020).	14
Tabelle 3: Ausgewählte Kennzeichnungsschwellenwerte des DIN SPEC 91421 Entwurfes (2020).	15
Tabelle 4: Zusammenfassung der Vorversuche im Feld mit Wasser für den Versuch 1, 2 und 3 im Urinverdunstungsmodul 1 (UVM 1) über den Zeitraum vom 12.11 2021 bis zum 10.03 2022. Überblick über die durchschnittliche innere und äussere, maximale und minimale Temperatur, sowie die durchschnittliche Feuchtigkeit und die Verdunstungsrate der verschiedenen Versuche (Versuch 1, 2 und 3) im UVM 1. Die Oberfläche von UVM 1 beträgt 0.47 m ² (Alle sechs Rinnen).	28
Tabelle 5: Zusammenfassung der Verdunstungsversuche von Urin für den Versuch 1, 2 und 3 im Urinverdunstungsmodul 1 (UVM 1), Urinverdunstungsmodul 2a (UVM 2a) und dem Urinverdunstungsmodul (UVM 2b) über den Zeitraum vom 11.03 2022 bis zum 11.05 2022....	31
Tabelle 6: Zusammenfassung des Kressetest für die Verdünnungsreihen von 1:1, 1:10, 1:100 und 1:1000.	38
Tabelle 7: Ergebnisse des Kressetests für die Parameter LC50, NOEC, LOEC und EC50.	39
Tabelle 8: Qualitative Merkmale des Basilikumwachstum. Für High (Urindünger mit 2 g/l Verdünnung), Low (Urindünger mit 0.2 g/l Verdünnung), Aurin und Wuxal.	40
Tabelle 9: Nährstoffinhalte der vier verschiedenen Dünger. Kein Kalium und kein Nitrit konnten gemessen werden. Angaben der Nährstoffe sind in Gramm, EC in mS/cm.	41
Tabelle 10 : Deklarierte Nährstoffgehalte der Dünger Aurin und Wuxal.	41
Tabelle 11: Nährstoffaufnahme der Basilikumpflanzen unter den vier verschiedenen Dünger– High, Low, Wuxal und Aurin. In grün dargestellt, sind die Werte, die im optimalen Bereich lagen für das Wachstum von Basilikum. Orange Werte sind zu tief und rote Werte liegen zu hoch. Alle Nährstoffparameter sind in ppm angegeben.	42

Anhang A – Nährstoffe in den Vorversuchen

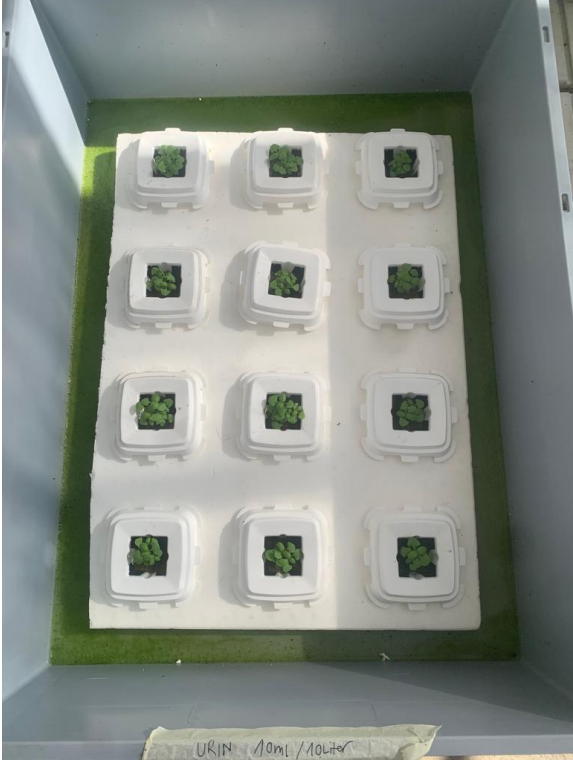
Parameter	Datum	Versuch 1						Versuch 2			
		10.02 2022		15.02.2022				25.02 2022			
		Erwärmung		nicht erwärmt		erwärmt		nicht erwärmt		erwärmt	
Verdünnung	Urin stabilisiert	Urin unstabilisiert	Urin stabilisiert	Urin unstabilisiert	Urin stabilisiert	Urin unstabilisiert	Urin stabilisiert	Urin unstabilisiert	Urin stabilisiert	Urin unstabilisiert	
Nitrit [mg/L]	1 zu 10	<0.015	<0.015	2.7		-	-				
Nitrit [mg/L]	1 zu 100	-	-	-	-	-	-	0.02	5.02	0.09	15.9
Nitrit [mg/L]	1 zu 1000	-	-	neg.	6.6	-	22.3				
Ammonium [mg/L]	1 zu 1000	neg.	49	161	149	-	239	596	592	1030	193
Nitrat [mg/L]	1 zu 1			11.9	9.17	-	x	13.4	9.43	x	x
Nitrat [mg/L]	1 zu 10	7.91	9	18.9	7.3	-	31.2	23.6	17	90.5	38.3
Chlorid [mg/L]	1 zu 10	-	-	-	-	-	-	2500	2750	11660	6460
Chlorid [mg/L]	1 zu 2	1286	1404	1657	1978	-	>3.5	1588	2408	x	3384
Phosphat	1 zu 1000	63.8	27.1	747	715	-	2010	1160	1210	3660	1500
TP [mg/L]	1 zu 1000		3520	708	735	-	1940	1010	937	5050	2700
TN [mg/L]	1 zu 100	neg.	neg.	-	-	-	-	4950	4740	25600	13800
TN [mg/L]	1 zu 1000	neg.	neg.	3500	3550	-	8680	-	-	-	-
Wasserhärte dH		x	9.17	-	-	-	-	-	-	-	-
ca ²⁺		x	15.2	-	-	-	-	-	-	-	-
mg ²⁺		x	30.5	-	-	-	-	-	-	-	-

Anhang B – Pflanzenwachstum von Basilikum

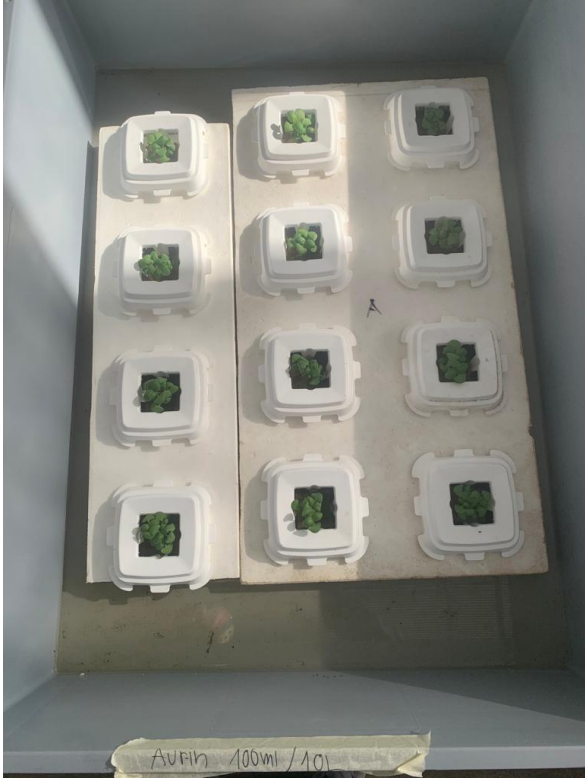
Woche 1



High



Low



A



W

Woche 2



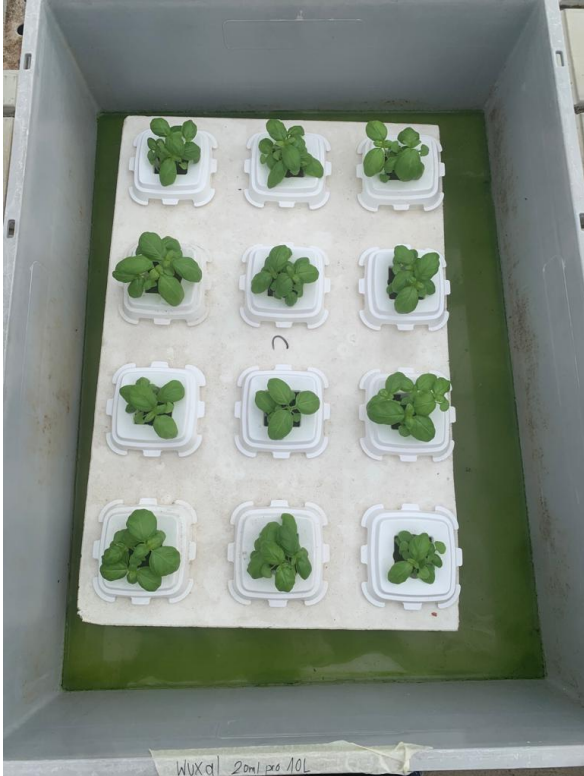
HIGH



LOW

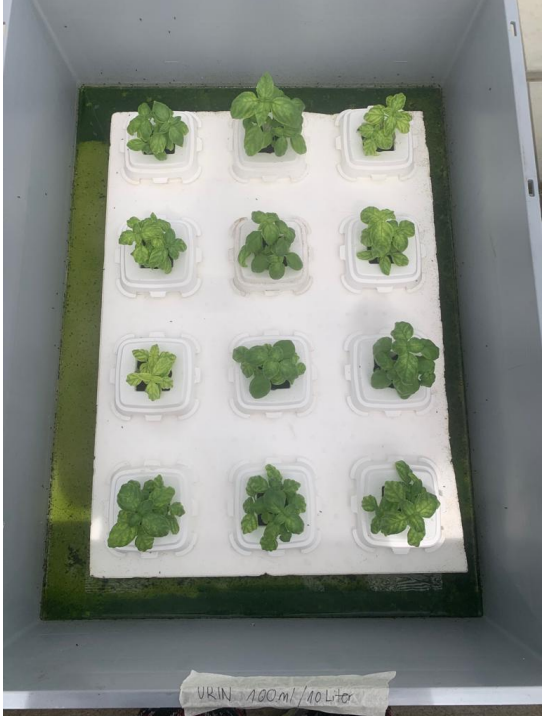


A



W

Woche 3



HIGH



LOW



A

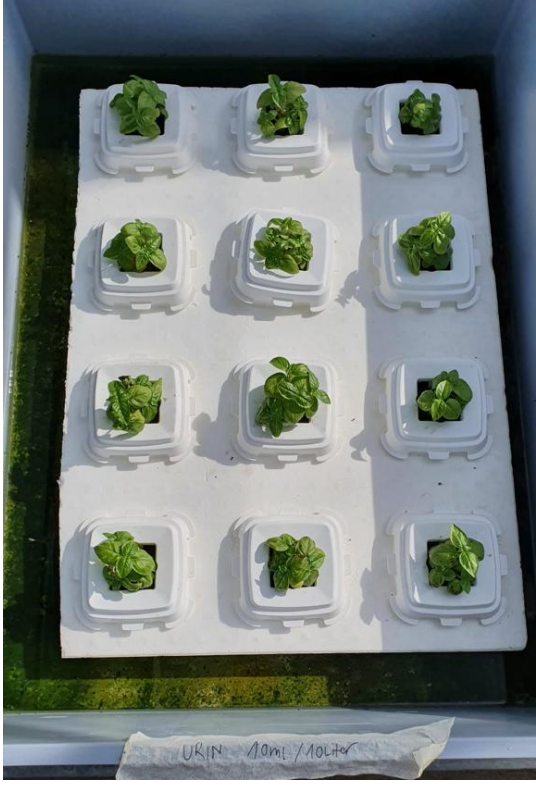


W

Woche 4



HIGH



LOW



A

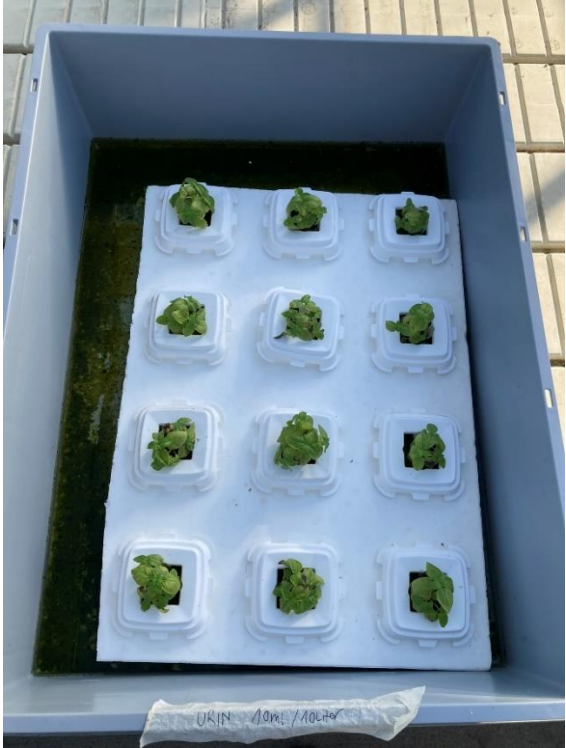


W

Woche 5



HIGH



LOW



A



W

Anhang C – Fotos mit dem Raspberry-Pi

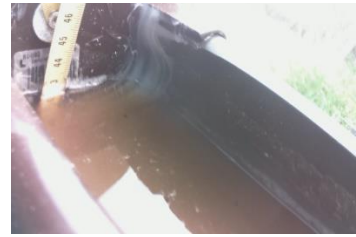
2022 04 21 – 5:30



2022 04 21 -5:30



2022 04 21 -5:30



2022 04 21 -5:30



2022 04 21-5:30



2022 04 21 -5:30



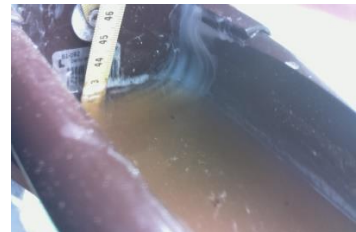
2022 04 21-5:30



2022 04 21-5:30



2022 04 21-5:30



2022 04 21- 6:30



2022 04 21- 6:30



2022 04 21- 6:30



2022 04 21- 6:30



2022 04 21- 6:30



2022 04 21 – 7:30



2022 04 21– 7:30



2022 04 21– 7:30

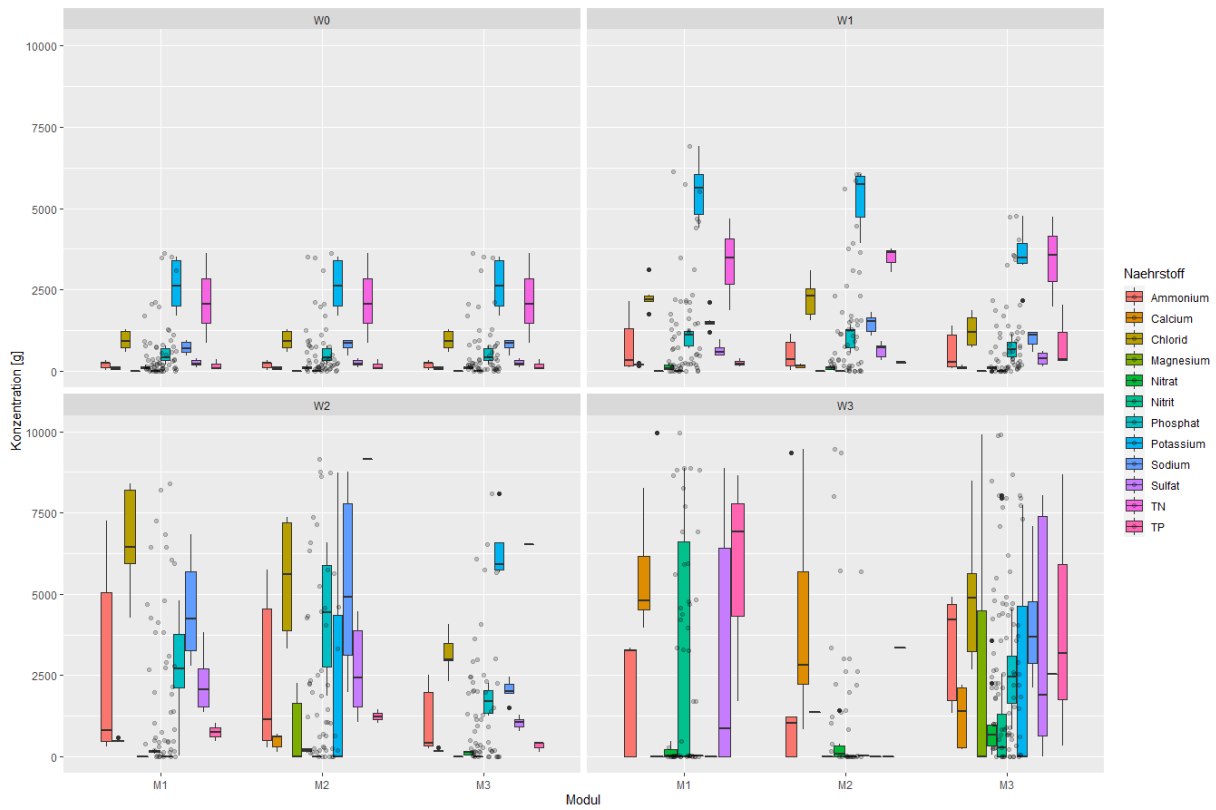


2022 04 21– 7:30

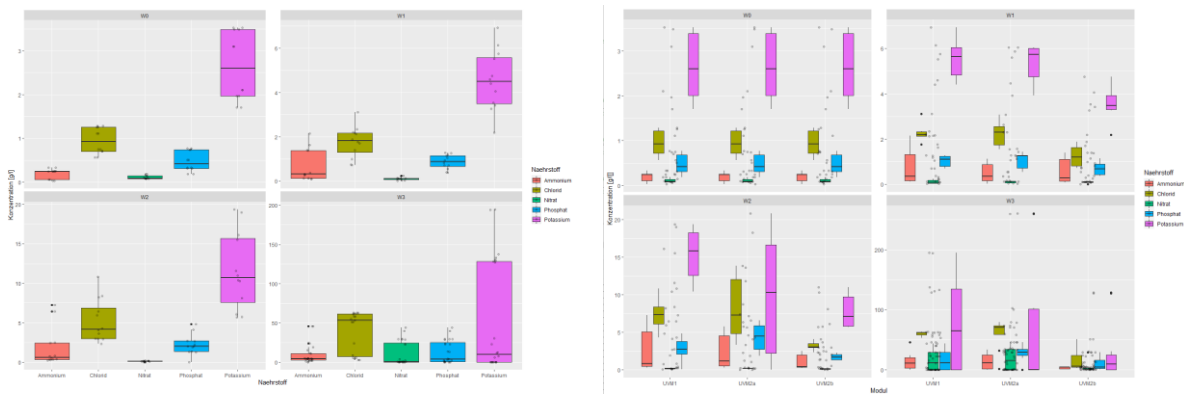


Anhang D – Nährstoffveränderungen der Hauptversuche

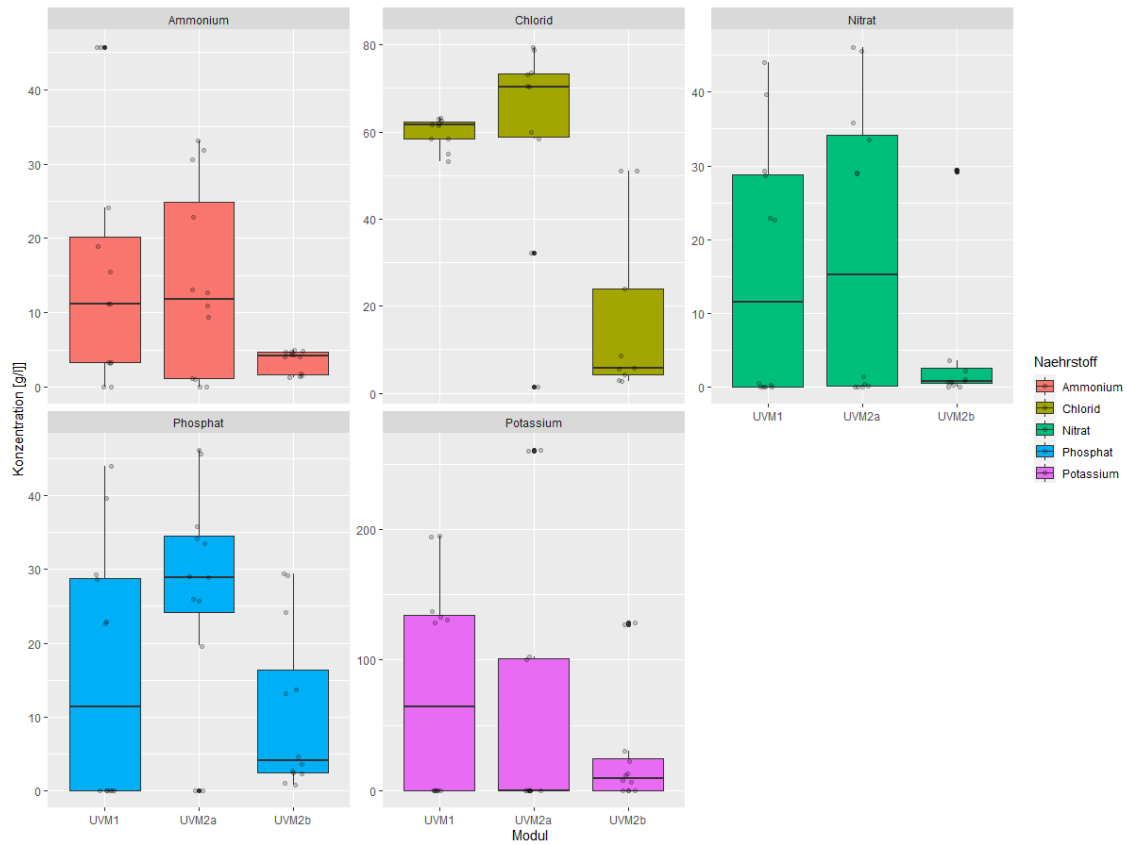
Veränderung aller Nährstoffe über die Zeit



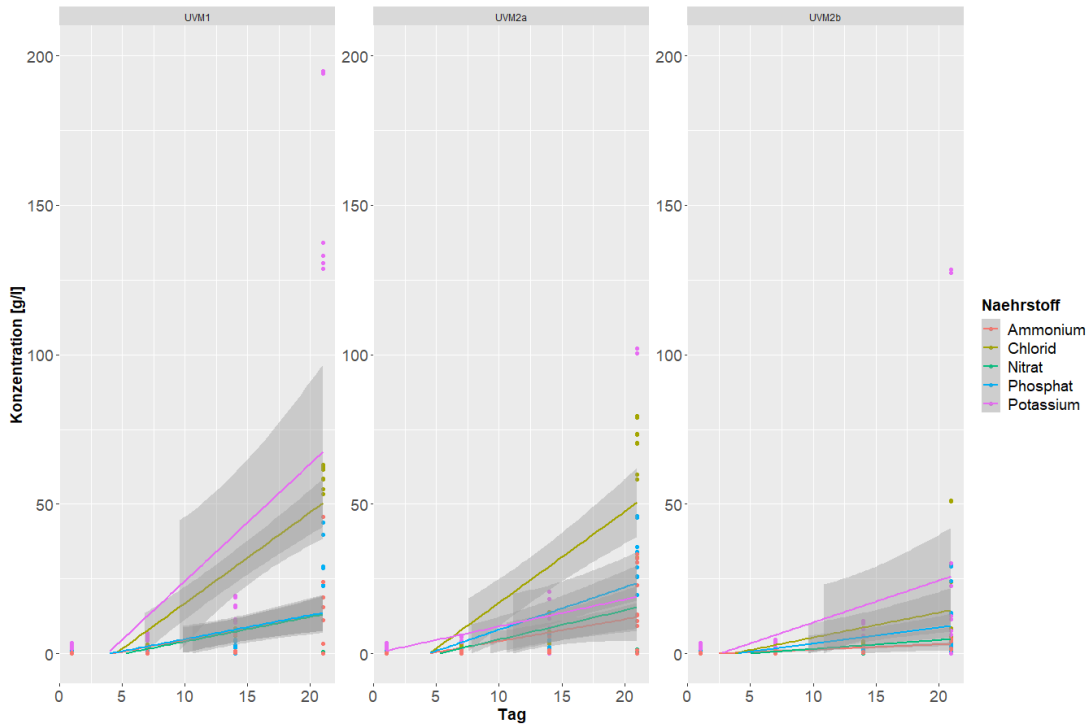
Veränderung vom Ammonium, Chlorid, Nitrat, Phosphat und Kalium über die Zeit



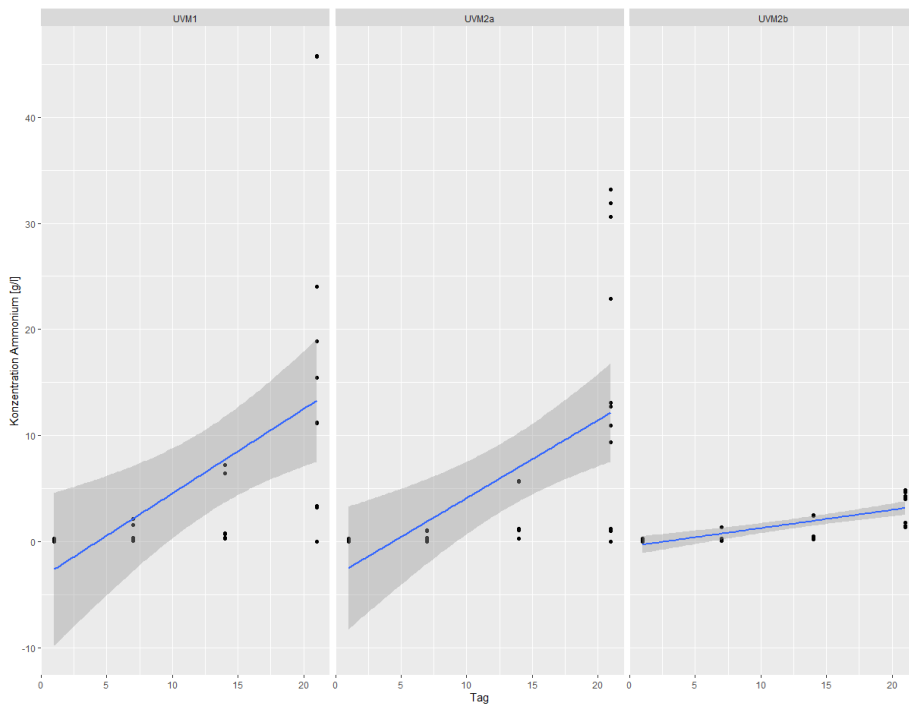
Endkonzentration der Nährstoffe im Pulver (Woche 3)



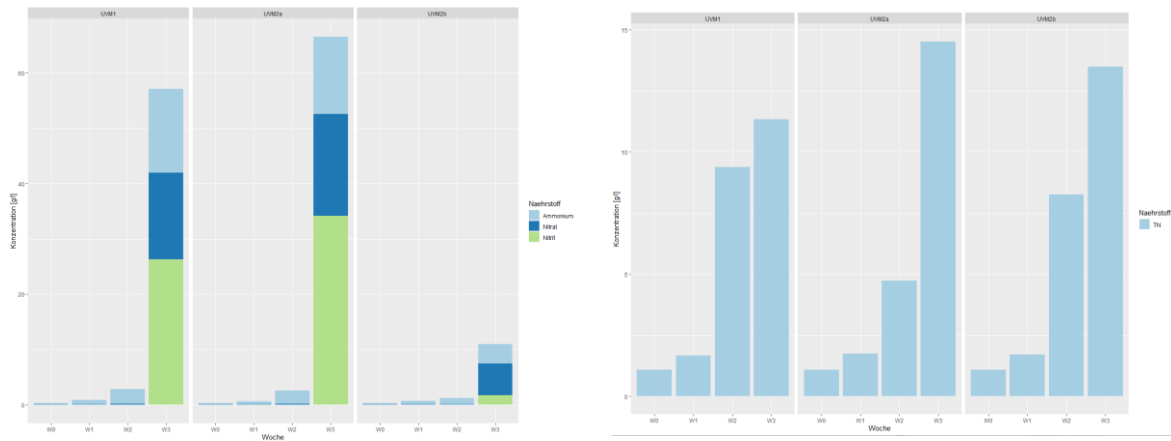
Anstieg der Nährstoffkonzentrationen von Ammonium, Chlorid, Nitrat, Phosphat und Kalium



Anstieg von Ammonium über die Zeit



Totaler Stickstoff im Verhältnis zu Nitrat, Nitrit und Ammonium



Anhang E – Rohdaten der Nährstoffkonzentration

robenbezeichnung	pH	EC	Cl/ammoniu	Nitrit	Sulfat	Nitrat	Phosphat	Natrium	Potassium	Calcium	Ammonium	Magnesium	TN	TP	
V1_W0_R1	3.6	8.63	18.6826107	0	0.20147331	0.09527625	0.33469388	0.80554848	3.10086686	0.06793597	0.05944497	0	0.871	0.0599	
V1_W0_R2	3.6	8.63	17.6535171	0	0.10353039	0.08546998	0.18489375	0.47081551	1.7069497	0.04448211	0.03226895	0	0	0	
V1_W1_M1_R1	3.7	12.83	19.1563007	0	0.4954874	0.02172925	0.69720177	1.46755545	5.74837278	0.20011299	0.11534518	0	1.87	0.126	
V1_W1_M1_R2	3.75	12.83	18.5288409	0	0.47389733	0.02101172	0.69909531	1.5480368	6.13545858	0.20023729	0.11665867	0	0	0	
V1_W1_M2_R1	3.7	13	48.570742	0	0.33360823	0.11488878	0.55308226	1.08282098	3.91775148	0.08744068	0.03202141	0	3.05	0.267	
V1_W1_M2_R2	3.7	13	15.5300573	0	0.3527891	0.11464961	0.54592889	1.14778667	4.46379882	0.08946234	0.10065182	0	0	0	
V1_W1_M3_R1	3.76	10.83	9.74249301	0	0.27356375	0.10364745	0.53856512	0.7693645	3.27288757	0.06882203	0.10226809	0	3.56	0.309	
V1_W1_M3_R2	3.76	10.83	9.34314439	0	0.19137324	0.09874432	0.39612876	0.58639781	2.18248521	0.06289501	0.07987623	0	0	0	
V1_W2_M1_R1	4.01	38.1	19.438623	0	1.38068013	0.08439369	1.9172733	3.82008056	15.5019615	0.48073588	0.30624968	0	14.3	0.467	
V1_W2_M1_R2	4.01	38.1	21.4597137	0	1.97815975	0.13438173	2.72623606	4.67519095	19.3495237	0.59899906	0.38188908	0	0	0	
V1_W2_M2_R1			12.8509245	0	1.27124722	0.15112413	2.23980644	2.65338886	11.7952101	0.19945621	0.31530835	0 KM			
V1_W2_M2_R2			11.7210816	0	1.05794107	0.12457546	1.86825163	1.97149925	8.72604438	0.15303296	0.28325182	0	0	0	
V1_W2_M3_R1			10.3359776	0	1.15189956	0.13761062	2.03046497	2.46795425	10.9719112	0.18918832	0.35201799	0	6.54	0.44	
V1_W2_M3_R2			12.2781865	0	1.27374907	0.15279837	2.25474437	2.29582745	10.25664379	0.17573823	0.33088651	0	0	0	
V1_W3_M1_R1			18.9989742	0	1.71120274	0.47425257	0.02520513		130.728355	5.91783945	3.25737944	0	73.9	1.7	
V1_W3_M1_R2			18.7216349	0	0	0.00283425	0.02520513		133.060991	5.93598352	3.2860591	0	0	0	
V1_W3_M2_R1			1.1162282	0	15.8003428	1.43203779	25.7253945		0	2.61536911	1.22828694	11.9961177	78.8	190	
V1_W3_M2_R2			0	0	15.6037157	0.16834489	26.0073217		0	2.62259934	1.04286381	11.9833237	0	0	
V1_W3_M3_R1			0	0	0	0.7133461	4.56128761	30.5356012	127.439021	1.80534981	4.34754861	0	2.55	0.329	
V1_W3_M3_R2			0	0	0	0.66224587	24.1516516	30.6552113	128.531121	1.81154237	4.3440197	0	0	0	
V2_W0_R1	3.82	10.16	5.20475887	0	0.3688195	0.14849318	0.7378077	0.92560269	3.49026627	0.14466102	0.24100214	0	3.61	0.364	
V2_W0_R2	3.82	10.16	5.2600658	0	0.37484248	0.18783784	0.76810436	0.94201939	3.5232071	0.14241808	0.24505225	0	0	0	
V2_W1_M1_R1	3.96	14.91	5.67397511	0	0.65310415	0.20721119	1.28440985	1.43481303	5.52400296	0.23961488	0.37395546	0	3.48	0.227	
V2_W1_M1_R2	3.96	14.91	5.6194943	0	0.52903076	0.23710835	1.05129392	1.20158677	4.60321598	0.20396422	0.31143469	0	0	0	
V2_W1_M2_R1	3.96	15.11	6.79246927	0	0.69535767	0.14897154	1.27683568	1.50060269	5.86362426	0.21161299	0.3397242	0	3.75	0.223	
V2_W1_M2_R2	3.96	15.11	6.56039939	0	0.74530208	0.14861277	1.43105407	1.5501641	6.04173669	0.2148677	0.35012377	0	0	0	
V2_W1_M3_R1	3.96	12.61	5.73882413	0	0.61010934	0.13318584	1.13818641	1.19401044	4.75328994	0.17925518	0.29759615	0	4.73	0.367	
V2_W1_M3_R2	3.96	12.61	5.51929793	0	0.50530949	0.12768476	0.9269514	1.02468821	4.0474645	0.15715254	0.25394647	0	0	0	
V2_W2_M1_R1	5.97	28.3	5.69294978	0	1.39467198	0.13438173	2.68920682	2.7825271	10.3807515	0.45760217	0.75251392	0	16.1	1.02	
V2_W2_M1_R2	5.97	28.3	7.66472396	0	2.14476464	0.2186917	4.13376815	3.09419891	11.5783817	0.50428296	0.84204711	0	0	0	
V2_W2_M2_R1	5.42	35.9	6.01583781	0	2.50642142	0.25994977	4.60841574	5.24667976	20.8170237	0.70587947	1.22462912	0	9.15	1.44	
V2_W2_M2_R2	5.42	35.9	6.65047941	0	2.35770015	0.25038268	4.28377867	4.5905082	18.2490621	0.61345716	1.07371649	0	0	0	
V2_W2_M3_R1	5.54	19.09	8.80613422	0	0.79431987	0.15949534	1.3883442	1.50088066	5.67925444	0.21634887	0.26330792	0	30.5	0.418	
V2_W2_M3_R2	5.54	19.09	5.72666324	0	1.14115085	0.17229132	2.01258153	2.01794729	8.10323373	0.2885419	0.51423298	0	0	0	
V2_W3_M1_R1			0	0	5.61678095	0.28948816	0.02520513	35.0476275	137.555021	6.91672787	11.1428801	0 KE		6.93	
V2_W3_M1_R2			0	0	0	0	0.02520513	35.3436783	128.740059	4.68355885	11.2428176	0	0	0	
V2_W3_M2_R1			0	0	29.8052539	0	34.1072586		102.209151	9.47128955	12.7632325	14.4754433	39.6	3.36	
V2_W3_M2_R2			2.46169788	0	14.6021405	0.38420234	19.6290343		100.588373	8.02192702	13.09223	13.993184	0	0	
V2_W3_M3_R1			0	0	7.66042439	0.25636211	13.7121397	15.2275853	0	2.13400847	4.0845045	4.71415629	42.3	3.17	
V2_W3_M3_R2			5.92837395	0	7.31702187	0.62780435	13.2200295	15.0410651	0	2.11972693	4.03970021	4.41472058	0	0	
V3_W0_R1	3.94	11.01	2.229254	0	0.18970534	0.07972973	0.31112981	0.60620438	2.10757988	0.06125847	0.33498715	0	2.06	0.0739	
V3_W0_R2	3.94	11.01	2.80703671	0	0.22380467	0.0779359	0.50511256	0.56281402	1.97224556	0.05427637	0.25200086	0	4.68	0.389	
V3_W1_M1_R1	4.38	24.1	1.45127919	0	0.95888621	0.09443913	1.25137808	2.11788016	6.92140237	0.21110876	2.14742056	0	0	0	
V3_W1_M1_R2	4.38	24.1	1.44836956	0	0.72788176	0.08606793	1.17269093	1.45714868	4.40147041	0.15460405	0.161820857	0	0	0	
V3_W1_M2_R1	4.23	19.69	2.47868314	0	0.79441253	0.03368811	1.22970755	1.68435057	5.60261834	0.14720763	1.05720942	0	3.66	0.297	
V3_W1_M2_R2	4.23	19.69	2.71925188	0	0.90708858	0.03464482	1.27704608	1.82022775	6.03855917	0.15283898	1.13220257	0	0	0	
V3_W1_M3_R1	4.42	19.83	1.35005793	0	0.58138436	0.00749821	0.8051336	1.18635853	3.52536982	0.09654096	1.39096745	0	1.98	2.03	
V3_W1_M3_R2	4.42	19.83	0.51678822	0	0.12252595	0.0790122	0.36499053	1.16916609	3.42468343	0.09564266	1.37471692	0	0	0	
V3_W2_M1_R1	4.82	89.2	1.30129353	0	2.8898536	0.16487682	4.80534399	6.04288016	16.1195976	0.43975518	6.44902398	0	25.9 KM		
V3_W2_M1_R2	4.82	89.2	1.48745336	0	3.83453484	0.20792873	0.0325689	6.82513327	18.9686538	0.49536864	7.26671049	0	0	0	
V3_W2_M2_R1	4.85	66.5	2.41018697	0	4.47834507	0.07689955	6.57853987	8.7273098	0	0.64850235	5.74592976	2.27365451	14.5	1.04	
V3_W2_M2_R2	4.85	66.5	2.40928394	0	4.33592476	0.20099259	6.32627814	8.62252412	0	0.63729661	5.64599143	2.21118518	0	0	
V3_W2_M3_R1	4.44	31	1.19732845	0	0.95471646	0.01921789	1.31260257	1.97683093	6.08193787	0.15752166	2.50906167	0	12.5	0.148	
V3_W2_M3_R2	4.44	31	1.21579103	0	0.92154374	0.02280555	1.26589522	1.94836997	5.75663609	0.14922928	2.45422655	0	0	0	
V3_W3_M1_R1			102.001725	0	0.03444056	0.02520513	32.211996	194.211737	3.97672976	0	0	0	50.8	8.64	
V3_W3_M1_R2			101.858137	0	0.02758909	0.02520513	31.9523879	194.919219	4.77631262	0	0	0	0	0	
V3_W3_M2_R1			128.350642	0	0	0.02520513	45.3370453	259.741648	8.82689313	0	0	0	55.8	10.8	
V3_W3_M2_R2			127.759041	0	0	0.02520513	43.7067593	260.537769	1.97388701	0	0	0	0	0	
V3_W3_M3_R1			1.20739638	0	1.93868606	0.05844296	2.65848938	3.70549876	12.631713	0.26126554	4.71179529	0	117	8.68	
V3_W3_M3_R2			1.15023057	0	1.83722202	0.06095432	2.46008837	3.66270313	11.5488994	0.2692387	4.79057045	0	0	0	
aurin			#WERT!	0	7.28876019	0	0.02520513	25.940004	0	0.54397787	0	0	5.1552574	0.201	0.011
aurin			#WERT!	0	7.57471275	0	0.02520513	26.8347802	0	0.48123352	0	0	5.84374118	0	0
wuxal			#DIV/0!	0	1.6630189	0	30.7960867	#WERT!	0	0.09541431	0	0	17.326462	0.0229	0.0011
wuxal			#DIV/0!	0	0	0	0.02520513	#WERT!	0	0.08045056	0	0	13.9704985	0	0
dünger_urin			23.1090001	0	2.4522146	0.43885434	5.03404166	7.06689806	0	0.52846657	0.52315974	2.09374331	0.312	0.0141	
dünger_urin			4.63468701	0	2.28171794	0.43881368	4.71024616	6.78844257	0	0.50811347	4.262639486	2.66367866	0	0	
			#DIV/0!	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12	0.0356	
			#DIV/0!	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
V1_W3_M1_R1			2.62430919	8.88079133	8.88079133	22.8695561	22.8695561	44.9105694	0	4.57019068	24.06	14.1038326	0	0	
V1_W3_M1_R2			18.610111	8.81361193	8.81361193	22.6707343	22.6707343	48.4391571	0	4.82818738	3.35732548	9.95495501	0	0	
V1_W3_M2_R1			2.11725905	18.1288454	18.1288454	28.9267831	28.9267831	53.2821159	0	3.02366525	33.1579101	11.9099526	0	0	
V1_W3_M2_R2			2.21073104	18.											

Anhang F - Strömungsprüfung



Anhang G – pH-Wert Veränderungen

