

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT UNR

Closing the loop on poop



Bachelorarbeit

von

Sarah Sommer

Bachelorstudiengang 2014

Studienrichtung Umweltingenieurwesen

Abgabedatum: 05. April 2018

Korrektor 1

Andreas Schönborn

Leiter + Dozent, Ökotechnologien

ZHAW Life Sciences and Facility Management

Korrektorin 2

Mira Bleuler

Wissenschaftliche Mitarbeiterin

ZHAW Life Sciences and Facility Management

Abstract

Closing the nutrient cycle is essential to longer space journeys. Converting organic waste such as faeces into food could save costs and natural resources. Human faeces have a great potential due to their nutrient content which can be exploited by using a thermal process for hygienisation such as pyrolysis. The resulting biochar (FK) shows determined properties making it suitable to be used in agriculture to improve the soil or to enhance crop productivity. The main aim of the present work is to investigate if biochar could be used as a hydroponic fertilizer. For this purpose, the author collected human faeces at the School for Applied Sciences (ZHAW) in Wädenswil (Switzerland) and conducted pyrolysis at 300°C with a residence time of 20 minutes. The resulting biochar (FK) was examined for its crop-available nutrient content (N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Cl) by way of different extraction methods (H₂O, CO₂, formic acid 2% (AS), hydrochloric acid (HCl)) and analytical methods (photometry, IC, ICP). The author conducted experiments with microgreens („Mustard Pizzo“) to analyze the biochar's suitability for use as a hydroponic fertilizer. In experiment 1, different amounts of biochar are combined with perlite and directly examined for its suitability for use as substrate fertilizer. In experiment 2, nutrients are extracted from the biochar with completely desalinated water (VE) and the biochar water extracts are used in different dilution ratios as nutrient solution in hydroponic cultures in order to evaluate if the biochar water extracts are suitable for the use as nutrient solution.

The analysis of the readily plant available nutrients in the water volume showed that biochar is not suitable for nitrogen supply, but that it contains important quantities of available phosphate and potassium. The examination showed only small amounts of available calcium and magnesium, but a relatively high concentration of the trace element chloride. The experiment 1 proves that biochar at a mass fraction of 5% or 7.5% in a perlite substrate can have a growth-stimulating effect on microgreens. The experiment 2 on the suitability of biochar as nutrient solution indicates a positive effect on the sprouting weight of the microgreens in the versions with a biochar water extract at a ratio of 1:20 and 1:50. Lower biochar concentrations did not produce significant results, whereas higher biochar concentrations led to a decrease in crop productivity.

Zusammenfassung

Das Schliessen der Nährstoffkreisläufe ist für längere Weltraumfahrten essentiell. Zu diesem Thema wird folglich viel geforscht. Ebenso wichtig sind die Erkenntnisse für die Abläufe auf der Erde. Kann der Nährstoffkreislauf geschlossen werden, indem organische Abfälle wie bspw. die Fäzes in Nahrungsmittel umgewandelt werden, können Kosten und natürliche Ressourcen gespart werden. Die menschlichen Fäzes bergen durch ihren Nährstoffgehalt grosses Potenzial, welches durch einen thermischen Hygienisierungsprozess, wie die Pyrolyse einen darstellt, ausgeschöpft werden kann. Die daraus entstehende Fäzeskohle (FK) besitzt verschiedene Eigenschaften, welche eine Anwendung in der Landwirtschaft zur Bodenverbesserung und Erhöhung des Pflanzenertrags interessant machen. Ob sich die FK auch als Düngemittel eignet, soll in dieser Arbeit mit einem hydroponischen Experiment erforscht werden. Dafür wurden menschliche Fäzes an der ZHAW Wädenswil, Schweiz, gesammelt und in der Folge bei 300°C und 20 min Aufenthaltszeit pyrolysiert. Die FK wurde anschliessend mittels verschiedenen Extraktionen (H₂O, CO₂, Ameisensäure 2% (AS), Salzsäure (HCl)) und Analysemethoden (Photometer, IC, ICP) auf ihren pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalt (N, P, K, Ca, Mg, Su, Na, Cl) geprüft. Die hydroponischen Experimente mit Microgreens „Mustard Pizzo“ sollen die Eignung der FK als Düngemittel aufzeigen. Im Experiment 1 wird die FK in verschiedenen Anteilen mit Perlit gemischt und direkt auf die Eignung als Substratdünger getestet. Im Experiment 2 werden die Nährstoffe mit vollentsalztem Wasser (VE) aus der FK extrahiert und die FK-Wasserextrakte in verschiedener Verdünnung als Nährlösung in einem erdlosen Anbauversuch ausgebracht, um die Eignung der FK-Wasserextrakte als Nährlösung zu evaluieren.

Die Analyse der leicht pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Wasservolumenextrakt bestätigte, dass die FK nicht als Stickstofflieferant in Frage kommt, die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphat und Kalium jedoch als hoch einzuschätzen sind. Calcium und Magnesium sind nur in geringen Mengen pflanzenverfügbar. Ausserdem wurde eine relativ hohe Konzentration an Chlorid festgestellt. Experiment 1, dass mit einem FK-Gewichtsanteil von 5 bzw. 7.5% im Perlitsubstrat eine wachstumsfördernde Wirkung auf die Microgreens erzielt werden kann. Im Experiment 2 zur Eignung der FK-Wasserextrakte als Nährlösung konnte in den Versionen mit Verhältnis (FK/VE) 1:20 und 1:50 Wasserextrakten ein positiver Einfluss auf das Sprossgewicht der Microgreens ausgemacht werden. Bei zu geringer FK-Konzentration wurden keine signifikanten Ergebnisse erzielt, eine hohe FK-Konzentration wiederum wirkte ertragsmindernd.

Abkürzungen / Glossar

AURIN	Flüssigdünger aus Urin
Biosolid	behandelter Klärschlamm
BTP	Biochar Testing Protocol
EBC	European Biochar Certificate
EC	Electronical electricity, Elektronische Leitfähigkeit
EcoSan	Ecological Sanitation
ESA	European Space Agency
FK	Fäzeskohle
HCL	Salzsäure
IBI	International Biochar Initiative
IC	Ionenchromatographie
Life-Support-Systeme	Lebenserhaltungssysteme
Makronährstoffe	Kohlenstoff C, Sauerstoff O, Wasserstoff H, Stickstoff N, Phosphor P, Kalium K, Magnesium Mg, Calcium Ca, Sulfat S
Mikronährstoffe	Eisen Fe, Mangan Mn, Zink Zn, Kupfer Cu, Molybdän Mo, Chlor Cl, Bor B
PCM	Pyrogenic Carbonaceous Material
Sd	Standardabweichung
TS	Trockensubstanz
VE	Vollentsalztes Wasser

Anmerkung: In dieser Arbeit werden einige fremdsprachige Wörter bewusst unübersetzt und ohne spezielle Kennzeichnung verwendet, da zum Teil kein geeignetes deutsches Wort zur Verfügung steht.

Inhaltsverzeichnis

1	Space – Einleitung und Fragestellung	6
1.1	Space Base 1 - Fäzes und ihr Potenzial	8
1.2	Space Base 2 – Pyrolyse und Analyse.....	13
1.3	Space Base 3 - Pflanzenproduktion	18
2	Material und Methoden	24
2.1	Organisation Fäzes	24
2.2	Pyrolyse der Fäzes.....	25
2.3	Nährstoffextraktionen	26
2.4	Analyse Fäzeskohle	27
2.5	Vorbereitung und Vorversuche zu den Experimenten mit Pflanzen	30
2.6	Experimente mit Pflanzen.....	32
3	Resultate und Datenanalyse.....	37
3.1	Pyrolyse der Fäzes.....	37
3.2	Analyse Fäzeskohle	37
3.3	Experimente mit Pflanzen.....	42
4	Interpretation und Diskussion der Resultate	46
4.1	Pyrolyse der Fäzes.....	46
4.2	Analyse Pyrokohle.....	48
4.3	Experimente mit Pflanzen.....	54
5	Fazit und Ausblick.....	57
6	Literaturverzeichnis.....	60
7	Abbildungverzeichnis.....	66
8	Tabellenverzeichnis	69
	Anhang.....	1

1 Space – Einleitung und Fragestellung

Längere Weltraumfahrten wie Marsmissionen oder Aufenthalte in einer Mondbasis stellen neue Herausforderungen. Das Schliessen der Wasser- und Nährstoffkreisläufe wird essentiell für den Erfolg bemannter Raumfahrt sein. Das Wohlergehen der Crew kann gesichert werden und es können Kosten, Energie und natürliche Ressourcen gespart werden. Die ESA (European Space Agency) forscht seit mehr als 25 Jahren an dieser Thematik mit dem Ziel, organische Abfälle (Urin, Fäkalien, Grünabfälle) in Nahrungsmittel, sauberes Wasser und Sauerstoff zu verwandeln. Das langjährige Life Support System Projekt der ESA ist MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative). Natürliche Prozesse wie aquatische Ökosysteme und mikrobielle Prozesse dienen als Vorbild um Nährstoffkreisläufe energieeffizient zu schliessen. (Lasseur et al., 2010)

In Life Support Systemen sind die menschlichen Fäkalien die mit Abstand grösste dauernd verfügbare Quelle von Nährstoffen. Eine möglichst vollständige Rückgewinnung der Nährstoffe für die Nahrungsmittelproduktion liegt daher auf der Hand. Aus menschlichen Abfällen sollen Wertstoffe entstehen. (Lasseur et al., 2010). Die ZHAW Wädenswil hat diese Idee aufgenommen und ein innovatives, ökotechnologisches Konzept für Life-Support Systeme, das SpaceLoop, mit integrierter Pyrokohle-Produktion erstellt. Der Fokus dabei liegt auf dem Handling der menschlichen Fäkalien. Mit der Pyrolyse, einer thermo-chemischen Zersetzung, der menschlichen Fäzes, soll einerseits der Kohlenstoffkreislauf ausbalanciert werden, andererseits die Pathogene beseitigt und die Nährstoffe zur Wiederverwertung verfügbar gemacht werden. (Schönborn & Bleuler, 2017)

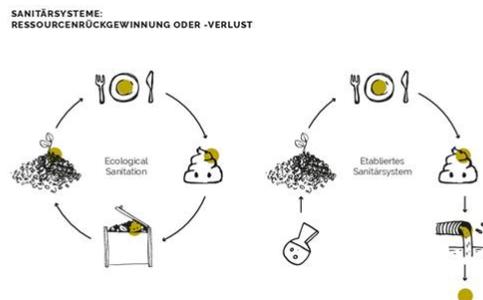


Abbildung 1 Der Unterschied zwischen EcoSan und herkömmlicher Toilette (Perret, 2017)

Die Projekte und Forschungen im Weltraum zu den geschlossenen Life Support Systemen verfolgen den gleichen Ansatz wie die Ecological Sanitation (EcoSan) auf der Erde (Abbildung 1). Das Ziel dabei: Kreisläufe schliessen. Aktuelle sanitäre Systeme führen auf der Erde einerseits zu Verunreinigung von Trinkwasser, Verlust von Nährstoffen oder hygienischen Problemen; andererseits ignorieren sie Diskussionen der Bodendegradation und der Ressourcenknappheit. (Esrey et al., 2000). Das SpaceLoop-Konzept von Schönborn and Bleuler (2017) nach dem Prinzip eines Life Support Systems könnte auch auf der Erde angewendet werden und neue Erkenntnisse in diesem Bereich könnten die Entwicklungen der EcoSan positiv beeinflussen und Innovationen zur Schliessung der Kreisläufe fördern.

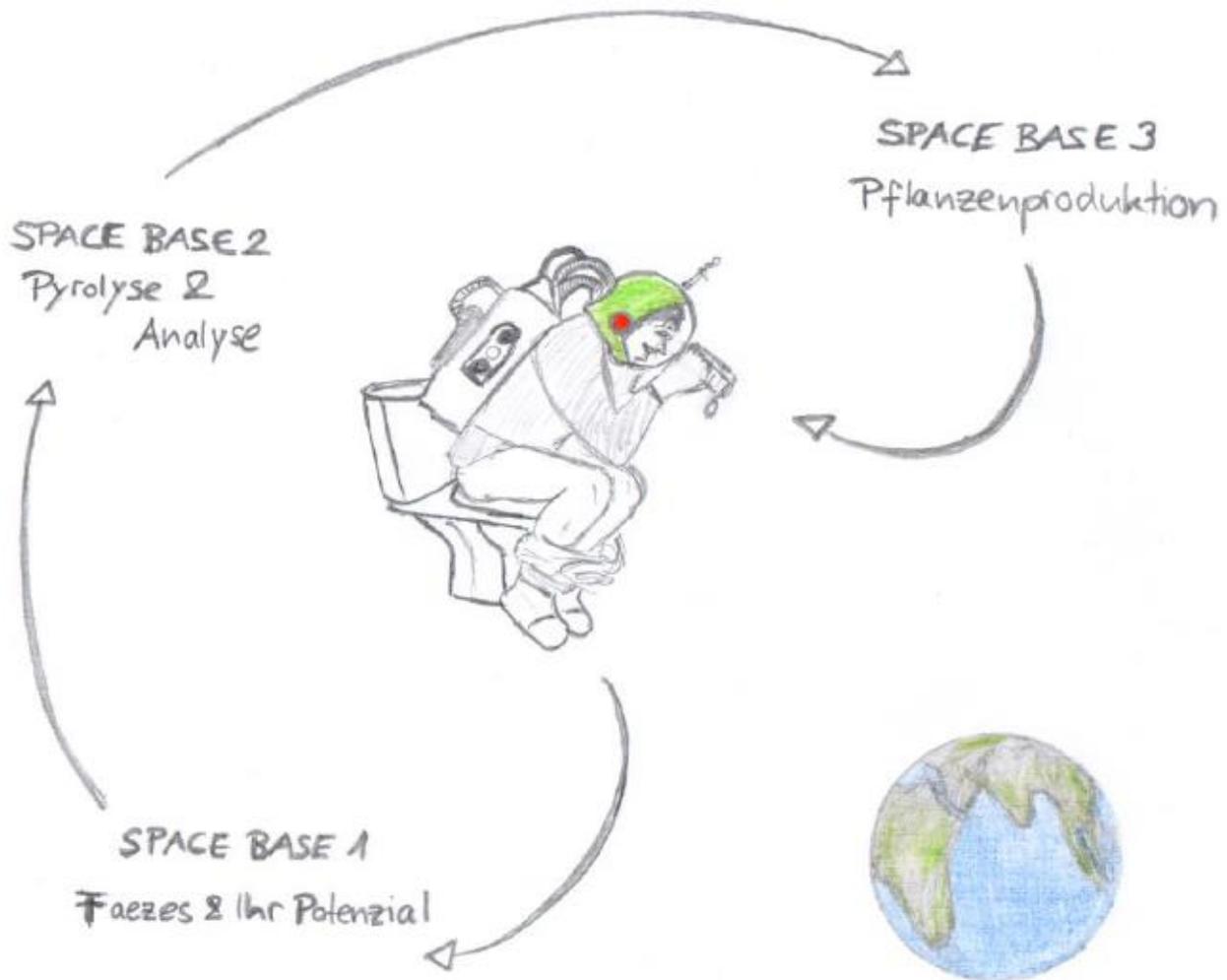


Abbildung 2 Überblick über die theoretischen Grundlagen des Kapitel 1

Zielsetzungen

Diese Arbeit soll im Rahmen des SpaceLoop Projekts von Schönborn and Bleuler (2017) die Gewinnung von Nährstoffen aus der Kohle menschlicher Fäzes und deren Wiederverwendung in der Pflanzenproduktion näher untersuchen. Dabei soll das Prinzip eines geschlossenen Nährstoffkreislaufes unter kontrollierten Bedingungen angewandt werden. Im Kapitel 1 werden die theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis der nachfolgenden Arbeit relevant sind, in Form von 3 Space Bases ausgeführt (Abbildung 2).

Folgende Fragestellungen werden in dieser Arbeit untersucht:

- Welche Charakteristika hat die Fäzeskohle (FK) und wie lassen sich diese mit den Ansprüchen der Pflanzen in der Pflanzenproduktion vereinbaren?
- Ist Pyrolysekohle aus menschlichen Fäkalien geeignet, um Pflanzen mit den benötigten Nährstoffen zu versorgen?

1.1 Space Base 1 - Fäzes und ihr Potenzial

Der „Gang zum Stuhl“, das „grosse Geschäft“, der Kot, the Shit oder lieber das medizinische Wort Fäzes? Zwar in der Abstraktion gerne als Schimpfwort verwendet, ist die Defäkation in der westlichen Welt ein quasi unsicht- (-riech-)barer Vorgang – ein Tabuthema (Perret, 2017). Obwohl die Darmentleerung wie auch das Essen, Trinken oder das Schlafen zur täglichen menschlichen Aktivität gehört, wird heutzutage kaum darüber gesprochen. Ganz anders als auf den antiken Toiletten der Griechen und Römer, denn da waren Gespräche noch üblich, die Bedürfnisanstalten waren öffentlich und „das Geschäft“ wurde in Gesellschaft erledigt (Steinig, 2016). Als kleine Einführung werden die Entwicklung der Sanitäranlagen und deren Zusammenhänge aus einer schweizerischen Sichtweise kurz erläutert, bevor auf nachhaltige Lösungen und das Potenzial der Fäzes im Nährstoffkreislauf eingegangen wird.

Wohin damit?

Schon seit Beginn der landwirtschaftlichen Geschichte und der Domestizierung von Tieren gehörte der Einsatz von Mist in der Landwirtschaft zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit zur Praxis (Jones, 2012). Der Nährstoffkreislauf war geschlossen und die organischen Abfälle konnten gleichzeitig verwertet werden. Es war üblich, dass nicht nur tierische, sondern auch menschliche Fäkalien kompostiert und in der Landwirtschaft als Dung wiederverwendet wurden. Der Urin wurde ausserdem zum Färben und in der Medizin verwendet. (Steinig, 2016)

Die Entsorgung von Abfällen mit Hilfe Wasser ist herkömmlich und auch die Römer hatten Wassersysteme, welche Wasser in und Abwasser aus den Städten leiteten. Jedoch waren die sanitären Anlagen oft technisch noch nicht weit ausgereift und die fehlende Abfallbewirtschaftung führte zu schlechten Hygienebedingungen und Epidemien. Nachttöpfe, Aborte oder Wassergraben erlaubten die Verrichtung der Notdurft. Vor allem in Städten wurden Abfälle einfach ausserhalb des Hauses oder der Stadtmauern in Gruben beseitigt oder in Hügeln angehäuft. Im Mittelalter wurden die Fäkalien in Gruben gelagert, bevor sie auf den Feldern ausgebracht wurden. (Kettler, 2000; Steinig, 2016)

Im 19. Jahrhundert führten die problematischen Hygieneverhältnisse bzw. die Angst vor Seuchen und die vollen Gruben zu einem Umdenken und während der sogenannten Kloakenreform im Rahmen der hygienischen Revolution wurden erste geschlossene Kanalsysteme und Systeme zur Frischwasserzufuhr entwickelt. Kübelsysteme trennten feste und flüssige Stoffe, verhinderten so einen Einschwemmen der Exkremete in die Flüsse und erlauben weiterhin eine Verwendung der Feststoffe als Dünger. Die Folgen der neuen sanitären Einrichtungen sind verbesserte Gesundheitszustände und saubere Städte. Keine Beachtung geschenkt wurde dabei jedoch dem Recycling der Abfälle, das Problem wurde externalisiert. Das Abwasser wurde an vielen Orten noch

immer ungereinigt in die Gewässer geleitet und führte zu starker Wasserverschmutzung. (Stadtentwässerung Zürich Abteilung des Bauamtes I (Hrsg.), 1992). Die erste Abwasserreinigungsanlage der Schweiz wurde 1917 in St. Gallen realisiert (Ghiselli, 2017). In Zürich wurden die Schwemmkanalisation und das Klärwerk Werdhölzli im Jahr 1926 fertiggestellt (Stadtentwässerung Zürich Abteilung des Bauamtes I (Hrsg.), 1992). Bis 1965 waren jedoch erst 14% der Haushalte der Schweiz an eine zentrale Kläranlage angeschlossen (BAFU, 2017). Mit den neuen Entwässerungssystemen verschwand „das Geschäft“ aus der Öffentlichkeit und die „Privatisierung des Defäzieren“ nahm ihren Lauf (Stadtentwässerung Zürich Abteilung des Bauamtes I (Hrsg.), 1992).

Das Abschwemmen der Nährstoffe mittels der neuen sanitären Anlagen führte zu einem Fehlen der zuvor ausgebrachten Nährstoffe in der Landwirtschaft. Mit der industriellen Revolution und der Entwicklung von chemisch-synthetischen Düngemitteln konnte das Nährstoffproblem vordergründig behoben werden (Jones, 2012). Die fortschreitende Industrialisierung brachte zudem neue Abfälle aus Kunststoff, Schwermetallen und Medikamentenrückstände in den Umlauf, was die Abfallentsorgung vor neue Herausforderungen stellt. (Wälti & Almeida, 2016). Eine Folge davon ist das in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) festgehaltene Verbot der Ausbringung von Klärschlamm in der Schweizer Landwirtschaft, welches seit dem 1. Oktober 2006 in der Schweiz gilt (ChemRRV; SR 814.81).

Und jetzt?

Was die Bekämpfung der Wasserverschmutzung betrifft, wurden in der Schweiz viele Fortschritte erzielt. Im 2005 waren 97% der Einwohnerinnen und Einwohner an eine zentrale Kläranlage angeschlossen (BAFU, 2017). Dank dem Kanalsystem und den Abwasserreinigungsanlagen wird das Abwasser nicht ungeklärt in die Gewässer geleitet, in einem mehrstufigen Prozess gereinigt und aufbereitet bevor es in die Gewässer gelangt (AWEL, 2004). Es kann gesagt werden, dass in der westlichen Welt durch die Abwasserreinigung und die Industrialisierung viele Probleme vordergründig gelöst wurden. Die Hygiene ist soweit gewährleistet, die Landwirtschaft wird mit wichtigsten Nährstoffen versorgt und auch die Gewässer sind sauber.

Die Schwachstellen der konventionellen sanitären Anlagen werden beim näheren Hinschauen jedoch schnell ersichtlich. Das offensichtlichste Problem ist der unterbrochene Nährstoffkreislauf. Düngemittel müssen ressourcen- und energieaufwändig hergestellt werden, während wertvolle Nährstoffe aus den Abfällen ungenutzt vergeudet werden. Trotz vielen Vorteilen hat die Herstellung von chemisch-synthetischen und mineralischen Düngemitteln verschiedenste negative Auswirkungen auf die Umwelt, zudem führt die vermehrte Nutzung natürlicher Ressourcen zu deren Verknappung. (Esrey et al., 2000)

Ein weiteres Problem ist die Verschwendung und Verschmutzung von sauberem Wasser. Für das im Westen konventionelle WC-Modell mit Wasserspülung ist viel Wasser notwendig: ungefähr 15'000 Liter Wasser pro Person und Jahr (Esrey et al., 2000). Angesichts der Tatsache, dass mehrere Hundert Millionen Menschen noch immer ohne sauberes Wasser auskommen müssen, ist es zudem ethisch diskutabel, Trinkwasser für die Entledigung der Fäkalien zu vergeuden. Zudem gibt es in vielen Ländern noch keine Abwasserreinigungsanlagen wie sie in der Schweiz üblich sind, und das Schmutzwasser wird ungereinigt in die Gewässer geleitet. Abgesehen davon ist das Konzept auch in Ländern mit genügend Wasservorkommen nicht sinnreich, da die Aufbereitung des Wassers sehr energie- und kostenintensiv ist. (Esrey et al., 2000)

Im Weltraum werden menschliche Fäzes gesammelt, reduziert und stabilisiert und in Containern gelagert zurück auf die Erde gebracht (Anderson et al., 2015). Könnte der Kreislauf geschlossen werden und die Abfallstoffe als Wertstoffe wiederverwertet werden?

Wie weiter?

Das Schliessen der Kreisläufe stösst in verschiedenen Fachgebieten auf grosses Interesse, denn nicht nur aus ökologischen, sondern auch aus ökonomischen Gründen müssen zukunftsfähige Lösungen gefunden werden. Viele Kanalisationssysteme bedürfen kurzfristig einer Sanierung, andererseits entstehen Sorgen um die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen und zu neuen Erkenntnisse betreffend Mikroverunreinigungen im Wasser. Die Komplexität der Herausforderung ruft Verantwortungsträger aus verschiedensten Bereichen auf den Plan. Viele Organisationen, Unternehmer/Innen, Hochschulen und Forscher/Innen nehmen sich der Thematik an, und es sind bereits vielversprechende Lösungsansätze ausgearbeitet worden und ein stetiger Ausbau der Technologien findet statt, um den Prozess nachhaltiger zu gestalten.

In der Schweiz macht der Klärschlamm ungefähr 0.2% des gesamten Abwasservolumens aus und muss in einem energieaufwändigen und kostenintensiven Prozess hygienisiert, anaerobisch zersetzt und entwässert werden (AWEL, 2004). Seit dem 1. Juli 2015 wird der gesamte Klärschlamm der zürcherischen Abwasserreinigungsanlagen in der Klärschlammverwertungsanlage (KSV) Werdhölzli zentral verbrannt, mit dem Ziel, den Phosphor-Kreislauf zu schliessen. (AWEL, 2018). Die Menge Phosphor im Klärschlamm ist ungefähr gleich der importierten Menge an Mineräldünger und eine Rückgewinnung ist in Zukunft von grosser ökologischer und ökonomischer Bedeutung (AWEL, n.d.). Ein Versuch, ein bestehendes System zu verbessern und einen Kreislauf zu schliessen.

Alternative Sanitärkonzepte wie das Konzept der EcoSan setzen genau dort an. Stoffströme sollen getrennt erfasst und gezielt behandelt werden, um eine Wiederverwendung der Stoffe zu ermöglichen. Dabei werden die menschlichen Fäzes und der Urin nicht nur als Abfall-, sondern auch als Wertstoffe definiert. Gleichzeitig darf bei der Verwendungen der Fäkalien die Hygiene nicht

ausser Acht gelassen werden und muss den Anforderungen der modernen Gesellschaft entsprechen. (Esrey et al., 2000).

Diesem nachhaltigen Ansatz soll auch diese Bachelorarbeit folgen und das Potenzial der Fäzes im Nährstoffkreislauf erforscht werden.

Fäzes als Düngemittel?

Menschliche Fäzes werden zur sekundären Biomasse gezählt. Als Biomasse versteht man jedes organische Material mit pflanzlichem oder tierischem Ursprung, welchem Sonnenlicht als Energiequelle dient. Die sekundäre Biomasse bezieht ihre Energie im Gegensatz zu primärer Biomasse nur indirekt von der Sonne; gespeichert wird die Energie in Form von Kohlenstoff. (Pankratius, 2010) Je nach Ernährung und Stoffwechsel unterscheidet sich die Menge und Zusammensetzung der Fäzes (Jönsson et al., 2010).

Wie auch tierische Fäkalien haben auch menschliche Fäkalien einen hohen Nährwert und könnten als Düngemittel verwendet werden. In Kombination reichen der Urin und die Fäzes einer Person für die Düngung von 200 bis 900 m² Erntegut (Steinig, 2016). Aufgrund der hygienischen Bedenken und durch die Tabuisierung der Thematik, ist der Gedanke für viele Köpfe jedoch abwegig.

Ein Pionier auf dem Gebiet ist das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs EAWAG. Die EAWAG hat sich des Urins angenommen und daraus in einem Recyclingverfahren den Flüssigdünger AURIN entwickelt (Eawag, 2018). Die EAWAG hat das Potenzial im Urin als Düngemittel erkannt, AURIN darf heute zur Düngung von Blumen, Zierpflanzen oder Rasen eingesetzt werden (Eawag, 2018). Die Wiederverwendung des menschlichen Urins stellt aufgrund der geringen pathogener Belastung eine kleinere Hürde dar, zudem findet sich ungefähr 80% der Nährstoffe der Fäkalien im Urin. Bei den Fäzes ist die Hemmschwelle aus gutem Grunde grösser: Quasi die gesamte pathogene Belastung befindet sich in den Fäzes. Eine getrennte Behandlung macht aufgrund der verschiedenen Charakteristik durchaus Sinn. (Esrey et al., 2000).

Die Fäzes eignen sich dank des hohen Anteils an organischer Materie zur Strukturverbesserung eines Bodens und dessen Wasserhaltevermögen kann gesteigert werden (Jönsson et al., 2010). Reich an Kalium und Phosphor eignet sich der Fäzes auch als langfristiger Nährstofflieferant und zur Förderung von Mikroorganismen. Von der gesamten Menge an Nährstoffen findet sich in den Fäzes, je nach Ernährung, ungefähr 12-30% N und 36-75% P (Jönsson et al., 2010). Um diese Nährstoffe pflanzenverfügbar zu machen, braucht es im Gegensatz zu den Nährstoffen im Urin einen Zersetzungsprozess durch Mikroorganismen (Jönsson et al., 2010). Oft kommt bei der Verwendung der Fäzes in der Landwirtschaft auch die Frage nach der Schwermetallbelastung auf. Dabei ist zu gut zu wissen, dass der Körper keine Metalle produziert und nur ausgeschieden, wird was aufgenommen wird. Die Schwermetallbelastung in den Fäzes sollte deswegen grundsätzlich kein

Problem darstellen (Jönsson et al. 2010). Die Konzentration der Schwermetalle in den Fäzes kann sich jedoch beim Transport im Kontakt mit Metallen oder bei der Weiterverarbeitung verändern (Bleuler, 2016). Ungenügend erforscht ist jedoch der Gehalt an Mikroverunreinigungen, multiresistenten Keimen und pharmazeutischen Rückständen und deren Auswirkungen auf die Umwelt bei der Ausbringung (Steinig, 2016).

Wie bereits erwähnt, ist die Hygienisierung der Fäzes ein wichtiger Schritt bei der Wiederverwendung als Düngemittel. Je nach angewandter Methode können Viren, Bakterien oder resistente Wurmeier überleben. In der Abbildung 3 werden einige Methoden zur Hygienisierung der Fäzes aufgezeigt.

Verfahren	Zeit	Temperatur	Weitere wichtige Parameter	Mögliche verbleibende Pathogene
Trocknung	1-2 Jahre		Wassergehalt	Wurmeier
Basische Behandlung	Stunden bzw. Monate	70 °C bzw. Umgebungstemperatur	pH>9 bis 12,5	
Aerobe Kompostierung	Mehrere Tage	50-55 °C		Wurmeier, Bakteriensporen
Pasteurisierung	10-30 min.	65-95 °C		Bakteriensporen, Viren
Auskochen	15 min.	100 °C		Bakteriensporen
Thermische Konditionierung	45-60 min	Hochtherm. 180-210 °C; Niedertherm. 80-90 °C, Autoklavieren 120-130 °C	2-20 bar	keine

Abbildung 3 Behandlungsmöglichkeiten zur Hygienisierung von menschlichen Fäkalien (Krause & Jacobsen, 2011)

Nach der thermischen Konditionierung sollten keine Pathogene verbleiben (Krause & Jacobsen, 2011). Durch die hohen Temperaturen kann eine schnelle Hygienisierung sichergestellt und damit das Risiko für gesundheitliche Beeinträchtigungen stark minimiert werden. Die Pyrolyse von Fäzes bringt zusätzlich zur Hygienisierung weitere Vorteile auf mit sich, denn aufgrund der fehlenden Oxidationsmitteln wird ein Teil des Kohlenstoffs, im Gegensatz zu einer Verbrennung, in stabiler Form erhalten und kann je nach Verwendung als CO₂-Senke wirken.(Lehmann & Joseph, 2015) Auch einige essentielle Nährstoffe werden in der Kohle erhalten und können so – wenn auch nicht im gleichen Masse wie im Ausgangsmaterial - wiederverwertet werden (Angst & Sohi, 2013).

Die Umwandlung von Fäkalien oder Klärschlamm in Kohle durch Pyrolyse und auch die Anwendung der Kohle in der Landwirtschaft wurde bereits vielfach diskutiert, erforscht und in der Praxis erprobt. Experimente mit reiner menschlicher Fäzes sind jedoch bis anhin äusserst rar. (Bleuler, 2016; Jeffery et al., 2011; Lehmann & Joseph, 2015; Liu et al., 2014; Lopez-Capel et al., 2016; Ward, Yacob & Montoya, 2014). Die Produktion von Kohle aus menschlichen Fäkalien wäre einerseits eine nachhaltige Lösung zur Entsorgung von Abfallstoffen, da kein sauberes Wasser verschmutzt und wieder aufgereinigt werden müsste, andererseits könnte das Pyrolyseprodukt in hygienischer Form zur Bodenverbesserung oder als Nährstofflieferant verwendet werden, was auch für die Raumfahrt interessant sein könnte. (Bleuler, 2016; Schönborn & Bleuler, 2017).

Im folgenden Kapitel wird näher auf den Prozess und die Charakteristik einer Pyrolysekohle eingegangen und deren Eignung als Düngemittel diskutiert.

1.2 Space Base 2 – Pyrolyse und Analyse

Pyrogenes kohlenstoffhaltiges Material (PCM)

Die Begrifflichkeiten rund um die Kohle sind verwirrend. Vor allem wenn es vom Englischen ins Deutsche übersetzt werden soll. Die meisten Literaturwerke und wissenschaftlichen Papers werden englisch publiziert, man spricht von „Biochar“. Als Biochar wird das solide Produkt der Pyrolyse oder allgemein der thermischen Zersetzung von Biomasse bezeichnet; als Biochar werden Pyrolyseprodukte definiert, welche spezifisch für den Einsatz im Boden produziert werden (Brown et al., 2015). Eine Übersetzung von Biochar ins Deutsch bringt schnell den Begriff „Biokohle“ hervor, welcher jedoch problematisch sein kann, da der Begriff „Bio“ durch die Bioverordnung in der Schweiz geschützt ist. Um bei dem Begriff zu bleiben, müsste die Kohle also zertifiziert werden (Schmidt, 2010). Oft wird heute der Begriff Pflanzenkohle verwendet, was jedoch nur bei pflanzlichen Ausgangsmaterialien Sinn macht. Die alternative Bezeichnung Pyrokohle kann für Kohlen genutzt werden, welche durch die Pyrolyse aus jeglicher Biomasse hergestellt werden. Jedoch gibt es auch hierfür Einschränkungen: gemäss der IBI (International Biochar Initiative) gilt dies nur für Kohlen aus einer Herstellung ab 350°C (Schmidt, 2010). Korrekt verwendet werden kann der Begriff „Pyrogenic Carbonaceous Material (PCM) oder auf Deutsch Pyrogenes kohlenstoffhaltiges Material, welcher für alle Materialien genutzt werden kann, welche durch thermische Zersetzung hergestellt wurden (Lehmann & Joseph, 2015). Zur Vereinfachung wird in dieser Arbeit für jegliche Kohle aus Biomasse das Wort Pyrokohle verwendet; die selber hergestellte Kohle wird Fäzeskohle genannt (FK).

Der Einsatz von Kohle oder Asche in der Landwirtschaft war früher in vielen Teilen der Welt üblich und seit einigen Jahren beschäftigen sich viele ForscherInnen mit der Anwendung von Pyrokohle zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge im Boden kann der Einfluss der Kohle jedoch nur im Kontext zu den vorherrschenden Bedingungen betrachtet werden, zudem resultieren je nach Ausgangsmaterial und Art der thermischen Zersetzung unterschiedliche Kohlen mit unterschiedlichen Eigenschaften (Brown et al., 2015; Lehmann & Joseph, 2015).

Es existieren Qualitätskriterien oder Standards, welche den Handel und die Anwendung von Pyrokohle regeln. Zwei Labels stehen hinter diesen Standards: The International Biochar Initiative (IBI) und The European Biochar Certificate (EBC), wobei die Pyrokohlen unterschiedlich kategorisiert werden. Die erwünschten Eigenschaften einer Pyrokohle sind im Biochar Testing Protocol (BTP) zusammengefasst und reichen von grundsätzlichen Materialeigenschaften und der Überprüfung von potentiell toxischen Inhaltsstoffen bis zu langfristigen Kohlenstoffspeicher- oder Alkalinitätspufferkapazitäten. Trotz aufwändiger Analysen ist es jedoch schwierig, den Effekt einer

Pyrokohle bei einem Einsatz in der Landwirtschaft nur aufgrund einer Analyse abzuschätzen und erst praktische und vor allem langjährige Untersuchungen können Aufschluss bringen. (Lopez-Capel et al., 2016)

Die Herstellung und Anwendung von Pyrokohle stösst auf grosses Interesse, es können dabei vier Hauptambitionen unterschieden werden (Lehmann & Joseph, 2015)

- Die Anwendung von Pyrokohle zur Bodenverbesserung:
- Entsorgung und Recycling von Abfallstoffen
- Positiver Einfluss auf das Klima durch die stabile Einlagerung von Kohlenstoff und Reduzierung der Treibhausgase
- Herstellung eines stabilen Brennstoffs

Die Eigenschaften und die Verwendung von Pyrokohle zur CO₂-Sequestrierung und zur Bodenverbesserung wurden in diversen Studien untersucht (Bleuler, 2016; Lehmann & Joseph, 2015; Schmidt, 2013). Die vielen Vorteile der Pyrolyse zur Abfallbewirtschaftung in der Raumfahrt werden in der Studie von Serio et al. (2002) diskutiert und Pyrolysereaktoren den Bedingungen im Weltraum angepasst. Wie bereits erwähnt, sind Pyrokohlen aus menschlichen Abfallstoffen jedoch noch zu wenig untersucht und es besteht noch Aufholbedarf. In dieser Arbeit wird die Möglichkeit untersucht, die Pyrokohle aus menschlichen Fäzes als Düngemittel anzuwenden. Auf weitere Einsatzmöglichkeiten wird nicht oder nur im Ansatz eingegangen.

Herstellung der Pyrokohle

Es existieren verschiedene Technologien zur thermischen Zersetzung von Biomasse mit jeweils unterschiedlichen Zielen und Endprodukten. Je nach Literatur können sich die Einteilungen und Parametergrössen jedoch unterscheiden. (Basu, 2013; Boateng et al., 2015; Brown et al., 2015; EBC, 2012; Mašek, Ronsse & Dickinson, 2016). Für das weitere Verständnis wird in dieser Arbeit die Herstellung von PCM durch Pyrolyse kurz erläutert; weitere Technologien werden jedoch nicht weiter ausgeführt.

Die Pyrolyse ist eine thermochemische Umwandlung von Biomasse in einer inerten Atmosphäre, also ohne Oxidationsmittel. Ein Temperaturbereich von 300-600°C ist dabei typisch (Basu, 2013). Gemäss den Richtlinien der EBC darf eine Pyrokohle als solche deklariert werden, wenn sie zwischen 350°C und 1000°C pyrolysiert wurde (EBC, 2012).

Während des Prozesses werden organische Makromoleküle der Biomasse in mehreren gleichzeitig oder nebeneinander ablaufenden Reaktionen in kleinere und einfachere Moleküle gespalten (Basu, 2013). Dabei bestimmt die Aufheizrate das Verhalten der drei Hauptkomponenten (Zellulose, Hemizellulose, Lignin) einer Biomasse (Brown et al., 2015). Eine Studie von Yang et al. 2007 beschreibt den Zersetzungsprozess bei einer konstanten Aufheizrate von 10°C/min wie folgt:

Hemizellulose zerfällt als erste Komponente ab 220°C bis 315°C, die Spaltung von Zellulose beginnt ab circa 315°C und hat sich bis 400°C vollständig umgewandelt. Die Zersetzung des Lignins beginnt bereits bei 160°C, geht jedoch nur ein sehr langsam und kontinuierlicher vorstatten. Diese Zahlen sind keine Standardwerte und sollen nur in etwa einen Anhaltspunkt geben.

Aus der thermischen Zersetzung einer Biomasse resultieren drei Produkte (Basu, 2013):

- Flüssige Produkte: Teere (kondensierbare Gase), schwere Kohlenwasserstoffe und Wasser
- Feste Produkte (Kohle und Asche)
- Gasförmige Produkte (CO₂, H₂O, CO, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₆H₆ etc.)

Die Zusammensetzung dieser drei Komponenten wird von der Aufheizrate, der Verweilzeit und der Pyrolysetemperatur beeinflusst. Diese drei Parameter sind auch bei der Charakterisierung der Pyrokohle von Bedeutung (Boateng et al., 2015; Mašek, Ronsse & Dickinson, 2016). Zudem sind das Produkt und der Ertrag abhängig von dem Pyrolyseapparat und den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Biomasse. Der Pyrokohle-Ertrag nimmt bei steigender Pyrolysetemperatur ab. Wird die Aufheizrate erhöht, erhöht sich der Ertrag der flüssigen Masse. Brennbar flüssige Produkte oder Pyrokohle sind die erwünschten Endprodukte bei der Pyrolyse. Der Kohlenstoff bleibt, im Gegensatz zu der vollständigen Verbrennung mit Sauerstoff, teilweise erhalten. Nicht kondensierbare Gase wie CO, CO₂, H₂ und CH₄ entweichen. (Basu, 2013) Wie bereits erwähnt, ist das Endprodukt auch vom Pyrolyseapparat bzw. vom Reaktortyp abhängig und die Möglichkeiten zur Kontrolle der Prozessparameter können beschränkt sein. Je nach erwünschtem Endprodukt, muss eine unterschiedliche Technologie ausgewählt und die Parameter wenn möglich angepasst werden (Boateng et al., 2015).

Eigenschaften der Pyrokohle

Während des Karbonisierungsprozesses wird die chemische Struktur der Biomasse verändert und lange Molekülketten ordnen sich neu zu aromatischen Ring-Strukturen mit 6 Kohlenstoffatomen oder eingebauten Stickstoffatomen. Diese Verbindungen sind stabil und sehr resistent gegen mikrobiologischen Abbau. Bei dem Prozess geht ein grosser Teil des Sauerstoffs, Wasserstoffs und Stickstoffs als volatile Gase verloren, was in einem Massenverlust resultiert. Im Gegensatz dazu bleibt der Kohlenstoff, je nach Pyrolysetemperatur, zu einem grossen Teil erhalten. Das H/C Verhältnis zeigt den Grad der Aromatisierung an. Je höher die Pyrolyse-Temperatur, umso höher die Stabilität und umso kleiner die Reaktivität. Der Grund dafür ist die Auflösung organischer funktionaler Gruppen (COOH) während der Erhitzung, auch Decarboxylierung genannt. Bei 450°C wurde eine gute Balance zwischen Kohleertrag und Stabilität der Pyrokohlen festgestellt. (Lopez-Capel et al., 2016).

Das C/N Verhältnis hingegen deutet auf die Möglichkeiten der Mobilisierung bzw. Immobilisierung des Stickstoffs hin und Pyrokohlen können C/N Werte von bis zu 1700 erreichen (Cross et al., 2016). Da der Kohlenstoff in der Pyrokohle im Gegensatz zum Ausgangsmaterial jedoch in stabilerer Form vorliegt und je nach Pyrokohle schwer mineralisiert wird, ist dieser Wert differenzierter zu interpretieren. (Lopez-Capel et al., 2016)

Die Eigenschaften der Pyrokohle kurz zu beschreiben ist quasi unmöglich, da sehr viele Faktoren das Resultat beeinflussen. Tendenziell minimiert sich bei höherer Pyrolysetemperaturen der Pyrokohle-Ertrag, im Verhältnis ist dafür der Gehalt an Calcium, Kalium und Magnesium grösser. Die spezifische Oberfläche nimmt zu, die Kationenaustauschkapazität nimmt ab (Ippolito et al., 2015). Andere Studien belegen wiederum eine steigende Kationenaustauschkapazität mit steigender Pyrolysetemperatur im Zusammenhang mit Klärschlamm und tierischen Fäkalien (Bleuler, 2016). Im Prozess der Pyrolyse erlangt die Pyrokohle eine grosse Porosität. Das im Vergleich zur Biomasse grosse Oberflächen-zu Volumen-Verhältnis führt trotz der eigentlichen Hydrophobie der Kohle zu hoher Wasserspeicherkapazität. (Lopez-Capel et al., 2016)

Das Ausgangsmaterial und die Temperatur während der Pyrolyse haben den grössten Einfluss auf den Nährwert einer Pyrokohle. Zellulosereiche Biomasse wie Holz oder Stroh haben einen Kohlenstoffanteil von bis zu 50% und einen Aschegehalt bis zu 15%. Nährstoffreiche Ausgangsstoffe wie Gärreste oder Bioabfall kommen über 20% Aschegehalt (Lopez-Capel et al.) und Pyrokohle aus Fäzesschlamm kommt auf einen Aschegehalt von über 40% (Bleuler, 2016). Die für die Pflanzen interessanten Nährstoffe befinden sich nach der Pyrolyse in der Asche, es sind dies hauptsächlich Kalium, Calcium und Phosphate. Stickstoff geht, je nach Pyrolysetemperatur zu einem Grossteil während der Pyrolyse verloren oder ist für Pflanzen nicht verfügbar (Cross et al., 2016; Lopez-Capel et al., 2016). Die typische hohe pH-Wert der Pyrokohle kommt vom Aschegehalt, welcher in Kontakt mit Wasser ausgeschwemmt wird. Die Kohlenstoffmatrix der Kohle an sich würde nicht basisch sein. Typische pH-Werte von Kohlen liegen zwischen 8-11, je nach Ausgangsmaterial und Pyrolysetemperatur. Diese Eigenschaft von Pyrokohle ist beim Einsatz als Bodenverbesserer bei den tendenziell eher sauren Böden von Vorteil. (Lopez-Capel et al., 2016)

Viele der besprochenen Eigenschaften können für eine Anwendung zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft interessant sein: Einerseits kann durch die erhöhte Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit und den positiven Einfluss auf die Bodenstruktur die Bodenqualität verbessert werden, andererseits kann die Pyrokohle auch zur Bodensanierung eingesetzt werden, indem flüssige oder volatile Schadstoffe adsorbiert werden oder Nitrat – und Phosphat Auswaschungen verhindert werden. Der landwirtschaftliche Einsatz von Pyrokohle kann sich jedoch auch negativ auswirken. Je nach vorhandenen Bodeneigenschaften und dem C:N Verhältnis der Pyrokohle können Stickstoff und andere Nährstoffe immobilisiert werden. Zudem können toxische Substanzen, welche entweder auf das Ausgangsmaterial zurückzuführen sind oder während der Pyrolyse

entstehen, die Umwelt negativ belasten. (Lehmann & Joseph, 2015; Lopez-Capel et al., 2016). Die Auswirkungen von Pyrokohle auf die Bodeneigenschaften, das Ökosystem Boden und den Pflanzenanbau wurden in verschiedensten Studien diskutiert, sie werden in dieser Arbeit nicht weiter beleuchtet. Auf die Eignung der Pyrokohle als reiner Nährstofflieferant oder Düngersatzmittel wird jedoch näher eingegangen.

Pyrokohle als Nährstofflieferant

Da der Grossteil des Makronährstoffs Stickstoff während der Pyrolyse verloren geht oder in den stabilen Ringstrukturen der Pyrokohle eingeschlossen ist, ist eine Pyrokohle grundsätzlich nicht vergleichbar mit einem konventionellen Pflanzendünger. Der enthaltene Stickstoff wird oft erst durch Mineralisation durch Mikroorganismen oder Verwitterung frei. (Allaire et al., 2015; Camps-Arbestain et al., 2015; Cross et al., 2016; Ippolito et al., 2015; Lopez-Capel et al., 2016). Da die Pyrokohle jedoch auch andere, für Pflanzen essentielle Nährstoffe wie Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium enthält, kann eine Anwendung als Nährstofflieferant durchaus interessant sein (Liu et al., 2014).

Je nach Nährstoffgehalt des Ausgangsmaterials und den Pyrolysebedingungen variieren der Aschegehalt und auch die Nährstoffkonzentration in der Pyrokohle (Ippolito et al., 2015). Wu et al. (2017) beschreibt, dass die totalen Stickstoff- und Phosphoranteile in der Pyrokohle aus Reis, Mais und Weizen bei tiefen Pyrolysetemperaturen am höchsten sind. Auch Bleuler 2016 stellt bei den Pyrokohlen aus Fäkalschlamm bei zunehmenden Pyrolysetemperaturen eine abnehmende Stickstoffkonzentration fest. Im Gegensatz zu Wu et al. (2017) steigt in der Studie von Bleuler (2016) der prozentuale Anteil des gesamten P-Gehalts in der Pyrokohle mit zunehmender Pyrolysetemperatur stetig bis 600°C, wo hingegen der prozentuale Anteil an pflanzenverfügbarem P bei 450°C einen Peak erreicht (Bleuler, 2016). Wang et al. (2012) hält fest, dass der pflanzenverfügbare Phosphatgehalt ebenfalls stark von dem Ausgangsmaterial und dessen Konzentration an Kationen (Ca, Mg, Al, Fe) abhängt, da die Komplexe des Phosphats mit den Kationen unterschiedlich wasserlöslich sind.

Die grosse Oberfläche der Pyrokohle ist grundsätzlich negativ geladen und zieht Kationen oder positiv geladene Moleküle an. Aufgrund der geringeren Reaktivität der Pyrokohle ist die Kationenaustauschkapazität jedoch meist nicht so hoch wie im Humus, denn die chemischen Verbindungen zwischen der Kohlenstoffmatrix und den funktionellen Gruppen in der Pyrokohle sind nicht gleich stark und die vorhandenen Nährstoffe sind eher bioverfügbar (Lopez-Capel et al., 2016). Der pH-Wert spielt eine grosse Rolle betreffend der Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe. Phosphor findet sich hauptsächlich in Form amorpher Phosphatsalze in der Pyrokohle, wobei beispielsweise in Pyrokohle aus Kuhmist die Calcium- und Magnesiumphosphate dominieren. Das Kalium in

Pyrokohle ist quasi vollkommen pflanzenverfügbar und schnell löslich. (Camps-Arbestain et al., 2015)

Wenn man sich an die Problematik der Wiederverwendung der Fäzes im Nährstoffkreislauf erinnert, kann die Pyrokohle als Alternative durchaus einen Versuch wert sein. Durch die Pyrolyse wird das Ausgangsmaterial hygienisiert und zudem volumenreduziert. Viele Nährstoffe bleiben in der Aschefraktion erhalten und können so wieder in den Kreislauf integriert werden. Diese Aspekte sind auch für eine Anwendung im Weltraum von Bedeutung, da dort Nährstoffnachlieferungen nicht selbstverständlich sind und eine Abfallreduzierung wegen der beschränkten Platzverhältnisse notwendig ist.

1.3 Space Base 3 - Pflanzenproduktion

Ansprüche der Pflanzen

Die Grundelemente C, H, O gehören zu den Makronährstoffen und dienen als Gerüstsubstanz. Die mineralischen Makronährstoffe, welche in grösseren Mengen benötigt werden, sind N, P, K, Ca, Mg, S. Als Mikronährstoffe gelten Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Cl. Weitere Spurennährstoffe wie Ni, Al, Co, V, Se, Pt werden ebenfalls aufgenommen und in geringen Mengen für den Stoffwechsel und enzymische Aktivitäten gebraucht. Um für die Pflanzen verfügbar zu sein, sollten die Elemente in bestimmter Form vorliegen (Abbildung 4). Je nach chemischen Bedingungen liegen die Elemente in Komplexen, unlöslicher oder löslicher Form vor.

Macronutrient	Chemical form	Micronutrient	Chemical form
Carbon (C)	CO ₂	Iron (Fe)	Fe ²⁺
Oxygen	H ₂ O	Manganese (Mn)	Mn ²⁺
Hydrogen	H ₂ O	Zinc (Zn)	Zn ²⁺
Nitrogen (N)	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	Copper (Cu)	Cu ²⁺
Phosphorus (P)	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	Boron (B)	H ₃ BO ₃
Sulphur (S)	SO ₄ ²⁻	Molybdenum (Mo)	MoO ₄ ²⁻
Potassium (K)	K ⁺	Chlorine (Cl)	Cl ⁻
Calcium (Ca)	Ca ²⁺		
Magnesium (Mg)	Mg ²⁺		

Abbildung 4 Essentielle Nährstoffe und ihre pflanzenverfügbare Form (Gianquinto et al., 2013)

Der pH-Wert bestimmt mitunter die Verfügbarkeit der Elemente für die Pflanzen (Abbildung 5). Idealerweise liegt der pH-Wert zwischen 6 und 7 und ist somit im leicht sauren Bereich (Gianquinto et al., 2013; Resh, 2013).

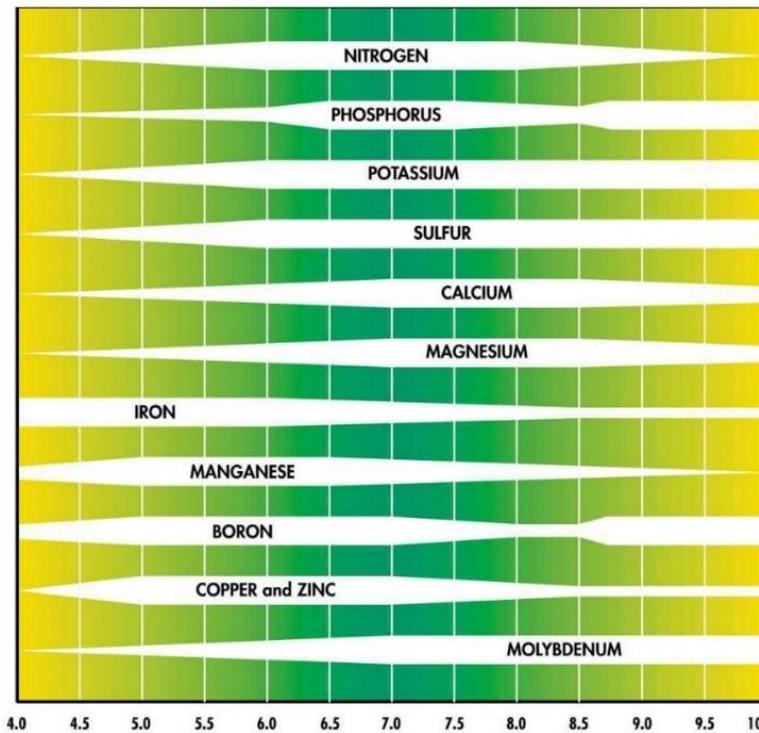


Abbildung 5 der pH und die Nährstoffverfügbarkeit in Böden (Organic Soil Technology, n.d.)

Kationen wie NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} oder Ca^{2+} sind meistens in Erdkolloiden adsorbiert, wohingegen die Anionen (NO_3^- , H_2PO_4^- , Cl^- oder SO_4^{2-} eher gelöst vorkommen. Ein reger Austausch der Ionen zwischen Erdpartikel und Erdlösung und Erdlösung und Wurzeln findet statt und die Pflanze kann auch mittels Abgabe von H-Ionen den pH-Wert im Wurzelbereich senken und Nährstoffe verfügbar zu machen. Wichtig zu wissen ist zudem, dass die notwendigen Nährstoffe im richtigen Verhältnis vorhanden sind und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Nährstoffen die Aufnahme beeinflussen können (Oester et al., 2012).

Diese Aspekte der Pflanzenernährung müssen auch in einem erdlosen System berücksichtigt werden, um erfolgreich zu sein. Die Zusammensetzung der Nährlösung und deren Einsatz sind der Schlüssel zum Erfolg.

Erdloser Anbau

Definitionen von Soilless Culture oder Hydroponic gibt es verschiedenste, typisch ist, dass Pflanzen erdlos, also in nährstoffreichen Wasser mit oder ohne inertem Substrat angebaut werden (Benton, 2005). Eine kommerzielle Bedeutung erhielt der erdlose Anbau (auch Hors-Sol genannt) erst in den 50er Jahren (Resh, 2013). Heutzutage ist der Anbau in Substraten oder im Wasser bereits für viele Kulturen Standard und wird in der Schweiz seit Januar 2017 nicht mehr deklariert (Konsumentenforum, 2016). Auch bezüglich der Pflanzenproduktion in der Raumfahrt wird geforscht, denn der erdlose Anbau birgt einige nützliche Vorteile im Gegensatz zur Pflanzenproduktion in der Erde (Benton, 2005):

- Pflanzen können an Ort angebaut werden, an welchen keine Erde existiert
- keine Arbeiten zur Unkrautbekämpfung oder Saatbettbereitung
- Maximale Erträge auf kleinem Raum möglich
- Bei Rezirkulierung können Wasser und Nährstoffe gespart werden
- Effiziente Nährstoffregulierung möglich
- keine erdbürtigen Krankheiten
- leichteres Gewicht, sauberere Handhabung

Der erdlose Anbau bringt jedoch auch einige Nachteile (Benton, 2005):

- Grössere Kosten für Infrastruktur
- Knowhow benötigt, neuere Technik (System, Nährlösung)
- Bei geschlossenen Systemen können sich Krankheiten schnell ausbreiten
- Tägliche Kontrolle nötig. Pflanzen reagieren schneller auf ungeeignete Umgebungsbedingungen

Die Nährlösung

Wenn die Pflanzen ohne oder in inertem Substrat angebaut werden, müssen die Nährstoffe in einer Nährlösung zugeführt. Das Substrat oder die Einrichtungen dienen dabei zur mechanischen Stabilisierung der Pflanzen und zur Erhöhung der Wasserspeicherkapazität. Die wichtigsten Parameter in der Nährlösung sind der pH-Wert, die Elektronische Leitfähigkeit (EC) und die Nährstoffzusammensetzung. Wobei das Management, also die Menge und der Zeitpunkt der Gabe ebenfalls zu beachten sind. (Silber & Bar-Tal, 2008)

Die Empfehlungen für den optimalen pH-Wert im erdlosen Anbau gehen von 5.5-6.5, obwohl auch Werte zwischen 5 bis 7 keine Probleme für die meisten Pflanzen darstellen sollten (Silber and Bar-Tal 2008). Werte über 7 hingegen sind unerwünscht, da das Risiko besteht, dass sich Ca- und Mg-Karbonate und Orthophosphate ausfällen und einerseits dadurch Bewässerungssysteme verstopfen, andererseits für die Pflanzen nicht mehr verfügbar sind (Silber & Bar-Tal, 2008). Aufgrund von Fällungen oder anderen chemischen Reaktionen wie Dissoziationen können Nährstoffmängel auftreten. Beispielsweise kann die Phosphorsäure H_2PO_4 zu HPO_4^{2-} dissoziieren, welche nicht mehr gleichermaßen pflanzenverfügbar ist, was zu Mangelerscheinungen führen kann. (Savvas et al., 2013; Silber & Bar-Tal, 2008). Wie bereits erwähnt, können Pflanzen jedoch durch die Abgabe von Säuren, den pH-Wert in Wurzelnähe senken, um an Nährstoffe zu kommen (Resh, 2013). Bei tiefen pH-Werten können Mn und Al gelöst werden und so einen toxischen Effekt auf die Pflanze haben (Savvas et al., 2013).

Auch der EC ist eine wichtige Grösse einer Nährlösung. Der EC ist proportional zum Salzgehalt einer Lösung. Ist der EC einer Nährlösung zu klein, ist die Nährstoffversorgung unzureichend; ist

der EC zu hoch, besteht das Risiko einer Versalzung. Jedoch haben nicht alle Kulturen die gleiche Salzverträglichkeit. Grundsätzlich sind Jungpflanzen empfindlicher als ältere Pflanzen (Oester et al., 2012). Normalerweise liegen die EC-Werte in einer Nährlösung zwischen 1.5 und 2.5 mS/cm, dabei liegt Salat eher bei den salzsensitiven Pflanzen und bevorzugt einen tiefen Wert von 1.5 mS/cm (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 1998). Oester et al. (2012) empfiehlt bei Verwendung von Kultursubstraten einen EC-Wert von 0.5 bis 1.5 mS/cm (nach Methode H20SU-Ex, Kapitel 3.3). Bei Aussaaten ist ein tiefer EC-Wert von circa 0.5 mS/cm angebracht, da Keimlinge sehr salzempfindlich sind und vor allem auf Chlorid reagieren (Oester et al., 2012).

Es gibt keine Standard Nährlösung mit bestimmter Nährstoffkonzentration. Je nach Kultur oder Anbaumethode kann die Formulierung variieren. Zudem sind verschiedene Elemente für die gute Entwicklung verschiedener Pflanzenteile zuständig und je nachdem, welcher Pflanzenteil geerntet werden soll, kann dies bei der Zusammensetzung berücksichtigt werden. Die Formulierung kann sich auch innerhalb einer Kultur ändern. Bei unkontrollierten Bedingungen haben zudem Veränderungen der Temperatur, Lichtverhältnisse, pH-Wert oder EC-Wert einen Einfluss auf den Kulturverlauf und die Nährlösung muss angepasst werden. (Benton, 2005; Resh, 2013)

Welche pflanzenverfügbaren Nährstoffe müssen in einer Lösung bzw. in einem Substrat vorhanden sein? Pflanzen nehmen die benötigten Nährstoffe in anorganischer Form auf. Im Kapitel 2.3 „Ansprüche der Pflanzen“ werden die essentiellen Nährstoffe für das Pflanzenwachstum angesprochen. In den meisten Nährstoffen werden hauptsächlich drei der Makronährstoffe berücksichtigt: N, P und K. C wird über die Luft aufgenommen, H und O über das Wasser und Ca, Mg, S sowie viele Spurenelemente sind im Bewässerungswasser meist hinreichend vorhanden. (Gianquinto et al., 2013)

Die Pflanzenernährung und der Zusammenhang der Ernährung mit der Pflanzenphysiologie sind äusserst komplex. In diesem Rahmen bleibt nur Platz, die Facts kurz darzulegen (Gianquinto et al., 2013; Oester et al., 2012):

- Stickstoff ist für jedes Wachstum substanziell, da beim Aufbau von Proteinen und Enzymen beteiligt. Einen auffallend grossen Einfluss hat Stickstoff auf das vegetative Wachstum. Ein Mangel ist an Chlorosen der Blätter zu erkennen, zudem wird das Pflanzenwachstum negativ beeinflusst.
- Phosphor ist das grundlegende Element für den Stoffwechsel und spielt eine essentielle Rolle bei der Photosynthese. In den Pflanzen äusserst mobil, zeigen sich Mängel an älteren Blättern.
- Kalium hat wichtige Funktionen während des Wachstums auf die Bildung von Grundstrukturen wie Lignin und Zellulose sowie auf den Stoffwechsel und Wasserhaushalt.

Auch Kalium ist sehr mobil und die Mangelsymptome wie Nekrosen finden sich an älteren Blättern.

- Calcium ist ein Bestandteil der Zellwände und Zellmembrane. Zudem ist es in die Hydrolyse des ATP involviert und hilft bei verschiedenen intrazellulären Vorgängen. Mangelsymptome sind an jungen Blättern an Nekrosen oder gewelltem, verzerrtem Wuchs zu erkennen.
- Magnesium ist ein wesentliches Element während der Photosynthese und Bestandteil des Chlorophylls. Es ist Bestandteil verschiedener Enzyme. Mangelsymptome sind an den unteren Blättern in Form von Chlorosen zwischen den Blattnerven zu erkennen.

Pflanzenproduktion im Weltall

Die Pflanzenproduktion bzw. Versuche zur Pflanzenproduktion im Weltraum sind schon seit 40 Jahren Realität (Zabel et al., 2016). Für die Entwicklung bio-regenerativen Lebenserhaltungssystemen kann die Produktion von Pflanzen aufgrund der Eigenschaften durchaus interessant sein. Pflanzen rezyklieren Abfallstoffe und schliessen Nährstoffkreisläufe, indem die Nährstoffe in eine für Menschen geniessbare Form gebracht werden. Sie haben ausserdem die Fähigkeit, Wasser zu reinigen und wandeln CO_2 in überlebenswichtige O_2 um. (Zabel et al., 2016)

Es sind mehr als 20 verschiedene Pflanzenanbausysteme erprobt und über 50 verschiedene Pflanzenexperimente durchgeführt worden. Mit Systemen wie dem Vegetable Production System der NASA (Veggie) oder MELiSSA der ESA werden theoretische Ansätze in der Praxis umgesetzt und gleichzeitig wird erforscht, wie die Schwerkraft und andere Umstände im Weltraum die Pflanzen beeinflussen. (Zabel et al., 2016). Auf diese Besonderheiten wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen.

Folgende Kriterien sind bei der Pflanzenauswahl im Weltraum zu beachten (Kyriacou et al., 2017):

- Hoher Ernte Index (Verhältnis essbarer Teil zu totaler Biomasse)
- Hohe Ernteeffizienz (pro Fläche, Zeit und Volumen)
- Hoher Ertrag (Nahrungsmittel und O_2 -Produktion)
- Geringer Produktionsaufwand

Microgreens

Salat oder Microgreens bieten sich nicht nur aufgrund des hohen Ernte Index als Versuchspflanzen an, sondern auch weil sie aufgrund verschiedener Eigenschaften für den Anbau im Weltall durchaus geeignet zu sein scheinen. (Kyriacou et al., 2017)

Franks and Richardson (2009) geben Richtwerte von einer Keimdauer von 3-4 Tagen und einer Wachstumsdauer bis zur Ernte von 6-10 Tagen an. Mit einer Wachstumsdauer von 1-3 Wochen sind die Microgreens ein schnell verfügbares frisches Nahrungsmittel. Dank der verhältnismässig hohen Konzentration an Phytonährstoffen wie Carotinoide, Vitamine und Mineralien sind sie



Abbildung 6 Senf Microgreens auf Vlies im Experiment 2

ausserdem äusserst gesund. Der Produktionsaufwand ist gering und der Platzbedarf, vor allem der Wurzelraum minim (Abbildung 6). Ein weiteres Argument für den Anbau von Microgreens ist, dass keine weitere Verarbeitung notwendig ist und die Microgreens sofort genossen werden können. Sie sind pflegeleicht und benötigen nur wenig Wasser und Nährstoffe. Dennoch brauchen sie im Gegensatz zu Sprossen, welche sich nur von den Sameninhaltsstoffen ernähren, Nährstoffe um sich vital zu entwickeln. (Kyriacou et al., 2017)

Ein wichtiger Faktor für einen erfolgreichen Anbau sind gesunde, gut gelagerte und nicht zu alte Samen. Die grosse Anzahl benötigter Samen ist auch der Hauptnachteil beim Anbau von Microgreens. Auch die Umgebungsbedingungen müssen stimmen, um einen guten und regelmässigen Ertrag zu erzielen. Wichtig dabei sind beispielsweise die Temperatur, Licht und Luftfeuchtigkeit. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Respiration gering ist und somit wenig CO₂ fixiert und O₂ generiert wird. Ein gemischter Anbau mit höheren Pflanzen mit stärkerer Respiration könnte da eine Lösung sein, um diesen Aspekt zu fördern. (Kyriacou et al., 2017)

2 Material und Methoden

Die Methoden sollen der Beantwortung der Fragestellungen dienen und auf den theoretischen Grundlagen der drei Space Bases basieren. Um die menschlichen Fäzes auf ihr Potenzial zu prüfen, wird dieses gesammelt, pyrolysiert und anschliessend analysiert. Die Analyse der Fäzeskohle soll zum einen der Charakterisierung dienen und zum anderen durch die Nährstoffextraktionen die Eignung als Nährstofflieferant überprüfen. Mit zwei Experimenten soll das bei der Analyse erlangte Wissen angewendet und neue Erkenntnisse gewonnen werden.

2.1 Organisation Fäzes



Abbildung 7 Windeleimer zur Sammlung der Fäzes

Das Ziel war, die Fäzes ohne Urin und ohne Zusätze wie Kloppapier oder Sägemehl zu sammeln. So soll die Situation im Weltall möglichst simuliert werden, wo die Toilettensysteme Urin und Fäzes standardgemäss trennen (Schönborn & Bleuler, 2017). Zudem soll so die Fäzes isoliert von weiteren Nährstofflieferanten analysiert werden und der potentielle Düngungswert der Fäzes abgeschätzt werden können.

Um nahe am Verarbeitungsort zu bleiben und um der Thematik verdiente Aufmerksamkeit zu schenken, wurde die Sammlung an der ZHAW Wädenswil im Campus Grüental durchgeführt. Zwei Toiletten wurden als Sammlungsstandorte auserwählt. Vorgängig mussten verantwortliche Personen angefragt und einen Risikomanagementplan erstellt werden, in welchem die

Hygienevorschriften klar geregelt wurden. Danach folgten die Information und der Aufruf an potentielle SpenderInnen.

Die Sammlung der Fäzes startete am 23.10.2017 und endete am 05.12.2017. Die Fäzes wurden mindestens jeden zweiten Tag aus den Windeleimern (Abbildung 7) eingesammelt und im Gefrierschrank bei -20°C isoliert gelagert. Das benötigte Material zur Sammlung ist in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1 Material für Sammlung der Fäzes

Stück	Material
2	Windeleimer
4	Kleine Sammelbehälter
	Biologisch abbaubare Säcke zur individuellen Sammlung

	Plastikhandschuhe, Mundschutz, Desinfektionsmittel
	Gefrierschrank zur Lagerung (-20°C)

2.2 Pyrolyse der Fäzes

Vorbereitung

Trocknung der Fäzes im BINDER Wärmeschrank FED 115 (Binder GmbH, Tuttlingen, DE) bei 105°C während circa 48 Stunden und Zerkleinerung von Hand (< 4 cm) um den Eintragstrichter der Pyrolyseanlage nicht zu überlasten. Das Ausgangsmaterial wurde zwischenzeitlich bei -20°C gelagert.

Pyrolyse



Abbildung 8 Während der Pyrolyse der Fäzes: getrocknete Fäzes im Feeder (links), frische FK zur Abkühlung im Wassereimer (mitte), Einblick in die Brennkammer durch das Zuluftrohr (rechts)

Die Fäzeskohle wurde mittels dem PYREG-Verfahren (Anhang A) an zwei Daten (14.11.2017, 12.12.2017) hergestellt. Die Laborpyrolyseanlage Pyreka 4.0 (Pyreg GmbH, Dörth, Deutschland) an der ZHAW Wädenswil wurde im 2017 von der Firma Pyreg GmbH zu Forschungszwecken konstruiert. Die durchschnittliche Pyrolysetemperatur im PYREG-Schneckenreaktor betrug 300°C, die Verweilzeit rund 20 Minuten. Diese Bedingungen wurden in Absprache mit der Korrektorin und wissenschaftlichen Mitarbeiterin der ZHAW, Mira Bleuler so definiert. Der Eintrag des Inertgases N₂ direkt nach der Zellenradschleuse sorgt für die sauerstofffreie Atmosphäre im Reaktor. In der Abbildung 8 werden ein paar Eindrücke während der Pyrolyse der Fäzes geteilt. Der Fäzeskohleertrag wurde folgendermassen kalkuliert: FK-Ertrag in % = (Fäzeskohle in g / Trockensubstanz Fäzes in g) * 100.

Probenvorbereitung

Die gesamte Fäzeskohle wurde in 4 Portionen eingeteilt und aus jedem Viertel ein Teil entnommen und wieder zusammen gemischt. Ein Teil der homogenisierten Probe wurde für einige Analysen bei 60°C über Nacht im BINDER Wärmeschrank FED 115 (Binder GmbH, Tuttlingen, DE) getrocknet.

2.3 Nährstoffextraktionen

Je nach Fragestellung und Möglichkeiten werden unterschiedliche Methoden zur Analyse von Pyrokohle angewandt. Die Methoden werden zudem kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert. Auch in dieser Arbeit wurden einige Methoden zur Analyse der Pyrokohle der Fragestellung und den Möglichkeiten angepasst. Die verschiedenen Extraktionsmethoden bringen Antworten auf unterschiedliche Fragen. Um die Fäzeskohle auf ihre Düngungseignung zu untersuchen, soll der pflanzenverfügbare Nährstoffgehalt gemessen werden. Die leicht löslichen Nährstoffe werden mit Wasser aus der Kohle extrahiert. Die Extraktion in kohlensäurehaltigem Wasser sollte zusätzliche Nährstoffe rauslösen können. Diese Methode wurde in dieser Arbeit angewandt, weil CO₂ eine weitverfügbare Säure ist, und während der Raumfahrt beispielsweise aus der Luft gewonnen werden könnte. Für die austauschbaren Nährstoffe werden stärkere, meist saure Extraktionsmittel wie Ameisensäure oder Salzsäure eingesetzt, sie sollen den gesamten pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalt sichtbar machen. Die Extraktionen wurden jeweils in dreifacher Wiederholung durchgeführt.

Leicht pflanzenverfügbare Nährstofffraktion

Volumenextraktion mit Wasser (1:1.5)

Mit der Referenzmethode der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten mit dem Code H20SU-Ex können leicht lösliche Nährstoffe wie N, P, K, Mg und Ca in einem Substrat nachgewiesen werden. Dazu wird die feuchte und gesiebte (≤ 5 mm) Fäzeskohle in eine Substratpresse (133 cm³ ≈ 50 g FK) gegeben und mit 200 ml vollentsalztem Wasser (VE) gemischt und 1 Stunde auf dem Mini Shaker 444-0269 (VWR International, Wien, AT) geschüttelt. Die Suspension wird anschliessend durch einen Whatman Faltenfilter ($\varnothing 185$ mm) abfiltriert. Ein Teil des Filtrats wird für weitere Bestimmungen zentrifugiert und nochmals gefiltert. (ACW, 2012a)

Volumenextraktion mit CO₂-gesättigtem Wasser (1:2.5)

In Anlehnung an die Referenzmethode der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten mit dem Code CO₂-EX (ART, 2012). Verschiedene kommerziell erhältliche kohlenstoffhaltige Trinkwasser wurden mit der Kombination CarboQC At-line MFD 2017 und dem Füllsystem PFD (Anton Paar

GmbH, Graz, AT) auf ihren Kohlensäuregehalt getestet. Die Extraktion wurde mit „Swiss Alpina mit wenig CO₂“ durchgeführt. Der Kohlensäuregehalt beträgt 3.82 g/l.

10 g der bei 60°C getrockneten FK wird mit bis 25 ml CO₂-gesättigtem Wasser von Swiss Alpina (3.82 g/l) in einem Polypropylenbehälter gemischt und 1 Stunde auf dem Mini Shaker 444-0269 (VWR International, Wien, AT) geschüttelt. Die Suspension wird anschliessend durch einen Whatman Faltenfilter (ø185 mm) abfiltriert und zentrifugiert.

Pflanzenverfügbare Nährstofffraktion

Extraktion mit Ameisensäure 2% zur Messung von verfügbarem P

0.35g gesiebte (≤2mm), luftgetrocknete FK und 35 ml einer 2% Ameisensäurelösung werden in ein 50ml Polypropylenbehälter gegeben und 30 Minuten auf dem Mini Shaker 444-0269 (VWR International, Wien, AT) geschüttelt. Nach anschliessender Zentrifugierung wird die Suspension durch einen Whatman Faltenfilter (ø185 mm) gefiltert. (Camps-Arbestain et al., 2017)

Extraktion mit HCl zur Messung von pflanzenverfügbarem K, Ca, Mg

Pflanzenverfügbares Kalium, Calcium und Magnesium werden in Anlehnung an die empfohlene Methode nach von Camps-Arbestain et al., (2017) ermittelt. Es wurde 1 g gesiebte (< 2 mm), luftgetrocknete FK mit 35 ml einer 1 M HCl-Lösung in einen Polypropylenbehälter gegeben und während 2 Stunden auf dem Phoenix RS-RR5 (Phoenix Instrument GmbH, Garbsen, DE) reziprok geschüttelt. Die Suspensionen werden über Nacht stehen gelassen und danach durch einen Whatman Filter (ø185 mm) gefiltert. (Camps-Arbestain et al., 2017)

2.4 Analyse Fäzeskohle

Neben den Nährstoffanalysen wurden ebenfalls der pH-Wert, die Elektronische Leitfähigkeit (EC) sowie die CHN-Analyse durchgeführt. Die Analysen wurden, falls nicht anders erwähnt, in dreifacher Wiederholung ausgeführt.

Elementaranalyse CHN

Nach den Analysemethoden für EBC-Pflanzenkohle. Von der bei 60°C vorgetrocknete und mit dem Mörser gemahlene Fäzeskohle wird 0.1 g mit der Analysewaage Sartorius in Alufolie eingewogen, zu einer Kapsel verschlossen und im TruSpec CHN Macro Analyser (Leco Corporation, Mönchengladbach, DE) analysiert. Die Angabe der totalen Kohlen-, Wasser- und Stickstoffstoff erfolgt in Massenanteilen. (EBC, 2012)

pH-Wert CaCl_2

Nach den Analysemethoden für EBC-Pflanzenkohle. Im Verhältnis 1:5 wurden in einem 35 ml Polypropylenbehälter 5 ml ungemahlene, bei 60°C getrocknete FK mit 25 ml einer 0.01 M CaCl_2 -Lösung gemischt und eine Stunde auf dem Mini Shaker 444-0269 (VWR International, Wien, AT) geschüttelt. Der pH-Wert wurde anschliessend mit der PHC101 pH-Gel Elektrode (2.0-14.0 pH) am HQ 40d Multi (Hach Company, Colorado, USA) gemessen. Kalibriert wurde vorher auf pH 4, 7 und 10. Vorgehen in zweifacher Wiederholung. (EBC, 2012)

pH-Messung in der Wasserextraktion

Im Wasservolumenextrakt nach H2OSU-EX (ACW, 2012a) wurde der pH-Wert mit der PHC101 pH-Gel Elektrode (2.0 - 14.0 pH) am HQ 40d Multi (Hach Company, Colorado, USA) gemessen. Kalibriert wurde vorher auf pH 4, 7 und 10. (ACW, 2012b)

Elektronische Leitfähigkeit

Nach den Analysemethoden für EBC-Pflanzenkohle. Im Verhältnis 1:10 werden 20 g Fäzeskohle mit 200 ml VE in einem Polypropylenbehälter gemischt und 1 h auf dem Mini Shaker 444-0269 (VWR International, Wien, AT) geschüttelt. Nach 15 Minuten Ruhezeit wurde direkt im Filtrat die Leitfähigkeit mit der CDC401 Sonde (0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 200 mS/cm) am HQ 40d Multi (Hach Company, Colorado, USA) gemessen. Die Ausgabe erfolgt in mS/cm . Die Temperaturkompensation der elektrischen Leitfähigkeit auf die Standardtemperatur von 25°C wurde von der Sonde automatisch vorgenommen. Vorgehen in zweifacher Wiederholung. (EBC, 2012)

Bestimmung der Leitfähigkeit in der Wasservolumenextraktion

Im Wasservolumenextrakt nach H2OSU-EX (ACW, 2012a) wurde die Leitfähigkeit mit der CDC401 Sonde (0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 200 mS/cm) am HQ 40d Multi (Hach Company, Colorado, USA) gemessen (ACW, 2012c).

Nährstoffe

Photometrische Bestimmung von Phosphat

Photometrische Bestimmung von leicht löslichem Phosphat nach der Schweizerischen Referenzmethode der Forschungsanstalten H2OSU-P. Dabei wird am gleichen Tag das Phosphat im Wasservolumenextrakt nach H2OSU-EX (ACW, 2012a) mit Ammoniummolybdat komplexiert. Die beim Erhitzen der Reaktionslösung resultierende Blaufärbung wird photometrisch mit dem Photometer DR3800 (Hach Company, Colorado, USA) bei einer Wellenlänge von 750 nm bestimmt. (ART/ACW, 2012)

Die gleiche Methode wird zudem mit dem Volumenextrakt mit CO₂-gesättigtem Wasser und zur Bestimmung von dem gesamten pflanzenverfügbaren Phosphat mit dem Ameisensäure-2%-Extrakt angewandt.

Bestimmung wasserlöslicher Nährstoffe mittels Ionenchromatographie

Nach der Methode SOP-UI1204a werden die Proben des Volumenwasserextrakts vorbereitet. Die Analyse der leicht löslichen Nährstoffe wurde mit dem 930 Compacts IC Flex mit 850 Professional Sample Processor (Methrom Schweiz AG, Zofingen, Schweiz) von Rahel Wanner aus der Forschungsgruppe Bodenökologie der ZHAW Wädenswil ebenfalls nach der Methode SOP-UI1204a durchgeführt. (ZHAW, 2017)

Bestimmung pflanzenverfügbarer Nährstoffe mittels Atomemissionsspektrometrie ICP-OES

Die pflanzenverfügbaren Nährstoffe (K, Ca, Mg) wurden in den Proben der HCl-Extrakte am ICP Optical Emission Spectrometer, Agilent 700 Series (Agilent Technologies, USA) von Rahel Wanner aus der Forschungsgruppe Bodenökologie der ZHAW Wädenswil anhand des Arbeitshandbuchs von Agilent Technologies gemessen (Agilent Technologies, 2006).

Generierung von Codes

Für die Aufbereitung der Resultate wurden die in Tabelle 2 aufgelisteten Codes zu den verschiedenen Extraktions- und Analysemethoden generiert.

Tabelle 2 Codes der Kombination verschiedener Extraktionsmethoden und Analysemethoden zur Aufbereitung der Resultate

Code	Extraktionsmethode	Analyse Methode
H2O_PM	Wasservolumenextrakt	Photometer 750nm
CO2_PM	Volumenextrakt mit CO ₂ -gesättigtem Wasser	Photometer 750nm
AS_PM	Ameisensäure-2%-Extrakt	Photometer 750nm
H2O_IC	Wasservolumenextrakt	IC
H2O_ICP	Wasservolumenextrakt	ICP-OES
HCL_ICP	HCl-Extrakt	ICP-OES

2.5 Vorbereitung und Vorversuche zu den Experimenten mit Pflanzen

Wasserextraktionen

Um geeignete Nährlösungen zu evaluieren wurden FK-Wasserextrakte im Verhältnis 1:5, 1:10, 1:20 hergestellt. Die Proben wurden 1 Stunde auf dem Phoenix RS-RR5 (Phoenix Instrument GmbH, Garbsen, DE) reziprok geschüttelt. Die zeigt die jeweils eingesetzte Menge FK. Die Wasserextrakte wurden zudem weiterverdünnt und die Verhältnissreihe konnte somit erweitert werden (Tabelle 3).

Tabelle 3 Verhältnis FK:VE in den verschiedenen Wasserextrakten, teilweise verdünnt, mit Codes

Beschreibung	Code		
		Kohle in g	Deionat in ml
in Wasserextraktion 1:5	WE_1:5	5	25
in Wasserextraktion 1:10	WE_1:10	2.5	25
in Wasserextraktion 1:20	WE_1:20	1.25	25
in Wasserextraktion 1:5, 10fach verdünnt	WE_1:50		
in Wasserextraktion 1:10, 10fach verdünnt	WE_1:100		
in Wasserextraktion 1:20, 10fach verdünnt	WE_1:200		
in Wasserextraktion 1:10, 100fach verdünnt	WE_1:1000		

pH-Werte und Elektronische Leitfähigkeit (EC) in den Wasserextrakten

Um die Eignung als Nährlösung zu evaluieren, wurden der pH-Wert und der EC-Wert in den verschiedenen Wasserextrakten (Tabelle 3) mit einer PHC101 pH-Gel Elektrode (2.0-14.0 pH) bzw. CDC401 Sonde (0.01µS/cm – 200mS/cm) am HQ 40d Multi (Hach Company, Colorado, USA) gemessen. Die Auswahl der unterschiedlichen Wasserextrakte für die Nährlösung bei den Pflanzenversuchen wurde anhand ihres pH-Wertes und EC getroffen. Vor der pH-Wert Messung wurde die PHC101 pH-Gel Elektrode (2.0-14.0 pH) auf pH 4, 7 und 10 kalibriert. Die Ausgabe des EC – Wertes erfolgt in mS/cm. Die Temperaturkompensation der elektronischen Leitfähigkeit auf die Standardtemperatur von 25°C wurde von der CDC401 Sonde (0.01µS/cm – 200mS/cm) automatisch vorgenommen.

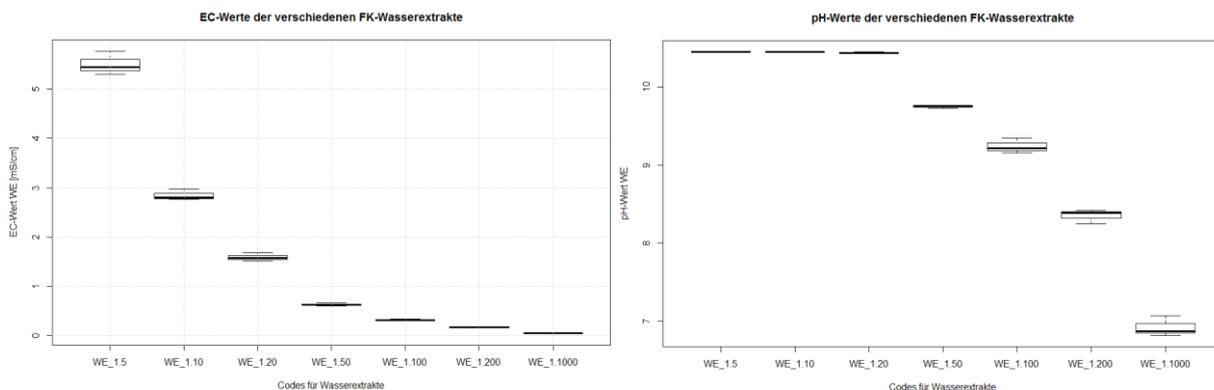


Abbildung 9 pH-Werte (rechts) und EC-Werte in mS/cm (links) in den Wasserextraktionen (WE) der FK in Abhängigkeit der Verdünnung mit Standardabweichung (Anhang C, Tabelle 15 & Tabelle 16)

Abbildung 9 zeigt die Abhängigkeit des pH-Wertes und des EC-Wertes zur Verdünnung. Die Codes der verschiedenen FK:VE Verhältnisse und Verdünnungen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Anhand der Resultate der Messung des pH-Wertes und des EC-Wertes der verschiedenen Wasserextrakte wird klar, wie gross der Einfluss des Verhältnisses zwischen FK und VE ist (Abbildung 9). Dabei ist es interessant zu beobachten, dass sich der pH-Wert erst bei einer Verdünnung ab 1:50 gegen unten verändert und erst bei der starken Verdünnung von 1:1000 unter 7 sinkt. Der tiefe pH-Wert, welcher sich für die hydroponische Pflanzenproduktion eignet (Resh, 2013), ist auch der Grund, weshalb die Verdünnungsreihe 1:1000 mit Code WE_1:1000 bei dem Pflanzenversuch trotz tiefem EC-Wert berücksichtigt wurde.

Auch bei der Bestimmung des EC-Wertes sind grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Verdünnungen ersichtlich. Der empfohlene Wert für Keimlinge und Salate liegt zwischen 0.5 und 1.5 mS/cm (Oester et al., 2012), weshalb der Wasserextrakt mit Code WE_1:20 mit einem EC-Wert von 1.59 mS/cm (+/- 0.072) und die Verdünnung WE_1:50 mit einem EC-Wert von 0.63 mS/cm (+/- 0.024) für einen Pflanzenversuch in Frage kommen. Die Verdünnung WE_1:1000 hat mit einem EC-Wert von 0.044 mS/cm (+/- 0.001) einen sehr tiefen Wert und das Risiko einer Unterernährung der Pflanze ist somit hoch (Savvas et al., 2013).

Vorversuche Material

Um die Qualität der Samen zu garantieren, wurde vorgängig ein Keimtest auf verschiedenen Substraten durchgeführt. In Aussaatboxen wurden am 21. Dezember 2017 Samen von „Red Giant Mustard“ und „Pizzo Mustard“ (CN Seeds LTd, Ely, UK) in gewöhnlicher Aussaaterde (Ökohum GmbH, Langrickenbach, CH), Perlit (Foma SA, Mezzovico, CH) und auf dem Hydroponic-Vlies Growfelt Purple (Anglo Recycling Technology LTD, Rochdale, UK) ausgesät. Für die Experimente eigneten sich die Samen von „Pizzo Mustard“ aufgrund ihrer neutraler grüner Farbe besser; „Red Giant Mustard“ Keimlinge weisen einen stark violetten Ton auf. Gleichzeitig konnte in dem Vorversuch die Eignung der Referenzsubstrate Perlit und Growfelt-Vlies abgeklärt werden, welche sich durchaus als geeignet erwiesen.

In einem weiteren Vorversuch wurden am 11. Januar 2018 die Senfsamen von „Pizzo Mustard“ im Perlitsubstrat ausgesät, um die etwaige Keimdauer und das Wasserbedürfnis abzuschätzen. Dasselbe wurde in Petrischalen mit dem Growfelt -Vlies gemacht. Um die passenden Verdünnungslösungen für die Versuche auszuwählen, wurden die Wasserextrakte in den Petrischalen Tests angewandt, um eine etwaige Toxizität ausschliessen zu können. Um das Tausendkorngewicht zu ermitteln, wurden 3 x 100 Samen der Senfsamen „Pizzo Mustard“ ausgezählt und auf der Analysenwaage Sartorius CPA64 (Sartorius AG, Göttingen, DE) gewogen. Der Mittelwert der drei Proben mit 10 multipliziert, ergibt das Tausendkorngewicht.

2.6 Experimente mit Pflanzen

Um die Eignung der Fäzeskohle als Düngemittel zu evaluieren, werden zwei verschiedene Experimente durchgeführt. Die jeweilige Vorgehensweise wurde den Fragestellungen angepasst. Im ersten Experiment will herausgefunden werden, ob und in welchem Verhältnis die Fäzeskohle einem Substrat beigegeben werden kann, um die Pflanzen mit Nährstoffen zu versorgen, ohne eine toxische Wirkung zu erzielen. Im zweiten Experiment wird untersucht, ob sich die Wasserextrakte der Fäzeskohle bzw. deren Verdünnung direkt als Nährlösung für den Anbau von Pflanzen eignen. Die Experimente zielen darauf hin, eine oder mehrere geeignete Varianten auszumachen, welche in weiteren Experimenten perfektioniert und näher untersucht werden können. Als Versuchspflanzen wurden Microgreens Senfsamen ausgewählt. Microgreens eignen sich einerseits aufgrund ihrer bescheidenen Ansprüche und der kurzen Wachstumsdauer, andererseits wären sie auch für den Anbau in der Raumfahrt denkbar (Kyriacou et al., 2017).

Experiment 1: Eignung der FK als Substratdünger

Die Methode wurde in Anlehnung an den Kresstest für Bioindikation für Substrat- bzw. Erdproben aufgebaut (Mathis, 2011). Die Qualität der verschiedenen Substratmischungen soll anhand des Effekts auf das Pflanzenwachstum evaluiert werden.

Tabelle 4 Material im Experiment zur Eignung der FK als Substratdünger

Stück	Material
24	Weck-Rundrandglas 100, ½ Liter Sturz-Form, inkl. Deckel (J. Weck GmbH u. Co, KG, Wehr, DE)
~1kg	Perlit (Foma SA, Mezzovico, CH)
~12g	Senfsamen „Mustard, Pizzo“ <i>Brassica juncea</i> , untreated Lot No 27109, Packed: April 2013, Packers reference No: 1781, (CN Seeds LTd, Ely, UK)
~250g	Fäzeskohle, gesiebt (5mm)
	Vollentsalztes Wasser (VE)
	Nährlösung 0.05% Plantaaktiv Nährsalze (Hauert Günther Düngerwerke GmbH, Nürnberg, DE) mit Leitungswasser
1	Klimaschrank RUMED Typ P530 (Rubarth Apparate GmbH, Laatzen, DE)
1	Analysenwaage Sartorius CPA64 (Sartorius AG, Göttingen, DE)

Die Tabelle 4 enthält die für das Experiment 1 benötigten Materialien. Es wurde eine Versuchsreihe mit den 2 Kontrollen aufgestellt. Für die Versuchsreihe werden in Weckgläsern verschiedene Substratmischungen (Tabelle 5) in dreifacher Wiederholung eingefüllt (Abbildung 10 und Abbildung 11). Pro Glas werden 0.5 g Samen (~370 Samen) ausgesät. Bewässert wurde mit VE; einzig die Positivkontrolle K1 wurde mit einer Hauert-Nährlösung 0.05% bewässert. Die Versuchsdauer betrug 15 Tage vom 17.01.2018 bis zum 01.02.2018. Die Weckgläser wurden mit einem Deckel geschlossen, bis die Senfkeimlinge der Positivkontrolle K1 an den Deckel stiessen und anschliessend offen gehalten. Die Gläser wurden zufällig angeordnet und während der Versuchsdauer dreimal willkürlich umgestellt. Der Versuch wurde im Klimaschrank durchgeführt, die klimatischen Bedingungen stetig gehalten (T = 20°C, LF 80%, Tageslicht: 12h). Die Auswertung erfolgt am 1. Februar 2018, indem das Sprossgewicht mit der Analysenwaage ermittelt wurde.

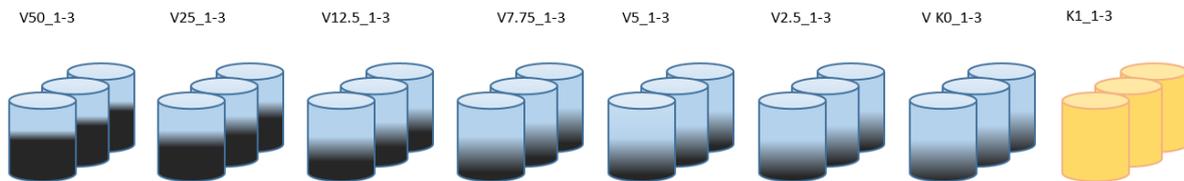


Abbildung 10 Versuchsdesign des Experiment 1 zur Eignung der FK als Substratdünger

Tabelle 5 Beschrieb der Versuchsreihe mit Codes im Experiment 1 zur Eignung der FK als Substratdünger

Variante	Codes	Beschrieb
1	V50_1-3	50% FK und 50% Perlit, VE
2	V25_1-3	25% FK und 75% Perlit, VE
3	V12.5_1-3	12.5% FK und 87.5% Perlit, VE
4	V7.75_1-3	7.75% FK und 92.25% Perlit, VE
5	V5_1-3	5% FK und 95% Perlit, VE
6	V2.5_1-3	2.5% FK und 97.5% Perlit, VE
7	K1_1-3	Positivkontrolle, 100% Perlit + Nährlösung 0.05% Plantaaktiv Nährsalze mit Leitungswasser
8	K0_1-3	Negativkontrolle, 100% Perlit, VE



Abbildung 11 Vorbereitung des Experiment 1 zur Eignung der FK als Substratdünger

Experiment 2: Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung

Die Tabelle 6 enthält die für das Experiment benötigten Materialien. Die Qualität und Eignung verschiedener Nährlösungen soll anhand des Effekts auf das Pflanzenwachstum evaluiert werden.

Tabelle 6 Material zum Experiment 2 zur Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung

Stück	Material
45	Petrischalen 60-15 (Greiner Holding AG, Kremsmünster, AT)
45	Auf Petrischalen zugeschnittene Vlies-Rondellen Growfelt Purple (Anglo Recycling Technology LTD, Rochdale, UK)
~9g	Senfsamen „Mustard, Pizzo <i>Brassica juncea</i> , untreated Lot No 27109, Packed: April 2013, Packers reference No: 1781, (CN Seeds LTd, Ely, UK)
65 g	Fäzeskohle, gesiebt (2 mm) für Wasserextrakt - Nährlösungen
	Vollentsalztes Wasser (VE)
	Nährlösung 0.05% Plantaaktiv Nährsalze (Hauert Günther Düngerwerke GmbH, Nürnberg, DE) mit Leitungswasser
1	Klimaschrank RUMED Typ P530 (Rubarth Apparate GmbH, Laatzen, DE)
1	Analysenwaage Sartorius CPA64 (Sartorius AG, Göttingen, DE)

Es werden drei Nährstofflösungen analog der in Kapitel 2.5 beschriebenen Methode Wasserextraktionen mit unterschiedlichen FK:VE Verhältnissen hergestellt und zum Teil

weiterverdünnt (Tabelle 7). Zwei Kontrollen bieten Anhaltspunkte: Die Positivkontrolle K1 als praxisnahe Variante und die Negativkontrolle K0 für den Nullvergleich. Die Pflanzversuche wurden in neunfacher Wiederholung (1-9) durchgeführt (Abbildung 12).

Tabelle 7 Beschrieb der Versuchsreihe mit Codes im Experiment 2 zur Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung

Variante	Codes	Beschrieb
1	V1:20_1-9	Wasserextrakt 1:20 mit 25g FK und 500ml VE
2	V1:50_1-9	Wasserextrakt 1:5 mit 20g FK und 100ml VE, 10fach verdünnt
3	V1:1000_1-9	Wasserextrakt 1:10 mit 20g FK und 200ml VE, 100fach verdünnt
4	K1_1-9	Positivkontrolle, Nährlösung 0.05% Plantaaktiv Nährsalze mit Leitungswasser
5	K0_1-9	Negativkontrolle, ungedüngt (VE)

In die Petrischalen 60-15 wurden die zugeschnittenen Vlies-Rondellen Growfelt Purple gelegt und mit VE begossen (7 ml). In jede Petrischale wurde anschliessend ~0.2 g Senfsamen (=~150 Samen) ausgesät. Die Keimung in den Petrischalen erfolgt ohne Einsatz der Nährlösungen und mit geschlossenem Deckel. Nach zwei Tagen wurde der Deckel entnommen und die Petrischalen in einer Schale mit Frischhaltefolie zugedeckt um eine Austrocknung zu verhindern. Die Bewässerung mit den Nährlösungen bzw. mit dem VE fand mittels Pipette jeden zweiten Tag statt und betrug 7 ml pro Petrischale. Die Petrischalen wurden zufällig angeordnet und bei jeder Bewässerung willkürlich umgestellt. Der Versuch wurde im Klimaschrank durchgeführt, die klimatischen Bedingungen stetig gehalten (T=20°C, LF 80%, Tageslicht: 12h). Die Dauer des Versuchs betrug 17 Tage. Aussattermin

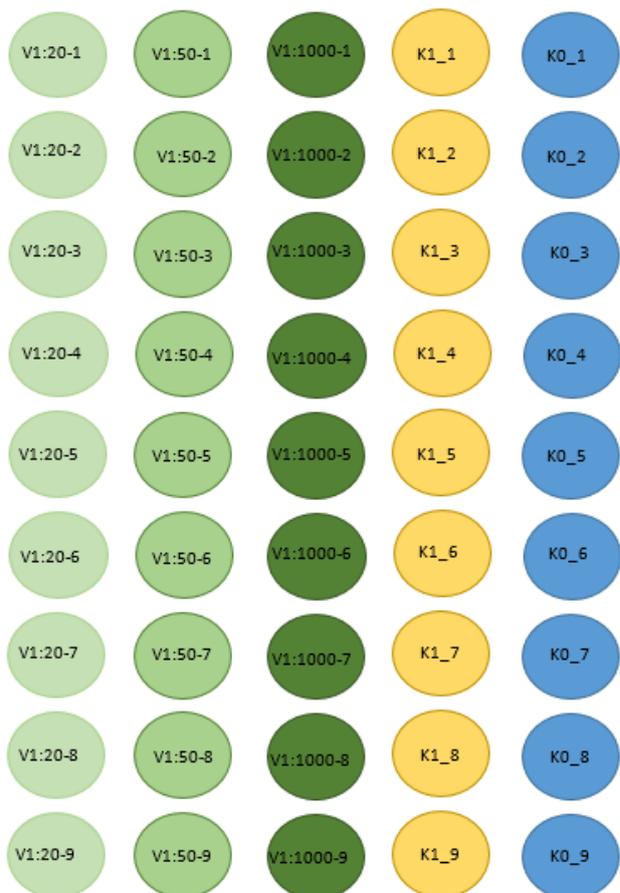


Abbildung 12 Versuchsdesign des Experiment 2 zur Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung

war am 15. Januar 2018, die Messung des Sprossgewichts mit der Analysenwaage fand am 1. Februar 2018 statt.

Vor jeder Bewässerung wurden der pH-Wert und der EC-Wert der verschiedenen Wasserextrakt Nährlösungen mit der PHC101 pH-Gel Elektrode (2.0-14.0 pH) bzw. CDC401 Sonde (0.01 μ S/cm – 200mS/cm) am HQ 40d Multi (Hach Company, Colorado, USA) gemessen und festgehalten.

Statistische Auswertungen

Die statistischen Auswertungen der Pflanzenexperimente wurden mit dem Programm R (Version: 3.1.1) durchgeführt. Eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) soll Aufschluss über die Signifikanz bezüglich der Sprossgewichte geben. Dabei wurden bei beiden Versuchen die gleichen Hypothesen und Signifikanzlevels festgelegt. Das Signifikanzlevel Alpha wurde auf 0.05 festgelegt (α -Wert = 0,05). Ist der p-Wert < α -Wert, kann von einer statistischen Signifikanz ausgegangen werden. Die genaue Vorgehensweise in Form des R-Skripts findet sich im Anhang E. Folgende Hypothesen wurden aufgestellt:

H0: Es werden keine signifikanten Unterschiede der Sprossgewichte in g der verschiedenen Versuchsreihen erwartet.

H1: Es werden signifikante Unterschiede der Sprossgewichte in g der verschiedenen Versuchsreihen erwartet.

3 Resultate und Datenanalyse

3.1 Pyrolyse der Fäzes

Gesammelt wurden ungefähr 8 kg Frischmasse des Ausgangsmaterials Fäzes. Die Trocknung der Fäzes resultierte in einem Masseverlust von 70-75%. Zur Pyrolyse standen danach insgesamt 2073.5 g getrocknete Fäzes zur Verfügung. Die Pyrolyse führte zu einem erneuten Massenverlust von ungefähr 45%, und somit zu einem Fäzeskohleertrag von rund 55%, was 1138.2 g entspricht. Von der ursprünglichen Biomasse bleiben am Ende rund 14% in Form der Fäzeskohle übrig (Abbildung 13).

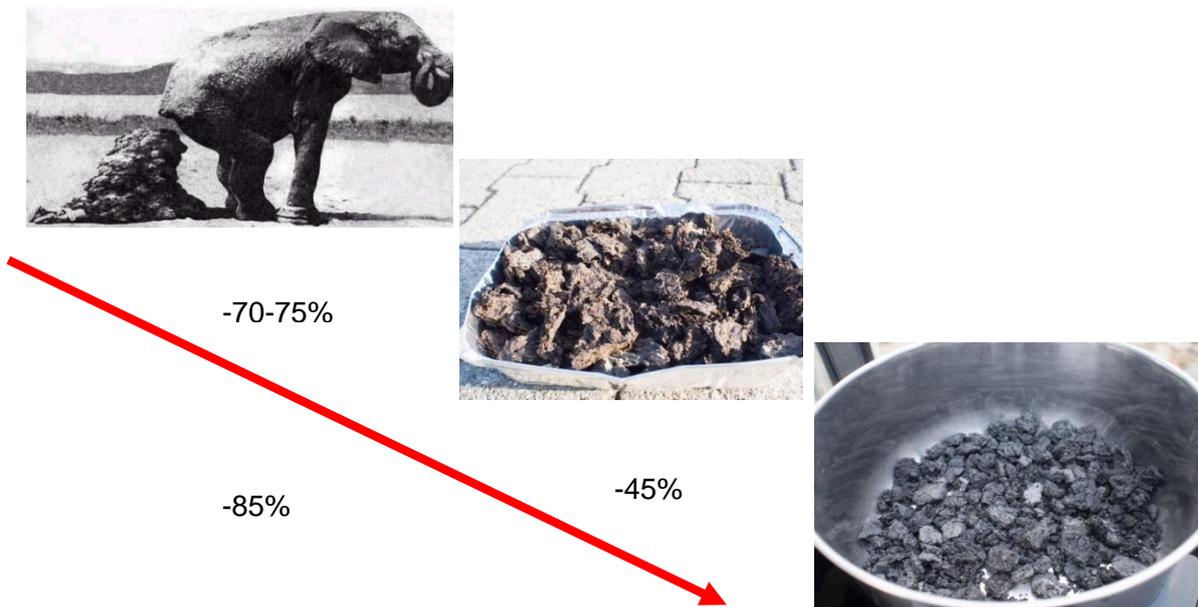


Abbildung 13 Masseverluste durch Trocknung (70-75%) und Pyrolyse von Fäzes (45%) (Anhang B, Tabelle 13)

3.2 Analyse Fäzeskohle

Elementaranalyse CHN

Die FK wurde auf 0.1g eingewogen (+/- 0.0024). Die Elementaranalyse ergab die in Tabelle 8 ersichtlichen Mittelwerte und Standardabweichungen. Das H/C Verhältnis beträgt 1.2, das C/N 12.8.

Tabelle 8 Resultate der CHN-Analyse der FK mit True Spec Analyser mit sd (Anhang C, Tabelle 14)

Element	Mittelwert (M) in Massenanteilen	Standardabweichung (sd)
C _{tot}	54.30%	0.29
H	5.49%	0.03
N	4.95%	0.01

pH-Wert CaCl_2

Der pH-Wert der FK nach den Analysemethoden für EBC-Pflanzkohle mit CaCl_2 liegt bei 9.07 (+/- 0.08), im Wasservolumenextrakt nach H_2O -pH bei 10.46 (+/- 0.03) (Anhang C, Tabelle 15).

Elektronische Leitfähigkeit

Der EC-Wert der FK nach den Analysemethoden für EBC-Pflanzkohle liegt bei 2.006 mS/cm (+/- 0.044), der EC-Wert im Wasservolumenextrakt doppelt so hoch bei 4.690 (+/- 0.114) (Anhang C, Tabelle 16).

Extrahierte Nährstoffe aus der FK

Die Resultate der verschiedenen Extraktionsmethoden und Analysen wurden in verschiedenen Grafiken aufbereitet. Die Beschreibung der Codes findet sich in der Tabelle 2 im Kapitel 2.4.

Stickstoff

Nur der leicht lösliche Stickstoffanteil wurde gemessen und wird in Abbildung 14 aufgezeigt. Der gesamte leicht lösliche Stickstoffgehalt ist mit circa 11 mg/kg FK ziemlich tief. Dabei ist der Gehalt an Ammonium mit 7.38 mg/kg (+/- 0.01) ungefähr doppelt so hoch wie der Nitratgehalt (3.49 mg/kg, +/- 0.64) (Anhang C, Tabelle 17). Nitrit konnte nicht nachgewiesen werden.

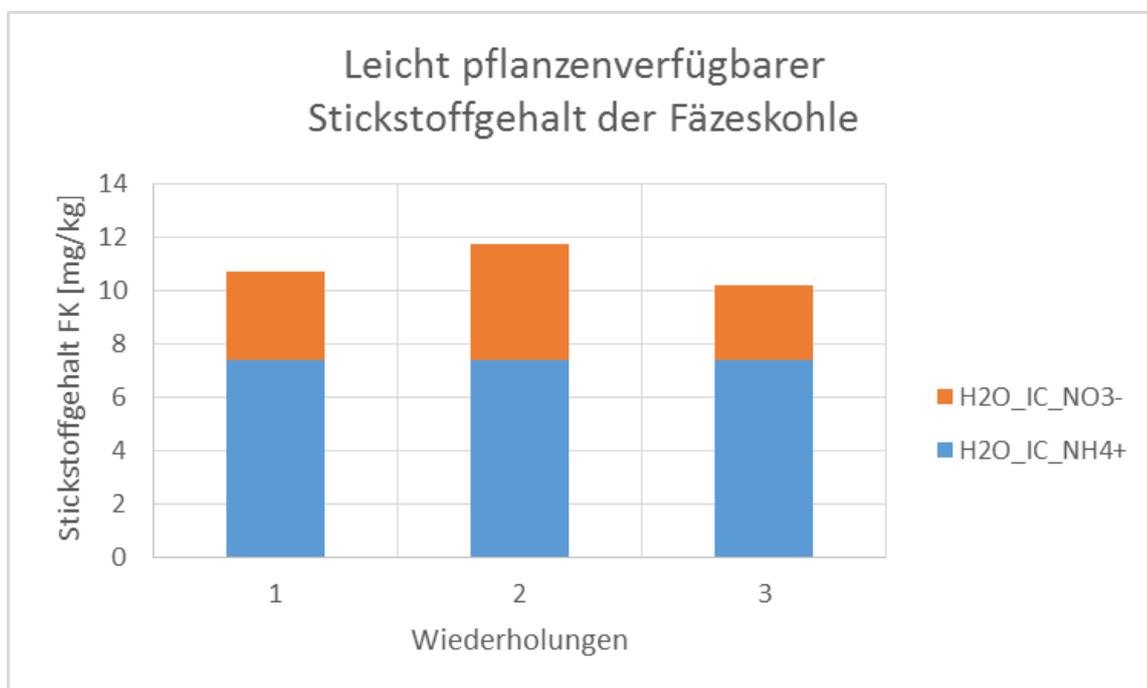


Abbildung 14 Leicht (H_2O) verfügbarer Stickstoffgehalt in mg/kg FK in Form von Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-), analysiert mit Ionenchromatographie (IC), dreifache Wiederholung der Extraktanalysen (1-3) (Anhang C, Tabelle 17)

Phosphat

Der im Wasser aus der Fäzeskohle gelöste Phosphatgehalt ergibt je nach analytischer Methode Werte zwischen 200.6 und 598.5 mg/kg (Anhang C, Tabelle 18). Der gesamte pflanzenverfügbare Phosphatgehalt liegt bei 6291.5 mg/kg (+/- 565.8). Die Abbildung 15 demonstriert die unterschiedlichen Grössenverhältnisse der verschiedenen Extraktionsanalysen logarithmisch.

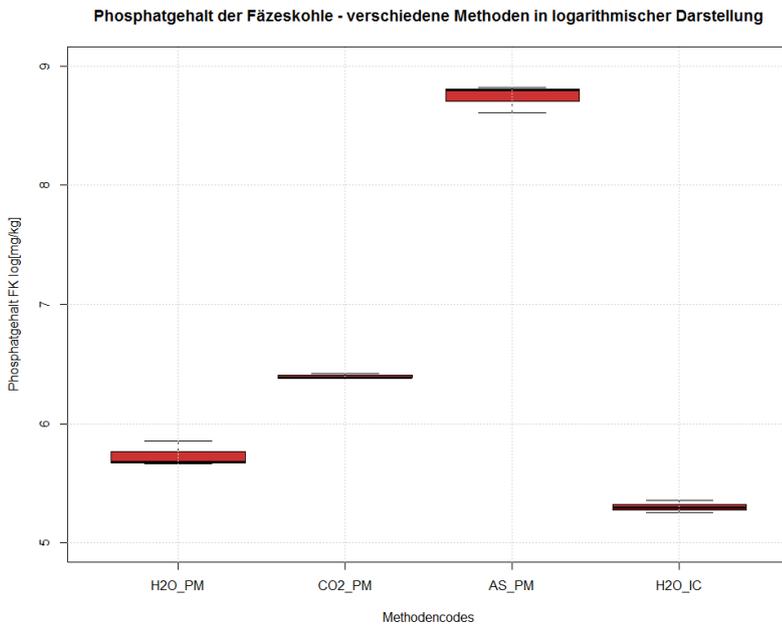


Abbildung 15 Pflanzenverfügbare Phosphatgehalt in mg/kg FK, analysiert mit Photometer (PM) und Ionenchromatographie (IC), logarithmisch, mit Standardabweichung (Anhang C, Tabelle 18)

In Abbildung 16 werden einander nur die Resultate der Analysen mit dem leicht verfügbaren Phosphat gegenübergestellt. Die Werte aus den Wasserextrakten H2O_IC und H2O_PM liegen dabei mit 200.6 mg/kg (+/- 8.3) und 309 mg/kg (+/- 27.8) tiefer als die Werte aus der Extraktion mit kohlensäurehaltigem Wasser CO2_PM mit 598.5 mg/kg (+/- 10.4) (Anhang C, Tabelle 18).

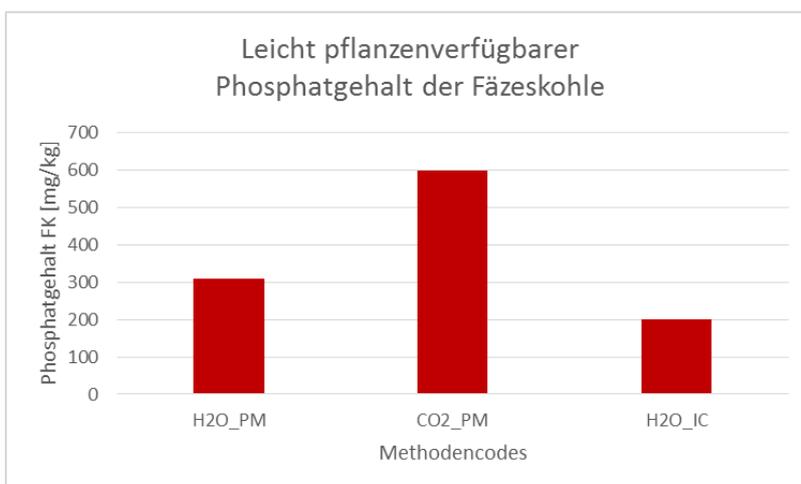


Abbildung 16 Leicht pflanzenverfügbare (H2O bzw. CO2) Phosphatgehalt in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC) und Photometer (PM) (Anhang C, Tabelle 18)

Kalium, Calcium, Magnesium

Die mit verschiedenen Methoden aus der Fäzeskohle gelösten und analysierten Nährstoffe Kalium, Calcium und Magnesium werden in Abbildung 17 in mg/kg FK dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die Werte der leicht löslichen Nährstoffe im Wasser bis ums Zehntausendfache kleiner sind als die gesamten pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte. Zudem sieht man, dass die Kalium-Werte die Calcium- und Magnesium-Werte stark übertreffen.

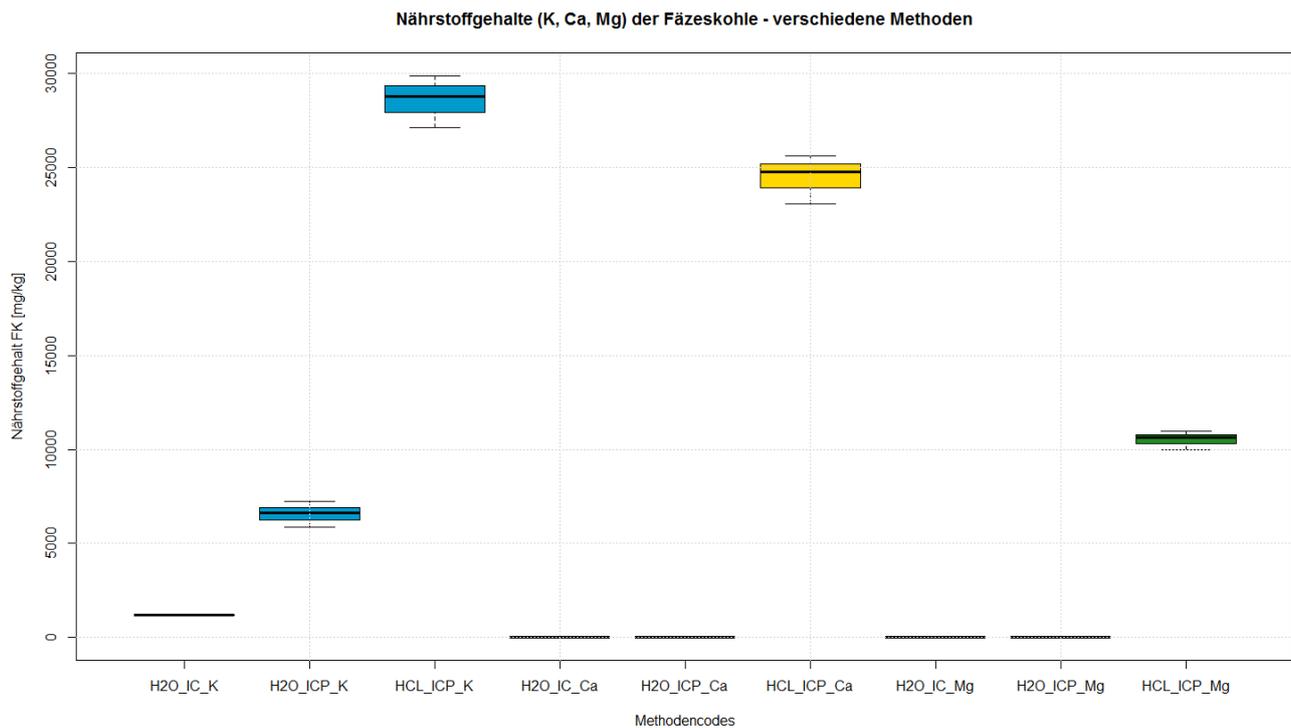


Abbildung 17 Gesamte (HCl) und leicht (H₂O) pflanzenverfügbare Nährstoffe (K, Ca, Mg) in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC) und Atomemissionsspektometrie (ICP), mit Standardabweichung (Anhang C, Tabelle 19)

Das leicht pflanzenverfügbare Kalium mit Mittelwerten von 1198 mg/kg (IC-Analyse) und 6574 mg/kg (ICP-Analyse) ist viel stärker in den Wasserextrakten enthalten als leicht pflanzenverfügbares Calcium und Magnesium (Anhang C, Tabelle 19). Die Verhältnisse werden in Abbildung 18 logarithmisch dargestellt.

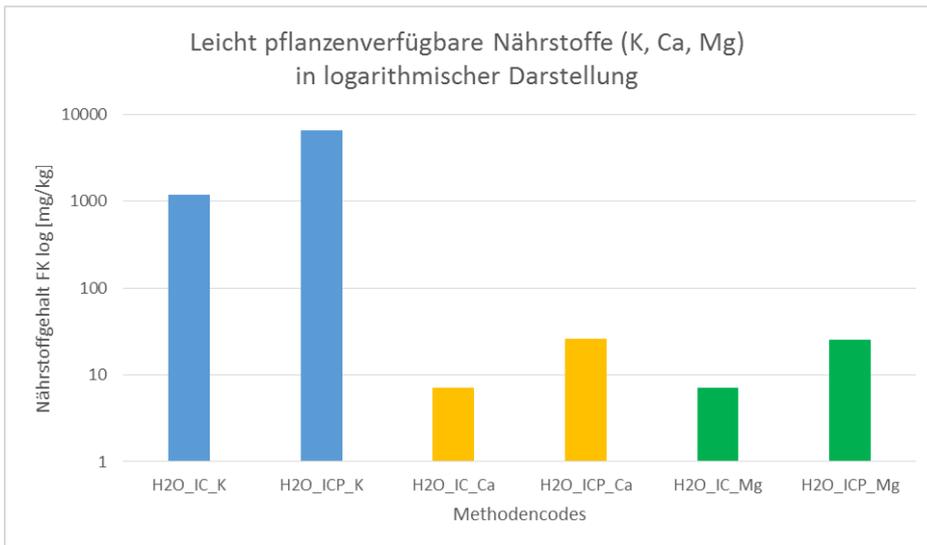


Abbildung 18 Leicht (H₂O) pflanzenverfügbare Nährstoffe (K, Ca, Mg) in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC) und Atomemissionsspektrometrie (ICP), in logarithmischer Darstellung (Anhang C, Tabelle 19)

Die mit der HCl-Lösung extrahierten Nährstoffe zeigen den Anteil der gesamt pflanzenverfügbaren Nährstoffe in der Fäzeskohle (Abbildung 19). Auch hier ist Kalium mit 28,6 g/kg (+/- 1.1) am stärksten vertreten, jedoch nicht mehr mit so grosser Differenz zum Calcium- und Magnesiumgehalt (24.5 g/kg, +/-1.1 bzw. 10.5 g/kg, +/-0.4) (Anhang C, Tabelle 20)

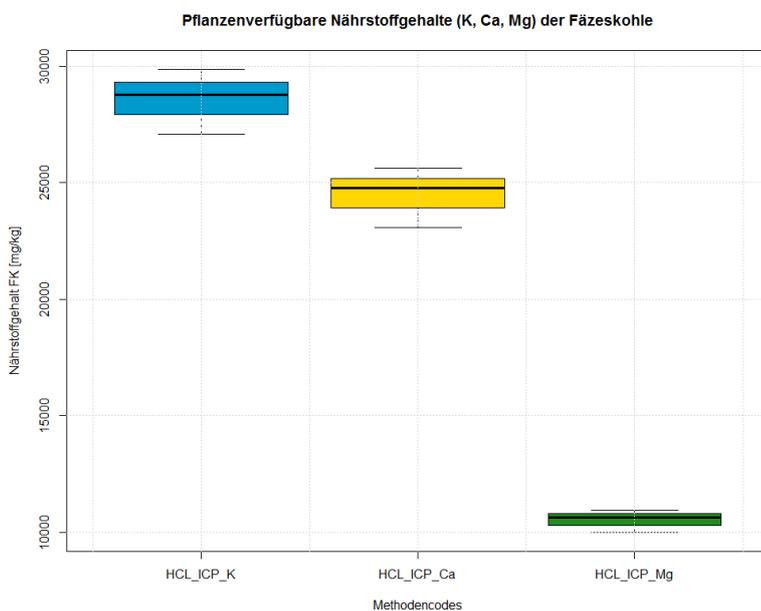


Abbildung 19 In der HCl-Lösung extrahierte, gesamt pflanzenverfügbare Nährstoffe (K, Ca, Mg) in mg/kg FK, analysiert mit Atomemissionsspektrometrie (ICP), mit Standardabweichung (Anhang C, Tabelle 20)

Weitere Nährstoffe

Bei der Analyse der leicht löslichen Nährstoffe wurde unter anderem auch Chlorid mit einem Gehalt von 244 mg/kg (+/- 9) nachgewiesen. In Abbildung 20 wird dieser Wert den nach gleicher Methode analysierten P-, Ca-, Mg-, Su- und Na-Werten gegenübergestellt, daraus wird ersichtlich, dass der

Chloridwert diese klar übertrifft. Die Sulfat- und Natriumgehalte liegen bei 129.82 (+/- 4.08) bzw. 53.39 (+/- 1.70). (Anhang C, Tabelle 21)

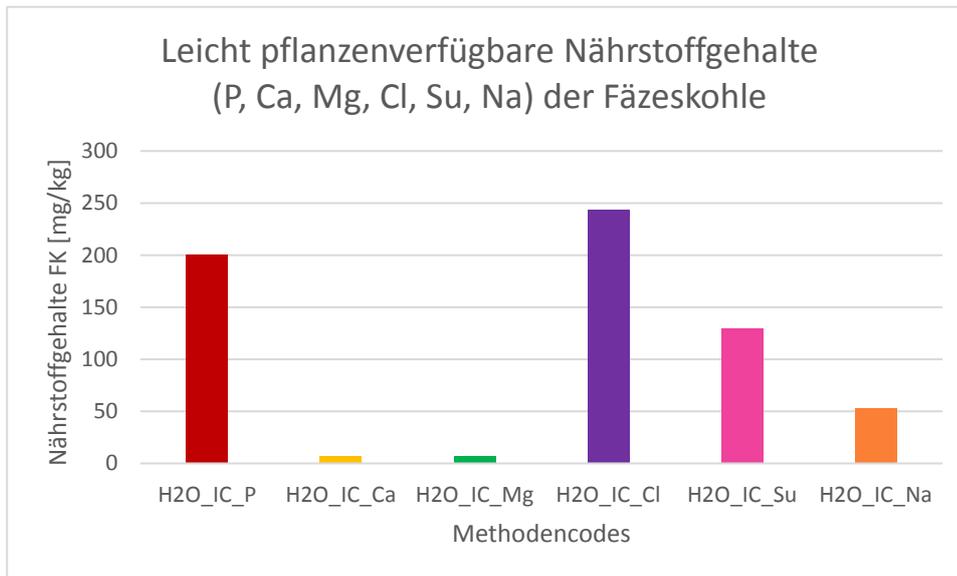


Abbildung 20 Leicht pflanzenverfügbare Nährstoffe (P, Ca, Mg, Cl, Su, Na) im Wasservolumenextrakt (H2O) in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC) (Anhang C, Tabelle 21)

3.3 Experimente mit Pflanzen

Experiment 1: Eignung der FK als Substratdünger

In Abbildung 21 wird das Sprossgewicht der Microgreens in g für die zwei Kontrollen und die sechs Varianten mit unterschiedlichen Kohleanteilen (Codes in Kapitel 2, Tabelle 5) aufgezeigt. Positivkontrolle K1 mit einem Frischmassegewicht von 10.95 g (+/- 1.96) unterscheidet sich stark von allen anderen Varianten. Für die statistische Auswertung mit ANOVA wurde die K1 aufgrund des grossen Unterschiedes nicht einbezogen. Alle anderen Variante wurden auf Signifikanz geprüft (α -Wert = 0,05) (Tabelle 9). V50 hat signifikant weniger Erntemasse im Gegensatz zu den anderen Varianten, von der Negativkontrolle unterscheidet sie sich nur minim. Weitere signifikante Unterschiede konnten zwischen K0 und V5 beziehungsweise K0 und V7.75 festgestellt werden. Die beiden Varianten V5 und V7.75 waren die Varianten mit den höchsten Frischmassegewichten (K1 ausgenommen).

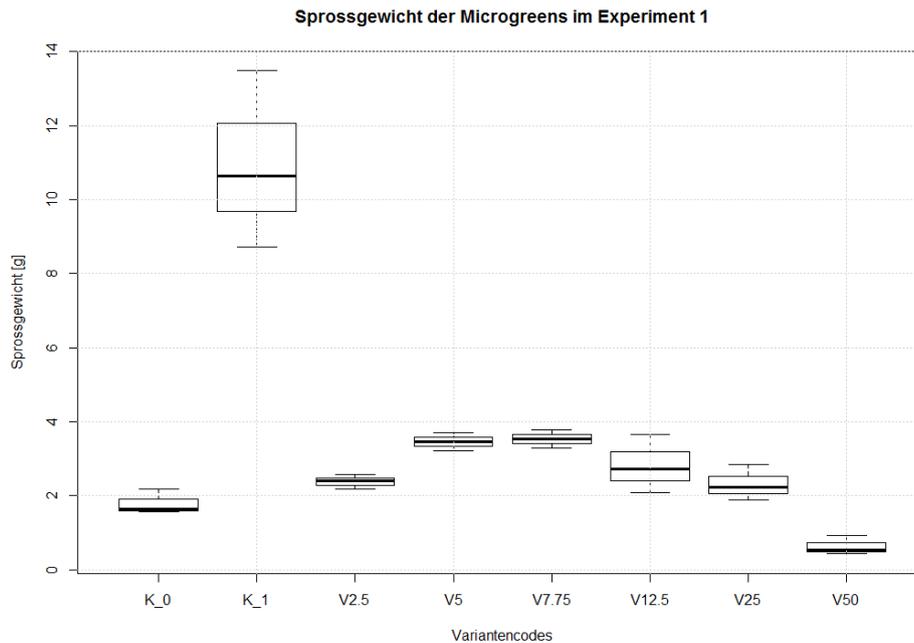


Abbildung 21 Sprossgewichte der Microgreens in g, verschiedene Varianten aus Experiment 1: Eignung der FK als Substratdünger (Anhang D, Tabelle 24)

Tabelle 9 ANOVA Auswertung der Varianten des Experiment 1. P-Values des pairwise.t.test mit Programm R (α -Wert = 0.05), statistisch signifikante p-values in rot

	K0	V12.5	V2.5	V25	V5	V50
V12.5	0.0874	NA	NA	NA	NA	NA
V2.5	0.6413	0.7338	NA	NA	NA	NA
V25	0.7338	0.7338	1.0000	NA	NA	NA
V5	0.0038	0.5761	0.0723	0.0553	NA	NA
V50	0.0553	0.0003	0.0028	0.0035	<0.001	NA
V7.75	0.0028	0.4344	0.0553	0.0443	1.0000	<0.001

Experiment 2: Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung

In Abbildung 22 wird das Sprossgewicht der Microgreens in g für die zwei Kontrollen und die drei Varianten mit unterschiedlichen Fäzeskohleextrakten als Nährstofflösung (Codes in Kapitel 2, Tabelle 7) aufgezeigt. Die statistische Auswertung erfolgte mit ANOVA im Programm R. Alle Varianten wurden auf Signifikanz geprüft (Tabelle 10). Keine statistische Signifikanz konnte zwischen K0 und V1000 festgestellt werden. Es sind die beiden Varianten mit dem geringsten Wachstum der Microgreens und signifikant weniger Sprossgewicht als die anderen Varianten. Ebenfalls keine statistische Signifikanz zeigte sich zwischen Varianten V20 und V50. Die beiden Varianten unterschieden sich jedoch signifikant von K1 und von K0 und V1000.

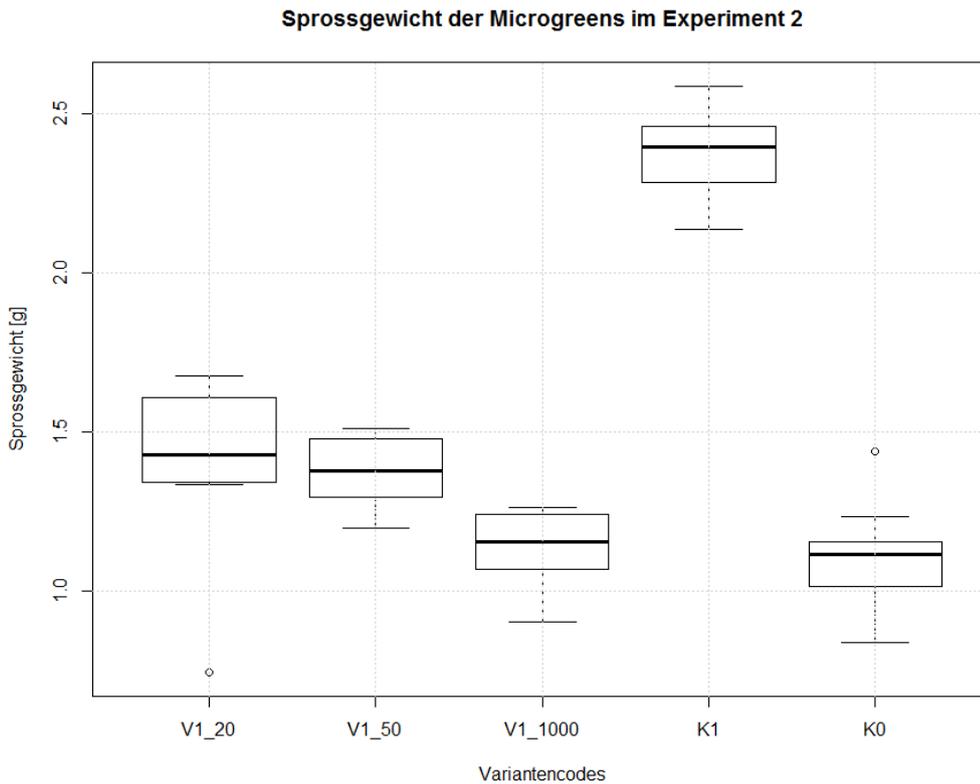


Abbildung 22 Sprossgewichte der Microgreens in g, verschiedene Varianten aus Experiment 2: Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung (Anhang D, Tabelle 25)

Tabelle 10 ANOVA Auswertung der Varianten des Experiment 2. P-Values des pairwise.t.test mit Programm R, (α -Wert = 0.05), statistisch signifikante p-values in rot

	K0	K1	V1_1000	V1_20
K1	<0.001	NA	NA	NA
V1_1000	0.6167	<0.001	NA	NA
V1_20	<0.001	<0.001	<0.001	NA
V1_50	0.0006	<0.001	0.0019	0.2213

pH-Wert und elektronische Leitfähigkeit im Verlauf des Versuch 2

In Abbildung 23 und Abbildung 24 werden die Veränderungen der pH- und EC-Werte der Nährlösungen während des Pflanzenversuchs abgebildet. Die Codes finden sich im Kapitel 2.6 in Tabelle 7. Der pH-Wert der anfangs stark basischen Nährstofflösungen WE_1:20 und WE_1:50 veränderte sich im Laufe der 12 Tage von 10.45 auf 7-7.5, während die pH-Werte der anderen Nährlösungen quasi gleich blieben (Anhang D, Tabelle 22). Die EC-Werte sanken in den ersten Tagen leicht und stagnierten dann (Anhang D, Tabelle 23).

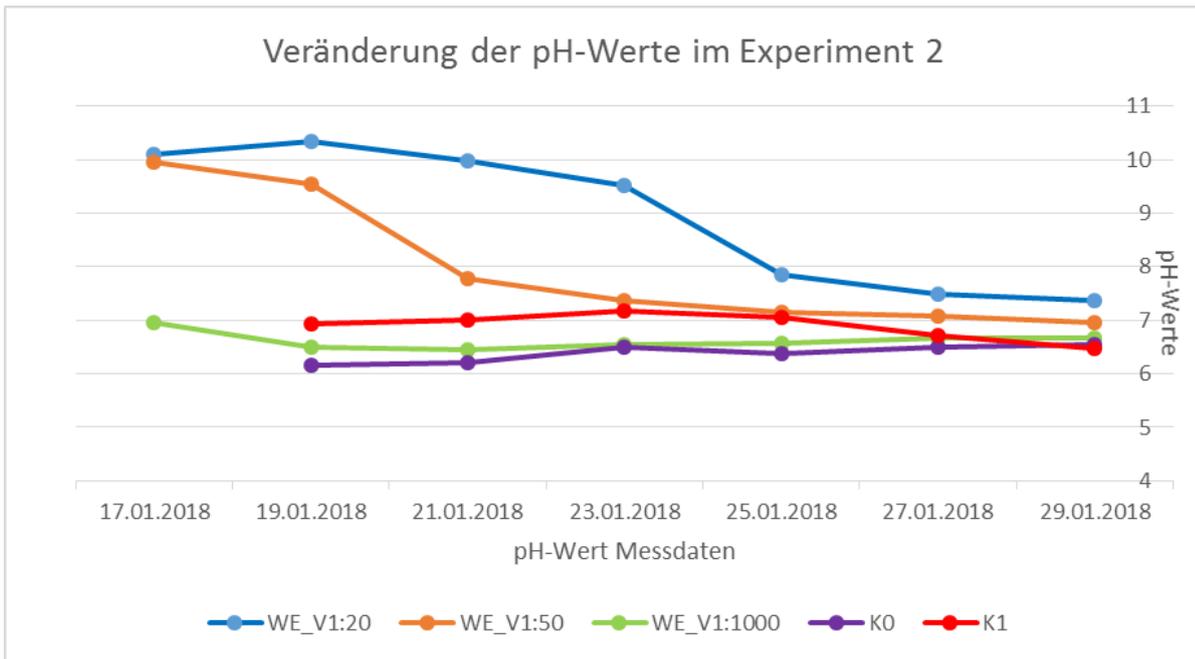


Abbildung 23 Veränderung der pH-Werte der FK-Wasserextrakt (WE) Nährlösungen während des Experiment 2 (Anhang D, Tabelle 22)

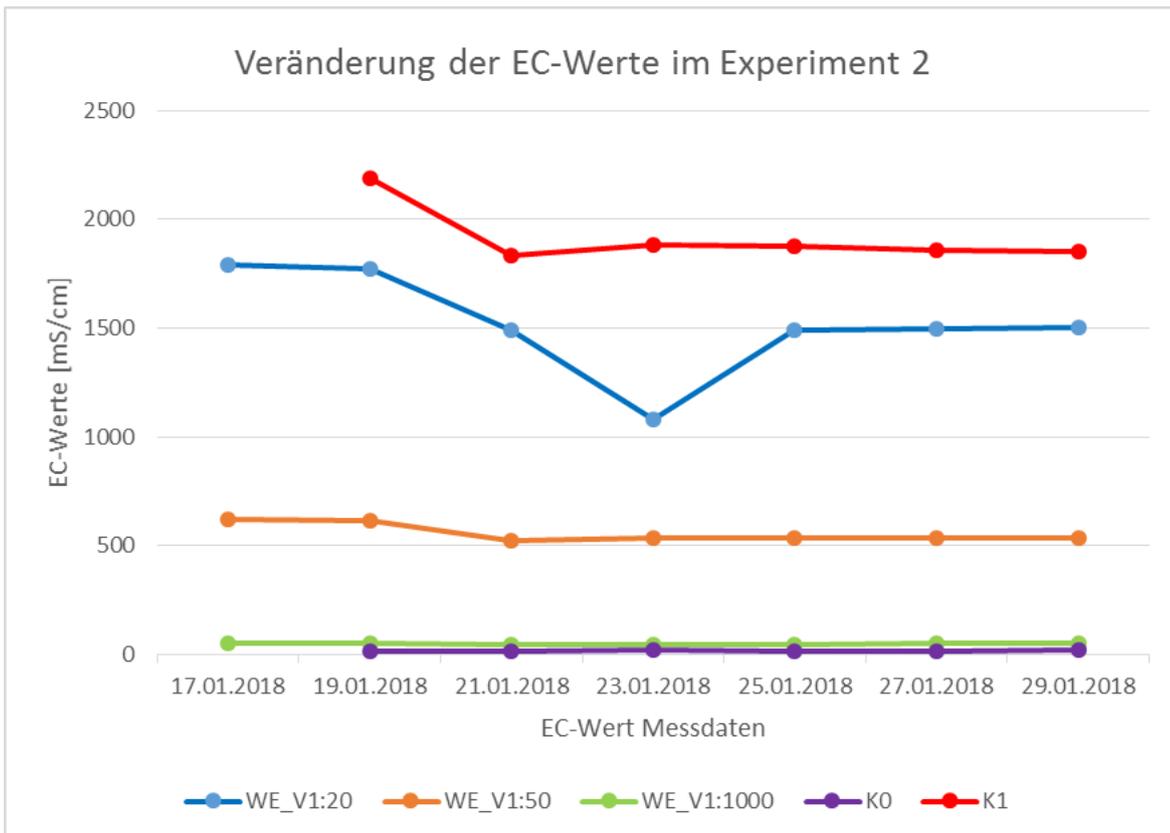


Abbildung 24 Veränderung der EC-Werte der FK-Wasserextrakt (WE) Nährlösungen während des Experiment 2 (Anhang D, Tabelle 23)

4 Interpretation und Diskussion der Resultate

Um die produzierte Fäzeskohle anhand ihrer Charakteristik einordnen zu können, werden hier einige Vergleichsdaten aufgelistet. Verglichen wurden mit Resultaten aus Studien mit Fokus auf Pyrokohle aus menschlichen Fäkalien bzw. Fäkalschlamm. Da die Studien diesbezüglich rar sind, ist die Auswahl stark eingeschränkt. Es wurde darauf geachtet, dass die Bedingungen ähnlich sind, dennoch können aufgrund des starken Einflusses der Ausgangsstoffe und der unterschiedlichen Pyrolysebedingungen die Zusammenhänge nur annähernd diskutiert werden.

Tabelle 11 Pyrolysebedingungen der zu vergleichenden Pyrokohlen mit Codes

Code	Ausgangsmaterial	Temp.	Aufenthaltszeit	Aufheizrate	Quelle
FK_300_20	Menschliche Fäzes, Schweiz	300°C	20 min	Schnell (unbekannt)	Sommer, 2018
HF_300_120	Menschliche Fäzes, USA	300°C	120 min	1.6°C/min	Ward, Yacob, and Montoya, 2014
BC_UG_300_20	Fäkalschlamm, Uganda	300°C	20 min	25°C/min	Bleuler, 2016
BC_UG_350_20	Fäkalschlamm, Uganda	350°C	20 min	25°C/min	Bleuler, 2016
BC_300_40	Fäkalschlamm, China	300°C	40 min	15°C/min	Liu et al. 2014

4.1 Pyrolyse der Fäzes

Bei der Sammlung und Trocknung gab es einige Hürden zu überwinden. Um das Risiko einer Kontaminierung zu verhindern, wurden die Fäzes in den kompostierbaren Säcken im Gefrierschrank gelagert. Für die Trocknung wurde versucht, die in den kompostierbaren Säcken gesammelte Fäzes aus den Säcken zu entfernen, was aufgrund der Verschmelzung nicht immer möglich war. Die Säcke wurden somit teils mitgetrocknet und konnten nicht vollständig entfernt werden. Einen Einfluss auf die Analyseergebnisse ist jedoch aufgrund der geringen Menge und Zusammensetzung (hauptsächlich Stärke) nicht zu erwarten. Aufgrund von weiteren Verlusten während der ersten Trocknung (durch Auslaufen) kann der Masseverlust nicht genau festgelegt werden und schwankt zwischen 25-30%.

Bei der Analyse und Interpretation der Resultate soll immer im Hinterkopf behalten werden, dass es sich beim Ausgangsmaterial Fäzes um eine inhomogene Biomasse handelt, welche je nach Ernährung stark variieren kann.

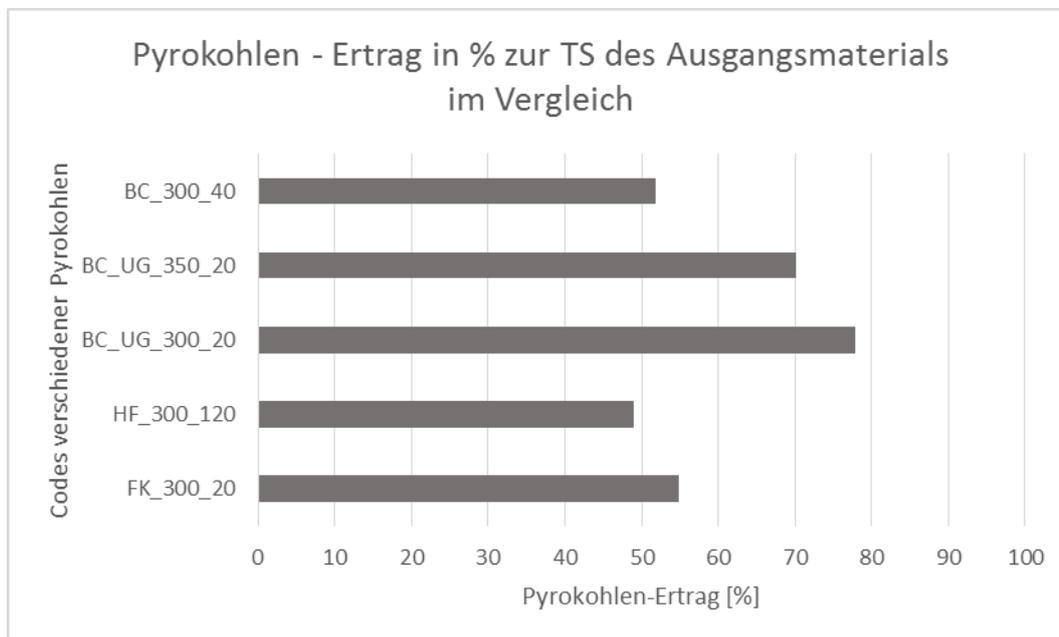


Abbildung 25 FK-Ertrag im Vergleich zu anderen Pyrokohlen-Erträgen in % zur TS des Ausgangsmaterials

Der Ertrag steht jeweils für den Pyrokohleertrag in Bezug auf die Trockensubstanz. Der FK-Ertrag liegt verglichen mit den anderen Versuchen Abbildung 25 mit ungefähr 55% im mittleren Bereich. Gründe für die Unterschiede sind nicht eindeutig ersichtlich, da viele Faktoren einen Einfluss haben können (Kapitel 2: Herstellung der Pyrokohle). In der Studie von Ward, Yacob, and Montoya (2014) ergibt die Pyrolyse von menschlichen Fäzes einen Ertrag von 49%, die geringe Unterschied könnte auf die längere Aufenthaltszeit zurückzuführen sein. Die Pyrokohle aus dem Fäkalschlamm, Uganda liegt mit einem Ertrag zwischen 70 und 80% klar über den verglichenen Pyrokohlen. Was sich im Vergleich der beiden Pyrokohlen aus Fäkalschlamm (BC_UG_300_20 und BC_UG_350_20) gut zeigt, ist, dass bereits eine Zunahme der Pyrolysetemperatur von 50°C eine Verminderung des Ertrags erwirken kann. In den Studien von Wu et al. (2017) und Bleuler (2016) zeigt sich, dass die Masseverluste zwischen 300°C und 350°C bei einem Temperaturbereich von 300°C bis 700°C am stärksten sind. Zurückzuführen ist dies auf die Zersetzung der Zellulose, welche bei dieser Temperatur stattfindet (Yang et al., 2007).

Im Weltraum ist es neben der Schliessung der Nährstoffkreisläufe auch wichtig, das Abfallvolumen zu reduzieren (Lasseur et al., 2010). Ein geringer Pyrokohle-Ertrag wäre daher von Vorteil. Mit einer höheren Pyrolysetemperatur könnte der Ertrag noch weiter minimiert werden, der prozentuelle Aschegehalt steigt dabei. Jedoch besteht die Gefahr, dass Nährstoffe wie Stickstoff oder Sulfat vergasen oder nicht mehr in pflanzenverfügbarer Form vorhanden sind. (Bleuler, 2016)

4.2 Analyse Pyrokohle

Elementaranalyse CHN

Das H/C Verhältnis sollte gemäss EBC <0.7 sein (EBC, 2012). Bei der FK_300_20 liegt das H/C Verhältnis mit 1.2 höher. Das H/C Verhältnis als ein Indikator für die Stabilität, bzw. die Reaktivität zeigt, dass durch die tiefe Pyrolysetemperatur von 300°C der Umwandlungsprozess noch nicht beendet und einige funktionelle Gruppen noch ungestört sind. Das H/C Verhältnis von 1.2 zeigt die geringe Stabilität und hohe Reaktivität der FK auf. Dies bedeutet, dass der Kohlenstoff in der FK eher als Energiequelle für Mikroorganismen zur Verfügung steht, andererseits eine geringere Halbwertszeit hat. (Lopez-Capel et al., 2016)

Das C/N Verhältnis der FK mit 12.8 ist, im Wissen dass Pyrokohlen Werte bis 500 (Lopez-Capel et al., 2016) beziehungsweise bis 1700 (Cross et al., 2016) erreichen, ziemlich tief. Um eine Aussage zur Immobilisierung machen zu können, müsste jedoch das C/N Verhältnis der labilen C und N der organischen Kohlenstoffanteils bzw. organischen Stickstoffs beachtet werden. Es kann hierbei spekuliert werden, dass die FK aufgrund der tiefen Pyrolysetemperaturen und der geringen Stabilität vermehrt labile Kohlenstofffraktionen aufweist und der Kohlenstoff eher für Mikroorganismen verfügbar ist, was zu einer Immobilisation von Stickstoff führen könnte (Cross et al., 2016).

Verglichen mit den anderen Pyrokohlen Abbildung 26 ist der C_{tot} der FK_300_20 mit 54.3% höher als die C_{tot} -Anteil in den Pyrokohlen aus dem Fäkalschlamm. Eine Verunreinigung mit Sand/Lehm des Ausgangsmaterials der BC_UG_350_20 ist wahrscheinlich der Grund für den geringeren C-Anteil. Verglichen mit der Studie von Ward, Yacob, and Montoya (2014), bei welcher ebenfalls menschliche Fäkalien pyrolysiert wurden (HF_300_120), sind die Massenanteile geringer, was mit den unterschiedlichen Aufheizraten oder Aufenthaltszeiten zu tun haben kann. Die Inhomogenität des Ausgangsmaterials könnte ebenfalls einen Einfluss auf die C-Anteile der Pyrokohlen haben.

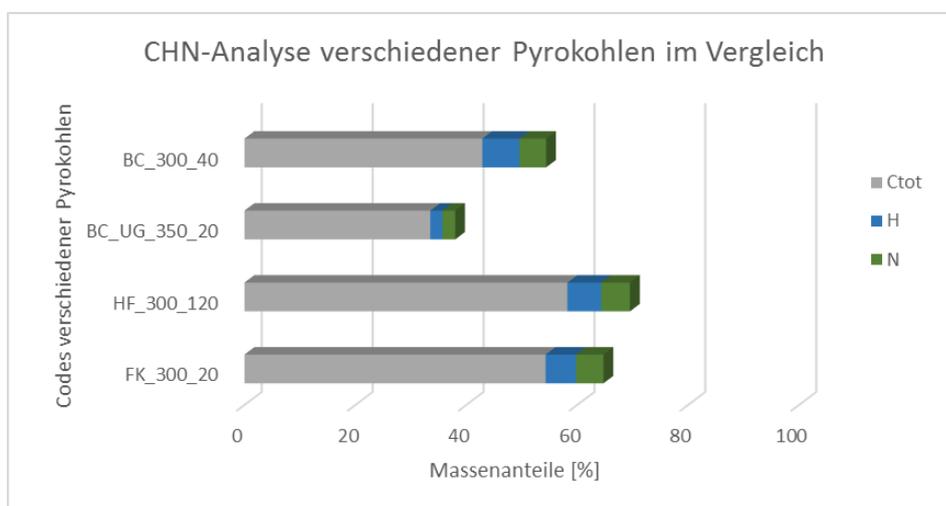


Abbildung 26 CHN-Analyse verschiedener Pyrokohlen im Vergleich, Massenanteile in %

pH-Wert

Der pH-Wert nach den Analysemethoden für EBC-Pflanzenkohle mit CaCl_2 liegt mit 9.07 um circa 1.4 tiefer als bei der Methode im Wasservolumenextrakt mit 10.46 (Anhang C, Tabelle 15). Dass die Werte mit der CaCl_2 -Methode tiefer sind, liegt daran, dass in der Salzlösung auch einige gebundene H^+ -Ionen erfasst werden, welche an Kationenaustauschern gebunden sind. Der natürliche langfristige Vorgang in einem Boden kann so simuliert werden (Nieder, 2009).

Der pH-Wert der FK_300_20 mit 9.07 gleicht dem Wert der BC_UG_350_20 mit 9.2. Der PH-Wert der BC_UG_350_20 wurde ebenfalls mit der CaCl_2 -Methode bestimmt (Bleuler, 2016). Im Vergleich mit dem pH-Wert von 7.3 (BC_300_40) aus der Studie von Liu et al. (2014), welcher im Wasserextrakt 1:5 bestimmt wurde, liegt der pH-Wert der FK_300_20 aus dem Wasserextrakt 1:4 mit 10.46 viel höher. Einen Einfluss kann die Inhomogenität des Ausgangsmaterials haben, oder der Fakt, dass in der Studie von Liu et al., (2014) vor der pH-Messung 1 h zugewartet wurde.

Elektronische Leitfähigkeit

Der EC-Wert der FK nach den Analysemethoden für EBC-Pflanzenkohle liegt bei 2.006 mS/cm, der EC-Wert im Wasservolumenextrakt doppelt so hoch bei 4.690 (Anhang C, Tabelle 16). Dieser grosse Unterschied von ungefähr 2.4 kann anhand der unterschiedlichen FK-VE Verhältnisse erklärt werden. Die Methode nach den EBC-Richtlinien nutzt ein Verhältnis von 1:10 (EBC, 2012), die Wasservolumenextraktion H20SU-Ex ein Verhältnis von ungefähr 1:4 (ACW, 2012c). In den Vorversuchen (Kapitel 2.5) sieht man eindeutig die Bedeutung dieser Verhältnisse, was den EC betrifft. Werte mit unterschiedlichen Messtechniken lassen sich deshalb nur bedingt vergleichen.

Der EC-Wert der FK_300_20 liegt bei 2.006 mS/cm, der EC-Wert der BC_UG_350_20 bei 5.5 mS/cm. Auch die EC-Messung der BC_UG_350_20 wurde nach den Analysemethoden für EBC-Pflanzenkohle gemessen (Bleuler, 2016). Dieser grosse Unterschied kann nicht eindeutig geklärt werden. Es kann jedoch sein, dass die eingesetzte Menge Pyrokohle einen Einfluss hat. Bei der Analyse des ECs der BC_UG_350_20 wurden aufgrund von begrenzter Verfügbarkeit nur 2 g Kohle (anstatt 20 g) Kohle verwendet (Bleuler, 2016). Dies ist einerseits von Bedeutung, da das Ausgangsmaterial sowie auch die Pyrokohle eine starke Inhomogenität aufweisen kann, andererseits kann die Einwaage einen Einfluss auf die Nährstoffgehalte und somit auch auf den EC-Wert haben (Stünzi, 2006).

Extrahierte Nährstoffe aus der FK

Die Resultate der verschiedenen Extraktionsmethoden und Analysen ergaben einige Erkenntnisse zu den leicht pflanzenverfügbaren Nährstoffen bis zum gesamten Gehalt an pflanzenverfügbaren Nährstoffen in der FK. Die Eignung der FK als Düngelieferant wird im Folgenden anhand der

analysierten Nährstoffe und im Vergleich mit anderen Studien diskutiert. Aufgrund der Inhomogenität des Ausgangsmaterials, der vielen komplexen Zusammenspiele der Elemente und der verschiedenen Bedingungen können jedoch nur Annahmen getroffen werden.

Stickstoff

Laut Lopez-Capel et al. (2016) ist es üblich dass circa 50% des gesamten Stickstoffs ist in der Pyrokohle-Matrix eingeschlossen und nicht pflanzenverfügbar sind. Eine Studie von Ippolito et al., (2015) mit Pyrokohlen aus verschiedenen Ausgangsmaterialien zeigt, dass ein Grossteil des Stickstoffs während der Pyrolyse verloren geht und der totale Stickstoffgehalt nur 0.09 bis 3.3% der Kohlemasse ausmacht. Ippolito et al. (2015) meint, dass weniger als 0.01% des gesamten Stickstoffs in verfügbarer Form vorliegen. Es wurde in dieser Arbeit nur der schnell verfügbare Stickstoff im Wasserextrakt gemessen, dieser ist mit insgesamt 11 mg/kg in sehr geringem Masse vorhanden. Im Verhältnis zu anderen Nährstoffen kommt Stickstoff in so kleiner Konzentration in Pyrokohlen vor, dass die Pyrokohlen nicht als potentieller Stickstoffdünger in Frage kommt und der Fokus auf anderen Nährstoffen liegt (Camps-Arbestain et al., 2015).

Vom gemessenen wasserlöslichen Stickstoff sind 7.38 mg/kg in Form von Ammonium (NH_4^+) und 3.49 mg/kg in Form von Nitrat (NO_3^-) vorhanden. In einer optimalen Nährlösung sollten beide Stickstoffformen (NH_4^+ und NO_3^-) vorkommen und im Verhältnis 1 (NH_4^+) zu (3-4) NO_3^- stehen (Benton, 2005). Das Verhältnis in dem FK-Wasserextrakt beträgt jedoch 2:1. Machen NH_4^+ Ionen mehr als 50% der totalen Stickstoffkonzentration aus, kann die Nährlösung toxisch sein und den pH beeinflussen. Zusätzlich stehen die Ammoniumkationen NH_4^+ im Antagonismus zu Ca^{2+} . (Benton, 2005) In Anbetracht, dass die Werte sehr klein sind, kann nicht gesagt werden, ob bei einer Anwendung als Nährlösung das Pflanzenwachstum durch das Missverhältnis negativ beeinflusst wird.

Phosphat

Mit 200-600 mg/kg hat sich nur ein kleiner Teil der gesamten pflanzenverfügbaren Phosphatgehalts (6'300 mg/kg) im Wasserextrakt gelöst. Es zeigt sich zudem gut, dass mit einer leichten Säure wie CO_2 bereits ungefähr doppelt so viel Phosphat aus der FK rauslösen lässt. Ob dies ein grundlegendes Verhalten ist, müsste in einer separaten Studie untersucht werden, vor allem, da die Konzentrationen von P in der CO_2 -Extraktion stark vom Calciumgehalt abhängig ist (Stünzi, 2006). In der Methode CO_2 -Ex wird zudem erwähnt, dass die Extrakte mit CO_2 -gesättigtem Wasser nur circa 5 Stunden stabil sind und P-Verluste durch Fällungen bereits nach kurzer Zeit stattfinden können (ART, 2012). Weshalb die Analyse des Wasservolumenextrakts mit der IC mit 200.6 mg P/kg weniger angibt als mit der Methode mit Ammoniummolybdat mit 309.2 mg P/kg könnte daran liegen, dass mit der Ionenchromatographie nur die Orthophosphate erfasst werden, bei der photometrischen Methode können dank der Säure und Erhitzung auch Polyphosphate und zum Teil

organischer P bestimmt werden (Stünzi, 2006). Einen zusätzlichen Einfluss könnte die Wartezeit von circa 4 Tagen zwischen Wasservolumenextraktion und Ionenchromatographie haben, obwohl die Proben gekühlt gelagert wurden.

Im Gegensatz zu Pyrokohle aus pflanzlichen Ausgangsmaterialien ist der gesamte pflanzenverfügbare Phosphatgehalt der FK mit 6'300 mg/kg vergleichsweise hoch: Verschiedene Studien ergaben einen Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor (mit Ammoniumacetat NH₄OAc) zwischen 25.1 und 806 mg/kg und einem durchschnittlichen Wert von 544 mg/kg bei einer Pyrolysetemperatur von 300-399°C (Ippolito et al., 2015).

Studien, in welchen der pflanzenverfügbare P-Gehalt mit 2% Ameisensäure extrahiert wurde, vergleicht Bleuler (2016). Die Ausgangsmaterialien der Pyrokohlen der Vergleichsdaten sind menschliche und tierische Abfälle, die pflanzenverfügbaren P-Werte liegen dabei zwischen 5'500 und 36'000 mg/kg (Bleuler, 2016).

Tabelle 12 Codes, Hintergrundinformationen und Quellenangaben zu den vergleichenden Pyrokohlen

Code	Ausgangsmaterial	Pyrolysetemp.	Extraktionsmethode	Quelle
FK_300_WE	Menschliche Fäzes, Schweiz	300°C	Wasserextrakt	Sommer, 2018
FK_300_AS	Menschliche Fäzes, Schweiz	300°C	Ameisensäure	Sommer, 2018
BC_UG_350	Fäkalschlamm, Uganda	350°C	Ameisensäure	Bleuler, 2016
BC_P_399	Pflanzlich	300-399°C	Ammoniumacetat	Ippolito et al. 2015
BC_BS_350	Biosolids	350°C	Ameisensäure	Wang et al. 2012
BC_KM_350	Kuhmist	350°C	Ameisensäure	Wang et al. 2012
TSP	TSP-Fertilizer	-	Ameisensäure	Zwetsloot, Lehmann, and Solomon 2015

Um verschiedene Pyrokohlen auf ihre pflanzenverfügbarem Phosphatgehalte zu prüfen und die Pyrokohlen in Relation zu einem mineralischen P-Dünger zu setzen, werden diese in einer Grafik nebeneinandergestellt (Abbildung 27). Die Codes und Hintergrundinformationen zu den verschiedenen Pyrokohlen finden sich in Tabelle 12. Bei der Auswahl wurde wiederum darauf geachtet,

dass die Pyrokohlen bei ähnlicher Pyrolysetemperatur hergestellt wurden, da diese wie in Kapitel 1.2 besprochen, durchaus einen Einfluss auf die Nährstoffgehalte ausüben kann.

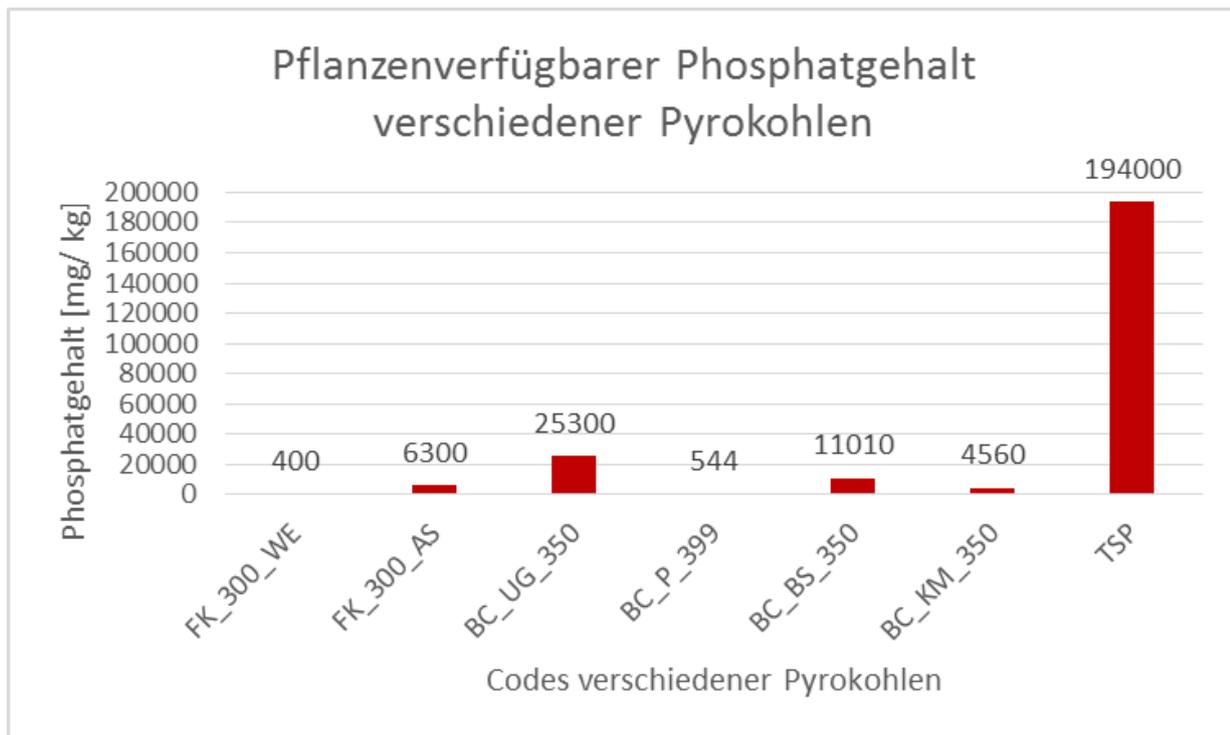


Abbildung 27 Pflanzenverfügbare Phosphatgehalte verschiedener Pyrokohlen im Vergleich

Einen klar unterdurchschnittlichen Wert zeigt die Pyrokohle aus pflanzlichem Ausgangsmaterial (BC_P_350) mit 544 mg P/kg. Der im Wasser gelöste und leicht pflanzenverfügbare Phosphatgehalt der FK_300_WE liegt mit 400 mg/kg nicht weit darunter. Wang et al. 2012 meint das Pyrokohlen von Biosolids (BC_BS_300) mit 11'010 mg P/kg oder von Kuhmist (BC_KM_300) mit 4'560 mg P/kg so effektiv wie kommerzielle P-Dünger sein können. Auch Bleuler (2016) schlussfolgerte dies. Die in dieser Arbeit hergestellte Fäzeskohle liegt mit 6300 mg pflanzenverfügbarem P/kg etwa im Durchschnitt. Eine Extraktion mit 2% Ameisensäure aus einem Triple Super Phosphate (TSP) - Fertilizer in einer Studie von Zwetsloot, Lehmann, and Solomon (2015) ergab einen vergleichsweise hohen Wert von 194'000 (+/-0.0041) mg P/kg. Bei einem Vergleich muss berücksichtigt werden, dass dies ein hochdosierter reiner P-Dünger ist, mit der Absicht den Phosphor den Pflanzen sofort zur Verfügung zu stellen (Landor 2016). Die Fäzeskohle käme eher als langfristig wirkender und gering dosierter Phosphatdünger in Frage. Bleuler (2016) stellt bei einem Leaching-Versuch fest, dass sich in 10 Tagen erst 31% des gesamten pflanzenverfügbaren Phosphats gelöst haben.

Für weitere Experimente in dieser Richtung könnte es sinnvoll sein, die Pyrolysetemperatur auf 450°C zu setzen. Denn wie Bleuler (2016) in ihrer Arbeit feststellte, ist bei 450°C verhältnismässig viel Phosphat in pflanzenverfügbarer Form vorhanden. Einen Verlust durch Vergasung sollte erst bei 700°C stattfinden (Wang et al., 2012)

Kalium, Calcium, Magnesium

Grund für die unterschiedlichen analytischen Ergebnisse der Wasservolumenextrakte bei IC oder ICP-Analyse ist die unterschiedliche Herangehensweise dieser Methoden. Beim ICP werden die

Komplexe durch Hitze aufgespalten, es werden mehr Ionen gemessen. Bei der IC Methode werden nur die gelösten Ionen gemessen (Wanner, 2017). Die Resultate zeigen, dass mit der ICP-Analyse ungefähr die siebenfache Menge Nährstoffe detektiert werden kann.

Laut Camps-Arbestain et al. (2015) kann mit HCl quasi der gesamte Gehalt an Kalium rausgelöst werden. Die FK hat mit 28'000 mg/kg einen sehr hohen gesamten pflanzenverfügbaren K-Gehalt, davon sind 1200-6500 mg/kg leicht löslich. Im Vergleich mit leicht löslichem Calcium und Magnesium konnte im Wasservolumenextrakt sehr viel mehr Kalium detektiert werden. Es zeigte sich bereits in anderen Studien, dass Kalium aufgrund der hohen Löslichkeit der Kaliumsalze schnell in Lösung geht (Camps-Arbestain et al., 2015; Ippolito et al., 2015). Im Vergleich zu Pyrokohlen aus pflanzlichen Ausgangsmaterialien mit einem pflanzenverfügbaren K-Gehalt zwischen 117 und 13'300 mg/kg ist der Gehalt in der FK mit 28'000 mg K/kg überdurchschnittlich (Ippolito et al., 2015). Der Wert der FK übertrifft ebenfalls den in der Pyrokohle aus Fäkalschlamm (BC_UG_350_20) gemessene Totalgehalt von 12'700 mg K/kg (Bleuler, 2016).

Wie bereits erwähnt, hat sich mit 25 mg/kg nur sehr wenig Calcium im Wasserextrakt gelöst. Mit 23'000 mg/kg jedoch einen ähnlich hohen gesamten pflanzenverfügbaren Gehalt wie beim Kalium. Auch Magnesium ist mit 24 mg/kg nur in geringem Masse schnell verfügbar, der gesamte pflanzenverfügbare Mg-Gehalt beträgt 10'533 mg/kg. Im Vergleich zu verfügbarem Ca und Mg in Pyrokohlen aus pflanzlichen Ausgangsmaterialien sind die Werte der FK 10 bis 100x grösser (Ippolito et al., 2015). Camps-Arbestain et al. (2015) sagt, dass Calcium und Magnesium bis zu einer Pyrolysetemperatur von 500°C in der Pyrokohle erhalten bleiben und mit der HCl-Methode bis zu 98% der gesamten Menge extrahiert werden können.

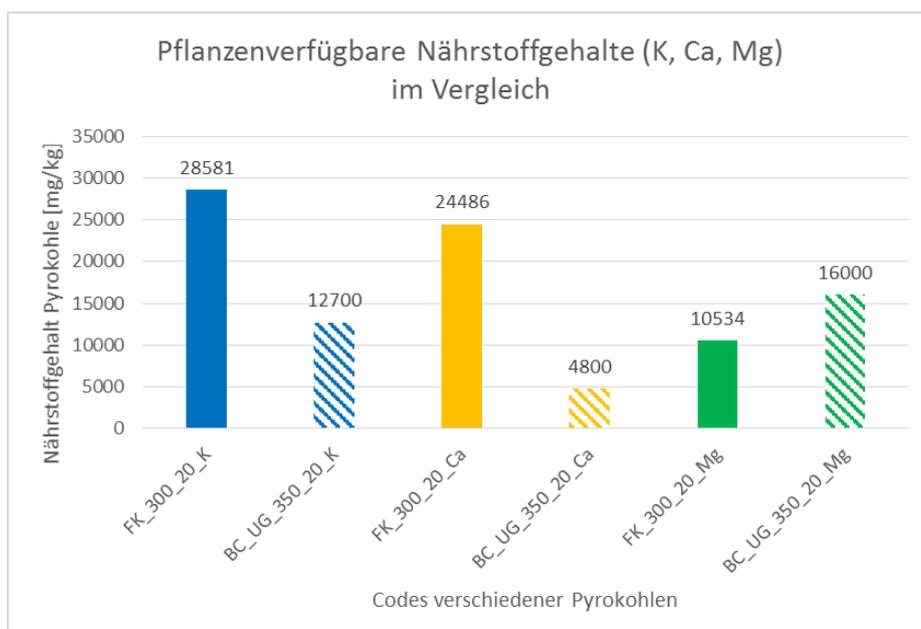


Abbildung 28 Pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte (K, Ca, Mg) in mg/kg FK im Vergleich mit Pyrokohle aus Fäkalschlamm

In Abbildung 28 werden die Nährstoffgehalte den Totalgehalten der Pyrokohle aus Fäkalschlamm (BC_UG_350_20) gegenübergestellt. In der Abbildung ist klar erkennbar, dass die Kalium- und Calcium-Werte der FK höher sind als die in der Pyrokohle aus Fäkalschlamm gemessenen. Dagegen ist der Magnesiumgehalt in der FK tiefer als in der Pyrokohle aus Fäkalschlamm.

Will das Wasserextrakt als Nährlösung genutzt werden, muss die Zusammensetzung der Nährstoffe beachtet werden (Oester et al., 2012). Die Kationen K^+ - Ca^{2+} - und Mg^{2+} sollen idealerweise im Gleichgewicht sein, Benton (2005) empfiehlt ein Verhältnis von 35:45:20. Das Kalium wird von diesen Kationen am schnellsten von den Pflanzen absorbiert und transportiert. Ein Grund dafür könnte sein, dass einwertige Ionen wie K^+ schneller aufgenommen werden, als zweiwertige (Benton, 2005). Viel Kalium jedoch kann aufgrund des Antagonismus zu Mg- und Ca-Mangel führen. Die Absorption des Calciums gelingt am besten, wenn genügend Nitrat (NO_3^-) in der Lösung vorhanden ist, denn Ca^{2+} Ionen werden passiv transportiert und NO_3^- wirkt dabei als Symbiont. Im Gegensatz zum Ammonium NH_4^+ , welches die Aufnahme von anderen Kationen wie Calcium konkurrenzieren kann (Benton, 2005). Wie in Kapitel 1.3 erwähnt, hat auch der pH-Wert im Boden bzw. in einer Nährlösung einen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Nährstoffe. Bei einem pH über 6.5 besteht bereits Gefahr der Ausfällung vom Calcium mit Phosphor, Sulfat oder als Calciumcarbonat (Benton, 2005). Um P-Verluste durch Fällung zu verhindern, sollte der pH deswegen bei 6-6.5 liegen (Silber, 2008). Ein weiterer Grund, Fällungen vorzubeugen ist, dass die Ablagerungen problematisch für das technische Equipment sind (Silber & Bar-Tal, 2008).

Weitere Nährstoffe

In den Resultate wurde aufgezeigt, dass Chlorid im Gegensatz zu anderen Nährstoffe in sehr hoher Konzentration im Wasserextrakt vorhanden ist (Abbildung 20). Auch in der Studie von Bleuler, (2016) wird festgestellt, dass sich Chlorid beim Leaching relativ schnell löst. Will man die Wasserextrakte als Nährlösung brauchen, besteht dabei die Gefahr, dass die Aufnahme anderer Anionen, speziell die Aufnahme von NO_3^- unterdrückt wird. Vor allem salzsensitive Pflanzen reagieren auf diese Konkurrenz (Silber & Bar-Tal, 2008). Chloride können bei zu hoher Konzentration toxisch wirken und rufen Symptome wie Verbrennungen oder vertrocknete Blätter hervor (De Pascale et al., 2013). Zudem wird die Aufnahme von Chloriden (Cl^-), Sulfaten (SO_4^{2-}) und Phosphaten ($H_2PO_4^-$) gefördert, wenn wenig NO_3^- vorhanden ist (Benton, 2005).

4.3 Experimente mit Pflanzen

Die vergleichbare Nährstoffkonzentration wurde nur in dem Wasservolumenextrakt nach H20SU-Ex gemessen, um einen Anhaltspunkt zu geben, welche Nährstoffe in der Kohle leicht pflanzenverfügbar sind. Der Anteil der FK im Substrat im Experiment 1 und das Verhältnis der FK und VE der Wasserextrakte für die Nährlösungen im Experiment 2 beeinflussen die

Nährstoffkonzentration und ein Vergleich mit der analysierten Nährstoffkonzentration in der FK ist nur annähernd möglich. Es ist zudem anzunehmen, dass sich die Verfügbarkeit in den Wasserextrakten aufgrund von chemischen Reaktionen mit der Zeit verändert.

Bonitur durch Ermittlung des Sprossgewichts der Microgreens

Die Ernte der Microgreens fand 15 bis 17 Tage nach der Aussaat statt. Dies liegt sogar ein wenig über den Richtwerten der Wachstumsdauer von Mustard Microgreens (Franks & Richardson, 2009).

Die Positivkontrollen K1 zeigten bei beiden Versuche einen kräftigen vegetativen Wuchs, was in beiden Fällen zu einem signifikant höheren Sprossgewicht führte. Das um ein vielfaches höhere Frischmassegewicht der Positivkontrollen kann auf die Zufuhr von Stickstoff durch die Nährlösung Plantaaktiv von Hauert erklärt werden. Wie bereits erwähnt, kann die FK den Stickstoffbedarf der Pflanzen nicht decken. Die tiefen Stickstoffgehalte in der Nährlösungen erweisen sich problematisch und müssten durch Beigabe von Stickstoffdüngern ausgeglichen werden, falls ein guter Ertrag erzielt werden will.

Ein weiterer kritischer Punkt zur direkten Anwendung der Wasserextrakte ist das bestehende Missverhältnis zwischen K-Ca-Mg. Bei einer professionellen Anwendung müsste dies besser ausgeglichen werden. Mit einer mehrtägige Auswaschung der FK wie in der Studie von Bleuler (2016) könnte eventuell mehr Ca und Mg extrahiert werden. Zudem könnte eine Extraktion mit CO₂ wie in der Phosphatextraktion zu einer verstärkten Rauslösung einiger Nährstoffe wie Calcium führen (Stünzi, 2007). Ein weiterer einschränkender Faktor für das Wachstum bei hoher FK-Konzentration könnte der erhöhte Chloridgehalt sein (Oester et al., 2012).

Experiment 1: Eignung der FK als Substratdünger

Für die statistische Auswertung wurde K1 wegen des unvergleichbar hohen Sprossgewichts und folgender Inhomogenität der Daten nicht einbezogen. V50 mit einem 50% Gewichtsanteil FK im Substrat hat signifikant weniger Erntemasse im Gegensatz zu allen andern, was auf eine toxische Wirkung der FK bei solch hoher Konzentration hinweist. Es könnte sein, dass durch die hohe FK-Konzentration der EC für die salzempfindlichen Keimlinge zu hoch war (Oester et al., 2012). Wie in der Nährstoffanalyse gesehen, löst sich das Chlorid schnell im Wasserextrakt. Es kann deshalb angenommen werden, dass auch in den hochkonzentrierten FK-Varianten wie V50 oder V25 eine, im Gegensatz zu anderen Nährstoffen, hohe Chlorid-Konzentration vorherrscht, welche eine gewisse Toxizität hervorruft. Durch den signifikanten Unterschied von V5 und V7.75 zu der Negativkontrolle K0 kann gesagt werden, dass die Pflanzen von den in den Wasserextrakten der FK vorhandenen Nährstoffen profitieren konnten.

Spannend hierbei wäre eine erneute Elementaranalyse der FK, um die Stabilität einschätzen zu können. Da die H/C - und da C/N - Verhältnisse das Verhalten einer Pyrokohle in der Interaktion

stark beeinflussen können, könnte eine erneute Analyse nach der Ernte weite Erkenntnisse liefern. Da die FK im Gegensatz zu Perlit nicht inert ist, dürfte die Kontrolle über den Nährstoffhaushalt schwieriger sein. Auch eine pH-Wert und EC-Wert Messung im Substrat wäre interessant um weitere Diskussionen zu ermöglichen.

Verschiedene Versuche mit Pyrokohle als Kompostadditiv, in Feldversuchen als Bodenverbesserungsmittel oder als Torfersatz in kleineren oder grösseren Dosen brachten viele verschiedene Resultate und zeigten negative sowie positive Effekte der Pyrokohlen auf das Pflanzenwachstum auf. Je nach Bedingungen und involvierter Parameter kann der Einfluss der Pyrokohlen stark variieren (Kammann, Glaser & Schmidt, 2016; O'Toole et al., 2016). Aufgrund der Komplexität dieses Zusammenspiels können in diesem Rahmen keine Vergleiche zu anderen Versuchen gezogen werden.

Experiment 2: Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung

Die signifikant geringeren Frischmassegewichte der Negativkontrolle K0 und der V1000 im Gegensatz zu den anderen Varianten lassen die Annahme zu, dass die Pflanzen eindeutig zu wenig Nährstoffe erhalten haben und ein Mangel vorherrscht. Aufgrund des tiefen EC-Wertes der V1000 konnte bereits geahnt werden, dass die Gefahr zur Unterernährung besteht.

Keine signifikanten Unterschiede wurden zwischen den Varianten V20 und V50 festgestellt. Sie unterscheiden sich jedoch signifikant von der unterernährten Varianten V1000 und der Negativkontrolle. Wiederum kann angenommen werden, dass die Nährlösungen von V20 und V50 den Pflanzen gewisse essentielle Nährstoffe zur Verfügung stellten und somit eine wachstumsfördernde Wirkung der FK bei Nährlösungen aus Wasserextrakten im Verhältnis 1:20 und 1:50 festzustellen ist.

Spannend in der Diskussion sind auch die veränderten pH- Werte der Nährlösungen für V20 und V50. Die pH-Werte in den Nährlösungen V20 und V50 sanken im Verlauf des Versuchs stark und die Werte stagnierten in einem leicht basischen Bereich über 7. Das könnte für weitere Versuche interessant sein, indem einige Tage gewartet wird bis der pH sich eingependelt hat, damit die Pflanzen nicht mit zu hohen pH-Werten > 10 konfrontiert werden. Zudem wäre es spannend, zu verschiedenen Zeitpunkten die Nährstoffverfügbarkeit in den Nährlösungen zu prüfen. Gab es Fällungsreaktionen oder hat sich der Stickstoff umgewandelt?

5 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, Nährstoffe aus der Kohle menschlicher Fäzes zu gewinnen und die Fäzeskohle auf ihre Eignung als Düngemittel in einem hydroponischen Experiment zu testen. Im Fazit werden nochmals die die wichtigsten Erkenntnisse aufgegriffen.

Space Base 1 – Fäzes und ihr Potenzial

Zuerst wurden die Beweggründe für eine Wiederverwertung menschlicher Fäzes und ihre Einbindung in den Nährstoffkreislauf theoretisch durchleuchtet. Der heutzutage vielerorts unterbrochene Nährstoffkreislauf soll mit neuen, modernen Ansätzen (EcoSan) und einem Zwischenschritt, wie der Pyrolyse als Hygienisierungsprozess, geschlossen werden. Eine Weiterverarbeitung der Fäzes durch Pyrolyse bringt nicht nur hygienische Unbedenklichkeit, es kann auch Volumen reduziert werden ohne einen totalen Nährstoffverlust zu erzielen. Diese Argumente sind auch für die Anwendung in der Raumfahrt spannend, wo die Abfall- und Ressourcenbewirtschaftung essentiell für den Erfolg längerer Missionen sind.

Trotz der eindeutigen Relevanz der Thematik wurde bis anhin in diese Richtung wenig geforscht und in der Öffentlichkeit sind Fäzes und der Umgang mit Fäzes tabuisiert. Bei der Organisation des Projektes und der Sammlung der Fäzes wurde das gespaltene Verhältnis zur Thematik veranschaulicht. So gab es nach dem Spendenaufruf an der ZHAW Zürcher Hochschule für Wissenschaften Reaktionen zwischen Ekel, Unglauben über Neugierde bis hin zu starkem Interesse am Projekt. Für das Vorantreiben der Forschung und um Investitionen zu fördern, wäre eine vermehrte Thematisierung in der Öffentlichkeit von seitens Bildungsinstituten oder Forschungsanstalten daher wünschenswert.

Space Base 2 – Pyrolyse und Analyse

Die an der ZHAW Zürcher Hochschule für Wissenschaften, Wädenswil, Schweiz, gesammelten menschlichen Fäzes (ohne Urin und Toilettenpapier) wurden bei 300°C, bei einer Aufenthaltszeit von 20 min pyrolysiert. Anhand der analysierten Eigenschaften der Fäzeskohle konnten die Einsatzmöglichkeiten als Nährstofflieferant für Pflanzen abgewägt werden und das Versuchsdesign erstellt werden. Mittels der Methode der Wasservolumenextraktion wurden die leicht verfügbaren Nährstoffe aus der FK gelöst und konnten analysiert werden. Dabei wurde klar, dass die Kohle nicht als Stickstoffdünger eingesetzt werden kann, jedoch einen relativ hohen Gehalt an Phosphat und Kalium besitzt. Calcium und Magnesium, als weitere wichtige Nährstoffe sind nur in geringen Mengen in der Extraktion zu finden. Solch ein Missverhältnis zwischen den Makronährstoffen könnte bei direkter Anwendung als Düngemittel zu Mangel führen und die Eignung als Nährstofflösung müsste in einem längeren Pflanzversuch ermittelt werden. Weiter auffallend war der hohe Gehalt an

Chlorid, welcher bei einer Anwendung als Düngemittel ebenfalls problematisch sein kann. Für die Eignung der Fäzeskohle als Düngemittel müsste die Kohle auch auf toxische organische Substanzen getestet werden, welche eventuell bei der Pyrolyse entstanden sind (Hammond et al., 2016).

Der ermittelte hohe pH-Gehalt der konzentrierten FK-Extrakte hängt mit dem Aschengehalt zusammen und ist typisch für Pyrokohlen. Diese Eigenschaft kann für eine Anwendung in sauren Böden von Vorteil sein, im erdlosen Pflanzenanbau jedoch sollte der pH-Wert aufgrund der Nährstoffverfügbarkeit eher in leicht sauren Bereich bei 6 liegen. Beim Experiment mit den Microgreens konnte festgestellt werden, dass der pH-Wert der Extrakte mit Verhältnis der FK zum VE 1:20 oder 1:50 nach circa einer Woche stark gesunken ist und bei einem leicht basischen pH-Wert über 7 stagnierte. Diese Erkenntnis könnte für weitere Experimente von Nutzen sein. In diesem Zusammenhang wäre es spannend die Wasserextrakte nach einer Woche nochmals auf die Verfügbarkeit der Nährstoffe zu untersuchen.

Da die Pyrolysebedingungen das Produkt stark beeinflussen, muss man sich der erwünschten Eigenschaften der Pyrokohle in vornherein bewusst sein, damit die Pyrolysebedingungen demnach angepasst werden. Nach den gewonnen Erkenntnissen wäre auch eine Pyrolyse der Fäzes bei 450°C denkbar, um die Ziele zu erreichen. Es ist zwar anzunehmen, dass noch mehr Stickstoff während des Prozesses verloren ginge - in Anbetracht des geringen Gehalts, wäre dies jedoch kein entscheidender Verlust. Die restlichen Nährstoffe wären immer noch vorhanden und könnten extrahiert werden. Die Pyrolysetemperatur hat eine eher untergeordnete Rolle was die Verfügbarkeit des Phosphats angeht und bei 450° wurde ein anteilmässiger Peak des pflanzenverfügbaren Phosphats festgestellt. Auch andere Nährstoffe wie Kalium oder Magnesium wären bei der höheren Pyrolysetemperatur noch verfügbar und könnten extrahiert werden. Bei 450°C wurde ausserdem eine gute Balance zwischen Kohleertrag und Stabilität der Pyrokohlen festgestellt. Die Stabilität der Pyrokohle ist vor allem wichtig, falls die Pyrokohle wie im Experiment 1 als Substratdünger eingesetzt werden will, denn dadurch kann die Lagerungsdichte und das Wasserrückhaltevermögen im Substrat stabil gehalten werden (Kaudal et al., 2016). Durch die erhöhte Stabilität der C-Matrix bei höherer Pyrolysetemperatur und somit verminderten Zersetzung könnte die Pyrokohle nach der Extraktion als Bodenverbesserer oder der C-Sequestrierung dienen. Denn bei der Anwendung der FK als Düngemittel stellt sich auch die Frage was nach der Extraktion bzw. nach dem Einsatz als Substratdünger mit der Kohle passiert. Mit welcher Lösung könnte der Kreislauf am nachhaltigsten geschlossen werden?

Space Base 3 - Pflanzenproduktion

Die Experimente mit Microgreens basierten auf den Erkenntnissen aus Literaturrecherche und der Analyse der FK. Dabei wurde im ersten Experiment die Möglichkeit evaluiert die FK direkt im

Substrat als Düngemittel anzuwenden, im zweiten Experiment die Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung geprüft. Die Resultate der Experimente in Form der Messung des Sprossgewichts der Microgreens konnten dann dank der gewonnen Erkenntnisse bei der Analyse interpretiert und diskutiert werden. Bei beiden Experimenten zeigte sich, dass mit einer zu tiefen Konzentration kein wachstumsfördernder Effekt auf die Pflanzen erzielt werden kann und dass es bei einer zu hohen Konzentration zu einer toxischen Wirkung kommen kann. Bei beiden Experimente gab es jeweils 2 Varianten, bei welchen ein statistisch signifikanter Unterschied des Sprossgewichts zur Negativkontrolle festgestellt werden kann. Dadurch kann gesagt werden, dass die Pflanzen von den Nährstoffen der FK profitieren konnten.

Positive Resultate mit nachgewiesener wachstumsfördernder Wirkung der Fäzeskohle erzielten folgende Varianten:

Experiment 1:	V5	5% FK und 95% Perlit, VE
	V7.75	7.75% FK und 92.25% Perlit, VE
Experiment 2:	V1_20	Wasserextrakt 1:20 mit 25g FK und 500ml VE
	V1_50	Wasserextrakt 1:5 mit 20g FK und 100ml VE, 10fach verdünnt

Keine der Versionen konnte jedoch mit der Positivkontrolle mithalten, was mit dem fehlenden Stickstoff begründet werden kann. Um genauere Aussagen machen zu können, müssten die Pflanzen auf Inhaltsstoffe und eventuelle Mängel analysiert werden. Für ein erfolgreiches Wachstum müssten fehlende Nährstoffe, vor allem Stickstoff, aus einer anderen Nährstoffquelle substituiert werden. Eine Kombination von Pyrokohle und Urin wäre daher eventuell sinnvoll.

Da Kalium leicht löslich ist und daher schnell in grösseren Mengen in der Extraktion vorhanden ist, könnte durch eine längere Auswaschung mehr Calcium und Magnesium aus der FK extrahiert werden und das Missverhältnis ausgeglichen werden. Vielleicht wäre es auch ein Versuch wert, die Nährstoffe aus der FK mithilfe von Mykorrhiza schneller verfügbar zu machen. Ein anderer Ansatz wäre es, die Wasserextrakte nicht direkt als Nährlösung zu nutzen sondern die Nährstoffe zuerst aus der Lösung zu gewinnen und in einem richtigen und stabilen Verhältnis zusammenzusetzen.

Schlusswort

Die Resultate dieser Arbeit liefern einen Anhaltspunkt mit welcher Verdünnung bzw. zu welchen Anteilen die FK am besten eingesetzt werden kann. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können nun geeignete Nährlösungen oder neue Substratmischungen zusammengestellt werden, welche den Bedürfnissen der Pflanzen gerecht werden. Let's close the loop on poop!

6 Literaturverzeichnis

- ACW. (2012a). *Schweizerische Referenzmethode der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1, E1.056.d, Methode H2OSU-Ex, Version 2012.*
- ACW. (2012b). *Schweizerische Referenzmethode der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1, E1.056.d, Methode H2OSU-pH, Version 2012.*
- ACW. (2012c). *Schweizerische Referenzmethode der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1, E1.056.d, Methode H2OSU-Sal, Version 2012.*
- Agilent Technologies. (2006). *User's guide: Agilent 700 Series ICP Optical Emission Spectrometers* (7 No. 2009-2013). Malaysia.
- Allaire, S., Lange, S., Auclair, I., Quinche, M., & Greffard, L. (2015). *Report: Analyses of biochar properties*. Québec, Canada. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2789.4241>
- Anderson, M. S., Ewert, M. K., Keener, J. F., & Wagner, S. A. (2015). Life Support Baseline Values and Assumptions Document. *Nasa/Tp-2015-218570*, (March), 1–220. <https://doi.org/CTSD-ADV-484 A>
- Angst, T. E., & Sohi, S. P. (2013). Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *GCB Bioenergy*, 5(2), 221–226. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12023>
- ART. (2012). *Schweizerische Referenzmethode der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1, E1.056.d, Methode CO2-Ex, Version 2012.*
- ART/ACW. (2012). *Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1, E1.056.d, Methode H2OSU-P, Version 2012.*
- AWEL. (n.d.). Rohstoffe aus Abfällen: Phosphor im Klärschlamm. Retrieved 22 February 2018, from https://awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/abfall_rohstoffe_altlasten/rohstoffe/rohstoffe_aus_abfaellen/naehrstoffe.html
- AWEL. (2004). Wie funktioniert eine ARA? - Information Abwasserreinigung. Retrieved 20 February 2018, from <https://awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/wasser/gewaesserschutz/abwasserreinigung.html>
- AWEL. (2018). Klärschlamm Entsorgung und -verwertung im Kanton Zürich seit dem 1. Juli 2015. Retrieved 20 February 2018, from https://awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/betriebe_anlagen_baustellen/abfallanlagen/kl_aerschlammbehandlung.html
- BAFU. (2017). Schweizer Abwasserreinigung - Eine Erfolgsgeschichte. Retrieved 20 February 2018, [60]

from <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/dossiers/internationaler-tag-des-wassers-2017.html#117261824>

- Basu, P. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Elsevier. <https://doi.org/doi:10.1016/B978--0--12--396488--5.00013--7>
- Benton, J. J. (2005). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. Florida: CRC Press.
- Bleuler, M. (2016). *Understanding biochars from faecal sludge and their potential applications*. ZHAW Zürcher Hochschule für Wissenschaften.
- Boateng, A. A., Garcia-Perez, M., Mašek, O., Brown, R., & Del Campo, B. (2015). Biochar production technology. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (pp. 63–87). London & New York: Routledge.
- Brown, R., Del Campo, B., Boateng, A. A., Garcia-Perez, M., & Mašek, O. (2015). Fundamentals of biochar production. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (pp. 39–61). London & New York: Routledge.
- Camps-Arbestain, M., Amonette, J. E., Singh, B., Wang, T., & Schmidt, H.-P. (2015). A biochar classification system and associated test methods. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. London & New York: Routledge.
- Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Wang, T., Van Zwieten, L., & Novak, J. (2017). Available nutrients in biochar. In B. Singh, M. Camps-Arbestain, & J. Lehmann (Eds.), *Biochar: A guide to analytical methods* (pp. 109–125). Boca Raton: CRC Press.
- Cross, A., Zwart, K., Shackley, S., & Ruyschaert, G. (2016). The role of biochar in agricultural soils. In S. Shackley, G. Ruyschaert, K. Zwart, & B. Glaser (Eds.), *Biochar in european soils and agriculture: Science and practice* (pp. 73–98). London & New York: Routledge.
- De Pascale, S., Munoz, P., Pardossi, A., Ramazzotti, S., & Savvas, D. (2013). Irrigation water quality for greenhouse horticulture. In *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops* (pp. 169–204). Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Eawag. (2018). Aurin - der Dünger aus Urin. Retrieved 22 February 2018, from <http://www.eawag.ch/de/abteilung/eng/projekte/aurin-duenger-aus-urin/>
- EBC. (2012). *European Biochar Certificate - Richtlinien für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle* (Version 7.). Arbaz, Switzerland. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4658.7043>
- Esrey, S. A., Andersson, I., Hillers, A., & Sawyer, R. (2000). *CLOSING THE LOOP Ecological sanitation for food security. Water Resources* (Vol. No. 18). Mexico: UNDP & SIDA.

- Franks, E., & Richardson, J. (2009). *Microgreens. A guide to growing nutrient-packed greens*. Gibbs Smith.
- Ghiselli, L. (2017). Der Pionier unter den Kläranlagen. Retrieved 22 February 2018, from <http://www.tagblatt.ch/ostschweiz/stgallen/stadt/der-pionier-unter-den-kläranlagen;art197,5023765>
- Gianquinto, G., Munoz, P., Pardossi, A., Ramazzotti, S., & Savvas, D. (2013). Soil fertility and plant nutrition. In *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops* (pp. 205–270). Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hammond, J., Schmidt, H.-P., Van Scholl, L., Ruyschaert, G., Nelissen, V., Ibarrola, R., ... Van Laer, T. (2016). The legality of biochar use. In S. Shackley, G. Ruyschaert, K. Zwart, & B. Glaser (Eds.), *Biochar in european soils and agriculture: Science and practice* (pp. 227–252). London & New York: Routledge.
- Ippolito, J. A., Spokas, K. A., Novak, J. M., Lentz, R. D., & Cantrell, K. B. (2015). Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (pp. 139–163). London & New York: Routledge.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *144*(1), 175–187. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2011.08.015>
- Jones, R. (2012). Why Manure matters. In R. Jones (Ed.), *Manure Matters: Historical, Archaeological and Ethnographic Perspectives* (pp. 1–11). Farnham & Burlington: Ashgate Publishing.
- Jönsson, H., Stintzing, A., Vinnerås, B., & Salomon, E. (2010). *Guidelines on use of urine and faeces in crop production*. Uppsala. Retrieved from <http://www.ecosanres.org/publications.htm>
- Kammann, C., Glaser, B., & Schmidt, H.-P. (2016). Combining biochar and organic amendments. In S. Shackley, G. Ruyschaert, K. Zwart, & B. Glaser (Eds.), *Biochar in european soils and agriculture: Science and practice* (pp. 136–164). London & New York: Routledge.
- Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D. B., Downie, A., & Weatherley, A. (2016). An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate. *Biomass and Bioenergy*, *84*(January), 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.012>
- Kettler, R. (2000). *Eine kurze Geschichte des Abfalls*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Konsumentenforum, S. (2016). Auflösung der Hors-sol-Deklaration. Retrieved 25 February 2018, from <http://www.konsum.ch/aufloesung-der-hors-sol-deklaration/>

- Krause, A., & Jacobsen, S. (2011). *Aspekte der Hygienisierung im Kontext der Entwicklung eines neuen Sanitär-Ansatzes*. Berlin.
- Kyriacou, M. C., De Pascale, S., Kyratzis, A., & Roupael, Y. (2017). Microgreens as a Component of Space Life Support Systems: A Cornucopia of Functional Food. *Frontiers in Plant Science*, 8:1587, 1587. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01587>
- Landor. (2016). Produkte: P-Dünger. Retrieved 9 March 2018, from <http://www.landor.ch/produkte/list/p-duenger/>
- Lasseur, C., Brunet, J., De Weever, H., Dixon, M., Dussap, G., & Godia, F. (2010). Melissa: The European project of a closed life support system. In T. Bushart, A. Cogoli, L. Cubano, E. Holton, J. Kiss, W. Landis, ... S. Wyatt (Eds.), *Gravitational and Space Biology* (Vol. 23, 2). New York: American Society for gravitational and space biology.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: an Introduction. In L. Johannes & J. Stephen (Eds.), *Biochar for environmental management* (pp. 1–14). London & New York: Routledge.
- Liu, X., Li, Z., Zhang, Y., Feng, R., & Mahmood, I. B. (2014). Characterization of human manure-derived biochar and energy-balance analysis of slow pyrolysis process. *Waste Management*, 34(9), 1619–1626. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.027>
- Lopez-Capel, E., Zwart, K., Shackley, S., Postma, R., Stenstrom, J., Rasse, D. P., ... Glaser, B. (2016). Biochar properties. In S. Shackley, G. Ruyschaert, K. Zwart, & Glaser Bruno (Eds.), *Biochar in european soils and agriculture: science and practice* (pp. 41–72). London & New York: Routledge.
- Mašek, O., Ronsse, F., & Dickinson, D. (2016). Biochar production and feedstock. In S. Shackley, G. Ruyschaert, K. Zwart, & B. Glaser (Eds.), *Biochar in european soils and agriculture: science and practice* (pp. 17–40). London & New York: Routledge.
- Mathis, A. (2011). *Kressetest*. Wädenswil.
- Nieder, R. (2009). *Skript zu den Geoökologischen Labormethoden: Bodenchemische Analysen*. Braunschweig.
- O'Toole, A., Andersson, D., Gerlach, A., Glaser, B., Kammann, C., Kern, J., ... Stenström, J. (2016). Current and future applications for biochar. In S. Shackley, G. Ruyschaert, K. Zwart, & B. Glaser (Eds.), *Biochar in european soils and agriculture: Science and practice* (pp. 253–280). London & New York: Routledge.
- Oester, P., Peter, W. H., Heckly, C., & Frühhaber, P. (2012). *Das Wichtigste zur Düngung*. Grossaffoltern: Hauert HBG Dünger AG.

- Organic Soil Technology. (n.d.). pH and Organic Substrate Nutrients. Retrieved 22 February 2018, from <https://organicsoiltechnology.com/ph-and-organic-substrate-nutrients.html>
- Pankratius, M. (2010). Biomasse. Retrieved 20 February 2018, from <http://www.nachwachsende-rohstoffe.biz/glossar/biomasse/>
- Perret, J. (2017). Das ungenutzte Potenzial unserer Fäkalien. Retrieved 22 February 2018, from <http://www.forum-csr.net/News/11357/HolyShitHeiligeScheie.html>
- Pyreg GmbH. (2017). *Betriebsanleitung Laborpyrolyseanlage "PYREKA" Version 4.0*. Dörth: Pyreg GmbH.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic: Food production*. Florida: CRC Press.
- Savvas, D., Gianquinto, G., Tuzel, Y., & Gruda, N. (2013). Soilless culture. In *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops*. Rom: Food and Agriculture Organisation of the United Nations.
- Schmidt, H.-P. (2010). Bio-Biokohle oder Nicht-bio-Biokohle. *Journal Für Terroirwein Und Biodiversität*. Retrieved from <http://www.ithaka-journal.net/biokohle-oder-nichtbio>
- Schmidt, H.-P. (2013). Schweiz bewilligt Pflanzenkohle zur Bodenverbesserung. *Journal Für Terroirwein Und Biodiversität*. Retrieved from <http://www.ithaka-journal.net/schweiz-bewilligt-pflanzenkohle-zur-bodenverbesserung>
- Schönborn, A., & Bleuler, M. (2017). *Biochar-based life support loop (SpaceLoop)*. Wädenswil. <https://doi.org/10.21256/zhaw-3480>
- Serio, M. A., Kroo, E., Wójtowicz, M. A., Suuberg, E. M., & Bassilakis, R. (2002). An Improved Pyrolyzer for Solid Waste Resource Recovery in Space, (July), 1–9. <https://doi.org/10.4271/2002-01-2402>
- Silber, A. (2008). Chemical characteristics of soilless media. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (pp. 209–244). London: Elsevier B.V.
- Silber, A., & Bar-Tal, A. (2008). Nutrition of substrate-grown plants. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (pp. 291–339). London: Elsevier B.V.
- Stadtentwässerung Zürich Abteilung des Bauamtes I (Hrsg.). (1992). *Von der Schissgruob zur modernen Stadtentwässerung* (2nd ed.). Zürich: Verlag Neue Zürcher Zeitung.
- Steinig, W. (2016). *Shit and piss. An environmental history of the meaning and management of human excrement in densely populated areas and urban regions, with special focus on agriculture and public health issues*. Uppsala Universität.

- Stünzi, H. (2006). Die P-Bodenextraktionsmethoden mit Wasser und CO₂-Wasser. *AGRARForschung*, 13(7), 284–289.
- Stünzi, H. (2007). Bodenuntersuchungen für K, Mg und Ca im Vergleich. *AGRARForschung*, 14(8), 358–363.
- Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (1998). *Nutrient Solutions for Hydroponic Systems, Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. (T. Asao, Ed.). Rijeka & Shanghai: InTech.
- Wälti, C., & Almeida, J. (2016). Ent-Sorgen ? Abfall in der Schweiz illustriert. *Umwelt-Zustand*, 1615.
- Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., & Bishop, P. (2012). Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and Soil*, 357(1), 173–187. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1131-9>
- Wanner, R. (mündlich). (2017). *No Title*. Wädenswil.
- Ward, B. J., Yacob, T. W., & Montoya, L. D. (2014). Evaluation of solid fuel char briquettes from human waste. *Environmental Science and Technology*, 48(16), 9852–9858. <https://doi.org/10.1021/es500197h>
- Wu, D., Xiao, L., Ba, Y., Wang, H., Zhang, A., Wu, X., ... Fang, K. (2017). The Recovery of Energy, Nitrogen and Phosphorous from Three Agricultural Wastes by Pyrolysis. *Energy Procedia*, 105, 1263–1269. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.445>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2006.12.013>
- Zabel, P., Bamsey, M., Schubert, D., & Tajmar, M. (2016). Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems. *Life Sciences in Space Research*, 10, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2016.06.004>
- ZHAW. (2017). *Ionenchromatographie, Forschungsgruppe Bodenökologie, SOP-UI1204a, Version 13.06.2017*.
- Zwetsloot, M. J., Lehmann, J., & Solomon, D. (2015). Recycling slaughterhouse waste into fertilizer: How do pyrolysis temperature and biomass additions affect phosphorus availability and chemistry? *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(2), 281–288. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6716>

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Der Unterschied zwischen EcoSan und herkömmlicher Toilette (Perret, 2017)	6
Abbildung 2 Überblick über die theoretischen Grundlagen des Kapitel 1	7
Abbildung 3 Behandlungsmöglichkeiten zur Hygienisierung von menschlichen Fäkalien (Krause & Jacobsen, 2011)	12
Abbildung 4 Essentielle Nährstoffe und ihre pflanzenverfügbare Form (Gianquinto et al., 2013) ..	18
Abbildung 5 der pH und die Nährstoffverfügbarkeit in Böden (Organic Soil Technology, n.d.)	19
Abbildung 6 Senf Microgreens auf Vlies im Experiment 2	23
Abbildung 7 Windeleimer zur Sammlung der Fäzes	24
Abbildung 8 Während der Pyrolyse der Fäzes: getrocknete Fäzes im Feeder (links), frische FK zur Abkühlung im Wassereimer (mitte), Einblick in die Brennkammer durch das Zuluftrohr (rechts) .	25
Abbildung 9 pH-Werte (rechts) und EC-Werte in mS/cm (links) in den Wasserextraktionen (WE) der FK in Abhängigkeit der Verdünnung mit Standardabweichung (Anhang C, Tabelle 15 & Tabelle 16)	30
Abbildung 10 Versuchsdesign des Experiment 1 zur Eignung der FK als Substratdünger	33
Abbildung 11 Vorbereitung des Experiment 1 zur Eignung der FK als Substratdünger	34
Abbildung 12 Versuchsdesign des Experiment 2 zur Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung	35
Abbildung 13 Masseverluste durch Trocknung (70-75%) und Pyrolyse von Fäzes (45%) (Anhang B, Tabelle 13)	37
Abbildung 14 Leicht (H ₂ O) verfügbarer Stickstoffgehalt in mg/kg FK in Form von Ammonium (NH ₄ ⁺) und Nitrat (NO ₃ ⁻), analysiert mit Ionenchromatographie (IC), dreifache Wiederholung der Extraktanalysen (1-3) (Anhang C, Tabelle 17)	38
Abbildung 15 Pflanzen verfügbarer Phosphatgehalt in mg/kg FK, analysiert mit Photometer (PM) und Ionenchromatographie (IC), logarithmisch, mit Standardabweichung (Anhang C, Tabelle 18)	39
Abbildung 16 Leicht pflanzen verfügbarer (H ₂ O bzw. CO ₂) Phosphatgehalt in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC) und Photometer (PM) (Anhang C, Tabelle 18)	39
Abbildung 17 Gesamte (HCl) und leicht (H ₂ O) pflanzenverfügbare Nährstoffe (K, Ca, Mg) in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC) und Atomemissionspektrometrie (ICP), mit Standardabweichung (Anhang C, Tabelle 19)	40

Abbildung 18 Leicht (H ₂ O) pflanzenverfügbare Nährstoffe (K, Ca, Mg) in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC) und Atomemissionsspektometrie (ICP), in logarithmischer Darstellung (Anhang C, Tabelle 19).....	41
Abbildung 19 In der HCl-Lösung extrahierte, gesamt pflanzenverfügbare Nährstoffe (K, Ca, Mg) in mg/kg FK, analysiert mit Atomemissionsspektometrie (ICP), mit Standardabweichung (Anhang C, Tabelle 20).....	41
Abbildung 20 Leicht pflanzenverfügbare Nährstoffe (P, Ca, Mg, Cl, Su, Na) im Wasservolumenextrakt (H ₂ O) in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC) (Anhang C, Tabelle 21).....	42
Abbildung 21 Sprossgewichte der Microgreens in g, verschiedene Varianten aus Experiment 1: Eignung der FK als Substratdünger (Anhang D, Tabelle 24).....	43
Abbildung 22 Sprossgewichte der Microgreens in g, verschiedene Varianten aus Experiment 2: Eignung der FK-Extrakte als Nährstofflösung (Anhang D, Tabelle 25).....	44
Abbildung 23 Veränderung der pH-Werte der FK-Wasserextrakt (WE) Nährlösungen während des Experiment 2 (Anhang D, Tabelle 22).....	45
Abbildung 24 Veränderung der EC-Werte der FK-Wasserextrakt (WE) Nährlösungen während des Experiment 2 (Anhang D, Tabelle 23).....	45
Abbildung 25 FK-Ertrag im Vergleich zu anderen Pyrokohlen-Erträgen in % zur TS des Ausgangsmaterials	47
Abbildung 26 CHN-Analyse verschiedener Pyrokohlen im Vergleich, Massenanteile in %.....	48
Abbildung 27 Pflanzenverfügbare Phosphatgehalte verschiedener Pyrokohlen im Vergleich.....	52
Abbildung 28 Pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte (K, Ca, Mg) in mg/kg FK im Vergleich mit Pyrokohle aus Fäkalschlamm	53
Abbildung 30 Information und Anregung für Spendende an der ZHAW Campus Grüental.....	1
Abbildung 29 PYREG-Verfahren schematisch (Pyreg GmbH, 2017)	1
Abbildung 31 R-Skript der Darstellung EC-Werte und pH-Werte der Wasserextrakte, Programm R (Version 3.1.1)	5
Abbildung 32 R-Skript der Darstellung der extrahierten Nährstoffe, Programm R (Version 3.1.1) ...	6
Abbildung 33 R-Skript der Darstellung und statistischer Auswertung des Experiment 1, Programm R (Version 3.1.1)	6

Abbildung 34 R-Skript der Darstellung und statistischer Auswertung des Experiment 2, Programm R
(Version 3.1.1) 7

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Material für Sammlung der Fäzes	24
Tabelle 2 Codes der Kombination verschiedener Extraktionsmethoden und Analysemethoden zur Aufbereitung der Resultate	29
Tabelle 3 Verhältnis FK:VE in den verschiedenen Wasserextrakten, teilweise verdünnt, mit Codes	30
Tabelle 4 Material im Experiment zur Eignung der FK als Substratdünger	32
Tabelle 5 Beschrieb der Versuchsreihe mit Codes im Experiment 1 zur Eignung der FK als Substratdünger	33
Tabelle 6 Material zum Experiment 2 zur Eignung der FK-Extrakte als Nähstofflösung.....	34
Tabelle 7 Beschrieb der Versuchsreihe mit Codes im Experiment 2 zur Eignung der FK-Extrakte als Nähstofflösung.....	35
Tabelle 8 Resultate der CHN-Analyse der FK mit True Spec Analyser mit sd (Anhang C, Tabelle 14)	37
Tabelle 9 ANOVA Auswertung der Varianten des Experiment 1. P-Values des pairwise.t.test mit Programm R (α -Wert = 0.05), statistisch signifikante p-values in rot.....	43
Tabelle 10 ANOVA Auswertung der Varianten des Experiment 2. P-Values des pairwise.t.test mit Programm R, (α -Wert = 0.05), statistisch signifikante p-values in rot.....	44
Tabelle 11 Pyrolysebedingungen der zu vergleichenden Pyrokohlen mit Codes	46
Tabelle 12 Codes, Hintergrundinformationen und Quellenangaben zu den vergleichenden Pyrokohlen.....	51
Tabelle 13 Fäzeskohle-Erträge in g und % der Trockensubstanz TS.....	2
Tabelle 14 Resultate der CHN-Analyse mit Mittelwerten, Standardabweichung und Verhältnissen	2
Tabelle 15 Gemessene pH-Werte mit Methodenbeschrieb, Code, Mittelwert und Standardabweichung	2
Tabelle 16 EC-Werte mit Methodenbeschrieb, Code, Mittelwert und Standardabweichung	3
Tabelle 17 Im Wasservolumenextrakt extrahierte, leicht lösliche Stickstoffgehalte in Form von NH ₄ ⁺ und NO ₃ ⁻ , analysiert mit IC in mg/kg FK, mit Mittelwerten und Standardabweichung	3

Tabelle 18 Analyse des Phosphats in der FK in mg/kg, verschiedene Methoden, mit Mittelwert und Standardabweichung	3
Tabelle 19 Im Wasservolumenextrakt extrahierte Nährstoffe (K, Ca, Mg), analysiert mit IC und ICP in mg/kg FK, mit Mittelwerten und Standardabweichung	3
Tabelle 20 In der HCl-Lösung extrahierte Nährstoffe (K, Ca, Mg), analysiert mit ICP in mg/kg FK, mit Mittelwerten und Standardabweichung	4
Tabelle 21 Im Wasservolumenextrakt extrahierte Nährstoffe, analysiert mit IC in mg/kg FK, mit Mittelwerten und Standardabweichung	4
Tabelle 22 gemessene pH-Werte im Verlauf des Pflanzenversuchs	4
Tabelle 23 gemessene EC-Werte in mS/cm im Verlauf des Pflanzenversuchs.....	4
Tabelle 24 Auswertung des Frischmassegewichts in g, Versuch des Substratdüngers	5
Tabelle 25 Auswertung des Frischmassegewichts in g, Versuch Nährstofflösung	5

Anhang

A: Organisation und Pyrolyse der Fäzes

Shit happens

Let's do something about it.....

What?

Within my Bachelor thesis, I will extract nutrients out of biochar made from human faeces. The goal is to recycle the nutrients while making them available for plants. Thanks to the pyrolysis – a high temperature sterilisation process – the usage of this organic material can be done without endangering human health.

Why?

Our actual sanitation technique ignores important environmental, social and economic issues. Ecological sanitation takes an approach in closing loops – namely closing the loop on poop. Human faeces is one of the biggest nutrient flows on the planet but is still tabooed. Let us change and transform this waste into a high-quality product

How?

1. Grab a pair of gloves and a small bucket, put a biodegradable bag in the bucket
2. Do your job, please try to hit the target
3. Take the bag out of the bucket and close it properly
4. Put the filled bag in the disposal bucket and close it
5. Get rid of the gloves and put them in the normal waste container
6. **Wash your hands!!!**

PLEASE NO PAPER OR PEE –POOP ONLY – THANK YOU!!

Bachelorthesis HS 2017, Sarah Sommer, sommesa1@students.zhaw.ch

Abbildung 30 Information und Anregung für Spendende an der ZHAW Campus Grüental

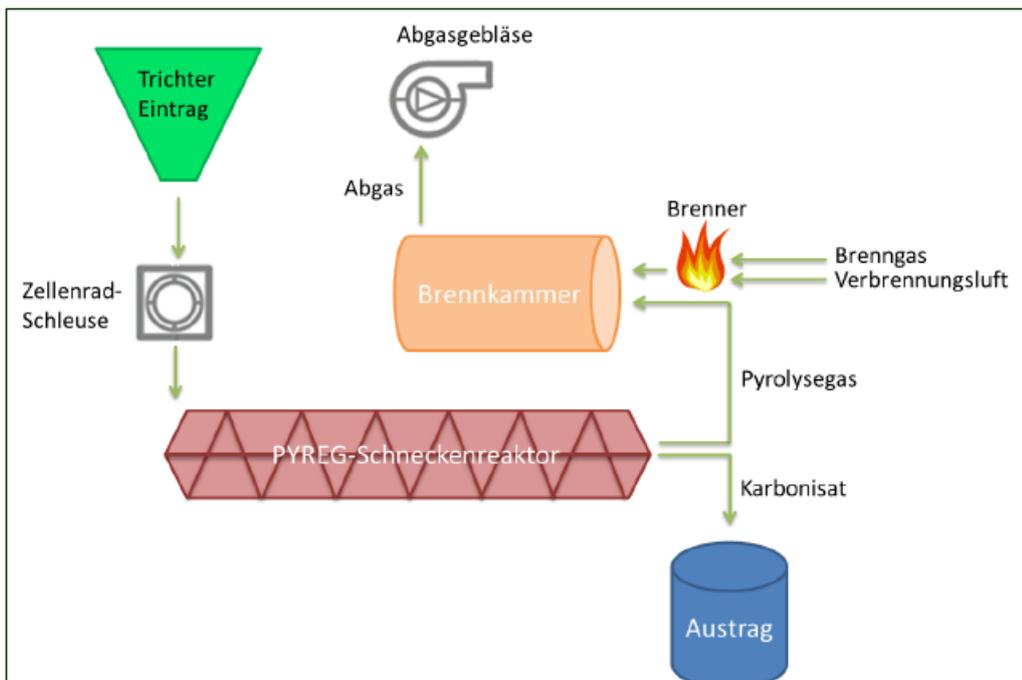


Abbildung 29 PYREG-Verfahren schematisch (Pyreg GmbH, 2017)

B: Resultate der Pyrolyse

Tabelle 13 Fäzeskohle-Erträge in g und % der Trockensubstanz TS

Durchgang	TS Fäzes in g	Ertrag FK in g	Ertrag FK in %
14.11.2017	1003.2	550	54.9
01.12.2017	1070.3	588.2	54.8

C: Resultate der Analyse der Fäzeskohle

Tabelle 14 Resultate der CHN-Analyse mit Mittelwerten, Standardabweichung und Verhältnissen

Name	Einwaage [g]	Ctot [%]	H [%]	N [%]
Kohle Sarah	0.1033	54.7	5.52	4.939
Kohle Sarah	0.102	54.0	5.49	4.948
Kohle Sarah	0.1077	54.2	5.45	4.954
Standardabweichung	0.0024	0.29	0.03	0.01
Mittelwert		54.30	5.49	4.95
Molmasse		12.01	1	14
Verhältnis		4.52	5.49	0.35
C/N		12.80		
H/C			1.21	

Tabelle 15 Gemessene pH-Werte mit Methodenbeschreibung, Code, Mittelwert und Standardabweichung

Beschreibung	Code	Kohle in g	Deionat in ml	1	2	3	Mittelwert	sd
DIN ISO 10390- CaCl ₂				8.99	9.15		9.07	0.08
in Volumenextraktion im Wasser 1:1.5		55	200	10.44	10.45	10.5	10.46	0.03
in Wasserextraktion 1:5	WE_1:5	5	25	10.45	10.45	10.45	10.45	0.00
in Wasserextraktion 1:10	WE_1:10	2.5	25	10.45	10.45	10.45	10.45	0.00
in Wasserextraktion 1:20	WE_1:20	1.25	25	10.44	10.44	10.45	10.44	0.00
in Wasserextraktion 1:5, 10fach verdünnt	WE_1:50			9.76	9.76	9.73	9.75	0.01
in Wasserextraktion 1:10, 10fach verdünnt	WE_1:100			9.22	9.16	9.35	9.24	0.08
in Wasserextraktion 1:20, 10fach verdünnt	WE_1:200			8.42	8.25	8.39	8.35	0.07
in Wasserextraktion 1:10, 100fach verdünnt	WE_1:1000			7.07	6.87	6.82	6.92	0.11

Tabelle 16 EC-Werte mit Methodenbeschreibung, Code, Mittelwert und Standardabweichung

Beschreibung	Code			Messung in mS/cm			Mittelwert	sd
		Kohle in g	Deionat in ml	1	2	3		
DIN ISO 11265 - 1:10		2	20	1.962	2.049		2.006	0.044
in Volumenextraktion im Wasser 1:1.5		55	200	4.590	4.850	4.630	4.690	0.114
in Wasserextraktion 1:5	WE_1:5	5	25	5.770	5.450	5.300	5.507	0.196
in Wasserextraktion 1:10	WE_1:10	2.5	25	2.800	2.770	2.970	2.847	0.088
in Wasserextraktion 1:20	WE_1:20	1.25	25	1.573	1.511	1.685	1.590	0.072
in Wasserextraktion 1:5, 10fach verdünnt	WE_1:50			0.662	0.626	0.603	0.630	0.024
in Wasserextraktion 1:10, 10fach verdünnt	WE_1:100			0.309	0.306	0.333	0.316	0.012
in Wasserextraktion 1:20, 10fach verdünnt	WE_1:200			0.171	0.167	0.181	0.173	0.006
in Wasserextraktion 1:10, 100fach verdünnt	WE_1:1000			0.044	0.043	0.044	0.044	0.001

Tabelle 17 Im Wasservolumenextrakt extrahierte, leicht lösliche Stickstoffgehalte in Form von NH₄⁺ und NO₃⁻, analysiert mit IC in mg/kg FK, mit Mittelwerten und Standardabweichung

Code	H2O_IC_NH4 ⁺	H2O_IC_NO3 ⁻
W1	7.38	3.32
W2	7.40	4.35
W3	7.37	2.81
Mittelwert	7.38	3.49
sd	0.01	0.64

Tabelle 18 Analyse des Phosphats in der FK in mg/kg, verschiedene Methoden, mit Mittelwert und Standardabweichung

Code	H2O_PM	CO2_PM	AS_PM	H2O_IC
W1	348.5	594.4	6616.3	198.70
W2	288.0	612.7	6762.5	211.67
W3	291.0	588.3	5495.7	191.56
Mittelwert	309.2	598.5	6291.5	200.6
sd	27.8160865	10.3512373	565.854694	8.32396008

Tabelle 19 Im Wasservolumenextrakt extrahierte Nährstoffe (K, Ca, Mg), analysiert mit IC und ICP in mg/kg FK, mit Mittelwerten und Standardabweichung

Code	H2O_IC_K	H2O_ICP_K	H2O_IC_Ca	H2O_ICP_Ca	H2O_IC_Mg	H2O_ICP_Mg
W1	1161.88	7250.11	7.64	24.05	5.89	21.13
W2	1234.29	6612.84	7.52	26.42	6.32	26.70
W3	1197.26	5858.87	5.96	27.04	9.02	28.80
Mittelwert	1197.81	6573.94	7.04	25.83	7.08	25.54
sd	29.5661787	568.63628	0.76247755	1.28887361	1.38361441	3.23760186

Tabelle 20 In der HCl-Lösung extrahierte Nährstoffe (K, Ca, Mg), analysiert mit ICP in mg/kg FK, mit Mittelwerten und Standardabweichung

Code	HCL_ICP_K	HCL_ICP_Ca	HCL_ICP_Mg
W1	27094.13	23073.65	9995.71
W2	28777.07	24762.58	10643.10
W3	29871.71	25622.45	10962.46
Mittelwert	28580.97	24486.22	10533.76
sd	1142.38781	1058.73471	402.176999

Tabelle 21 Im Wasservolumenextrakt extrahierte Nährstoffe, analysiert mit IC in mg/kg FK, mit Mittelwerten und Standardabweichung

Code	H2O_IC_K	H2O_IC_P	H2O_IC_Ca	H2O_IC_Mg	H2O_IC_Cl	H2O_IC_Su	H2O_IC_Na
W1	1161.88	198.7	7.64	5.89	244.73	131.615458	51.2231548
W2	1234.29	211.67	7.52	6.32	253.90	133.66616	53.5719247
W3	1197.26	191.56	5.96	9.02	232.08	124.17636	55.3680174
Mittelwert	1197.81	200.60	7.04	7.08	243.57	129.82	53.39
sd	29.57	8.32	0.76	1.38	8.94	4.08	1.70

D: Resultate der Pflanzenversuche

Tabelle 22 gemessene pH-Werte im Verlauf des Pflanzenversuchs

Codes	17.01.2018	19.01.2018	21.01.2018	23.01.2018	25.01.2018	27.01.2018	29.01.2018
WE_1:20	10.1	10.34	9.97	9.52	7.85	7.48	7.38
WE_1:50	9.96	9.54	7.78	7.37	7.16	7.08	6.97
WE_1:1000	6.96	6.5	6.46	6.54	6.58	6.68	6.68
K0		6.17	6.21	6.5	6.37	6.51	6.54
K1		6.93	7	7.18	7.06	6.71	6.47

Tabelle 23 gemessene EC-Werte in mS/cm im Verlauf des Pflanzenversuchs

	17.01.2018	19.01.2018	21.01.2018	23.01.2018	25.01.2018	27.01.2018	29.01.2018
WE_1:20	1790	1773	1492	1079	1494	1498	1503
WE_1:50	623	617	523	534	536	535	534
WE_1:1000	52	51.01	44.6	48.1	48.4	50	51.1
K0		14.09	12.18	20.77	16.37	17.91	18.2
K1		2190	1837	1883	1878	1860	1850

Tabelle 24 Auswertung des Frischmassegewichts in g, Versuch des Substratdüngers

Auswertung Frischmassegewicht in g					
	W1	W2	W3	Mittelwert	sd
K0	1.5733	2.1951	1.632	1.8001	0.2803
K1	10.631	13.482	8.719	10.9440	1.9570
V2.5	2.5857	2.1863	2.3927	2.3882	0.1631
V5	3.2105	3.7165	3.453	3.4600	0.2066
V7.75	3.2975	3.5257	3.791	3.5381	0.2017
V12.5	2.0806	2.7174	3.6656	2.8212	0.6512
V25	2.2319	2.8477	1.8938	2.3245	0.3949
V50	0.5467	0.4295	0.9361	0.6374	0.2165

Tabelle 25 Auswertung des Frischmassegewichts in g, Versuch Nährstofflösung

Auswertung Frischmassegewicht in g											
Wiederholung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mittelwert	sd
V1:20	0.7427	1.6064	1.5154	1.6754	1.3323	1.4283	1.3418	1.6336	1.3784	1.4060	0.2640
V1:50	1.452	1.378	1.4781	1.4992	1.3331	1.2749	1.2947	1.1972	1.5078	1.3794	0.1050
V1:1000	1.2608	1.2412	1.1519	1.256	0.9021	1.0664	1.2083	1.088	1.0567	1.1368	0.1129
K1	2.3321	2.2382	2.4881	NA	2.4022	2.4321	2.5867	2.3882	2.136	2.3755	0.1320
K0	0.8355	0.9779	1.439	1.0173	1.2328	1.1135	1.0128	1.1526	1.1546	1.1040	0.1625

E: R-Skripte

```
###R-Skript Darstellung EC-Werte und pH-Werte der Wasserextrakte

EC_Werte = read.delim("FK_EC_Vergleich.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
EC_Werte
str(EC_Werte)
colMeans(EC_Werte, na.rm = TRUE, dims = 1)
boxplot(EC_Werte, main = "EC-Werte der verschiedenen FK-Wasserextrakte", xlab="Codes für Wasserextrakte", ylab="EC-Wert WE [mS/cm]")
grid()

pH_Werte = read.delim("FK_pH_Vergleich.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
pH_Werte
str(pH_Werte)
colMeans(pH_Werte, na.rm = TRUE, dims = 1)
boxplot(pH_Werte, main = "pH-Werte der verschiedenen FK-Wasserextrakte", xlab="Codes für Wasserextrakte", ylab="pH-Wert WE")
grid()
```

Abbildung 31 R-Skript der Darstellung EC-Werte und pH-Werte der Wasserextrakte, Programm R (Version 3.1.1)

```

####R-Skript Extrahierte Nährstoffe

#Darstellung Phosphatgehalt FK
P_mg = read.delim("FK_Phosphat_Vergleich.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
P_mg
str(P_mg)
colMeans(P_mg, na.rm = TRUE, dims = 1)
colors= c(rep("brown3",4))
boxplot(log(P_mg), main = "Phosphatgehalt der Fäzeskohle - verschiedene Methoden in logarithmischer Darstellung", xlab= "Methodencodes",
ylab="Phosphatgehalt FK log[mg/kg]",ylim=c(5,9), col=colors)
grid()

#Darstellung Kalium, Calcium, Magnesium FK, alle Methoden
KCaMg = read.delim("FK_KCaMg_Vergleich.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
KCaMg
str(KCaMg)
colMeans(KCaMg, na.rm = TRUE, dims = 1)
colors = c(rep("deepskyblue3", 3),rep("gold", 3), rep("forestgreen", 3))
boxplot((KCaMg), main = "Nährstoffgehalte (K, Ca, Mg) der Fäzeskohle - verschiedene Methoden",xlab="Methodencodes", ylab="Nährstoffgehalt FK
[mg/kg]", col=colors)
grid()

#Darstellung gesamte pflanzenverfügbare Gehalte Kalium, Calcium, Magnesium der FK
KCaMg_HCL = read.delim("FK_KCaMg_Vergleich_HCL.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
KCaMg_HCL
str(KCaMg_HCL)
colMeans(KCaMg_HCL, na.rm = TRUE, dims = 1)
boxplot((KCaMg_HCL), main = "Pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte (K, Ca, Mg) der Fäzeskohle",xlab="Methodencodes", ylab="Nährstoffgehalt FK
[mg/kg]", col=colors)
grid()

```

Abbildung 32 R-Skript der Darstellung der extrahierten Nährstoffe, Programm R (Version 3.1.1)

```

####R-Skript, Darstellung Experiment 1
####Statistische Auswertung

#Einlesen und Einsehen der Daten
Expl= read.delim("Versuch_Weck_alt.csv",sep=";",dec=".",header=TRUE)
Expl
str(Expl)

#Mittelwerte ermitteln
colMeans(Expl, na.rm = TRUE, dims = 1)

#Boxplot erstellen
boxplot((Expl), main = "Sprossgewicht der Microgreens im Experiment 1",xlab="Variantencodes", ylab="Sprossgewicht [g]")
grid()

#sind Daten normalverteilt?
#alpha = 0.05
lapply(Expl, shapiro.test)

#Neuanordnung im Excel für AOV und neu einlesen
Sprossgewicht_Expl = read.delim("Versuch_Weck.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
Sprossgewicht_Expl
str(Sprossgewicht_Expl)

#Normalverteilung prüfen
#Homoskedazität prüfen
#alpha = 0.05
shapiro.test(rstandard(aov(Sprossgewicht_Expl$Frischmasse~Sprossgewicht_Expl$Variante)))
bartlett.test(Frischmasse~Variante, Sprossgewicht_Expl)

#K1 ignorieren, fehlende Homoskedazität
Sprossgewicht__Expl_def = read.delim("Versuch_Weck_ohneK1.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
Sprossgewicht__Expl_def
str(Sprossgewicht__Expl_def)

#Normalverteilung prüfen
#Homoskedazität prüfen
#alpha = 0.05
shapiro.test(rstandard(aov(Sprossgewicht__Expl_def$Frischmasse~Sprossgewicht__Expl_def$Variante)))
bartlett.test(Frischmasse~Variante, Sprossgewicht__Expl_def)

#Varianzanalyse Einfaktoriell
summary(aov(Sprossgewicht__Expl_def$Frischmasse~Sprossgewicht__Expl_def$Variante))

pairwise.t.test(Sprossgewicht__Expl_def$Frischmasse,Sprossgewicht__Expl_def$Variante, p.adjust.method="holm")

#Export Daten
table_Expl <- pairwise.t.test(Sprossgewicht__Expl_def$Frischmasse,Sprossgewicht__Expl_def$Variante, p.adjust.method="holm")
table_Expl$p.value
write.table(table_Expl[["p.value"]], file="Output_Expl.csv", sep=",")

```

Abbildung 33 R-Skript der Darstellung und statistischer Auswertung des Experiment 1, Programm R (Version 3.1.1)

```

####R-Skript, Darstellung Experiment 2
####Statistische Auswertung

#Einlesen und Einsehen der Daten
Exp2 = read.delim("Versuch_Petrischalen.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
Exp2
str(Exp2)

#Mittelwerte ermitteln
colMeans(Exp2, na.rm = TRUE, dims = 1)

#Boxplot erstellen
boxplot(Exp2)
boxplot(Exp2, main = "Sprossgewicht der Microgreens im Experiment 2",xlab="Variantencodes", ylab="Sprossgewicht [g]")
grid()

#Daten neu einlesen ohne Ausreisser V20
Exp2_NA = read.delim("Versuch_Petrischalen_ohneAusreisser.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
Exp2_NA
boxplot(Exp2_NA)

#Normalverteilung prüfen
#alpha = 0.05
lapply(Exp2_NA, shapiro.test)
NM_Exp2 <- lapply(Exp2_NA, shapiro.test)

#Neuanordnung im Excel für AOV und neu einlesen
Sprossgewicht_Exp2 = read.delim("Versuch_Petrischalen_ohneAusreisser_neu.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
Sprossgewicht_Exp2
str(Sprossgewicht_Exp2)

#Normalverteilung prüfen
#Homoskedazität prüfen
#alpha = 0.05

shapiro.test(rstandard(aov(Sprossgewicht_Exp2$Frischmasse~Sprossgewicht_Exp2$Verduennung)))
bartlett.test(Frischmasse~Verduennung, Sprossgewicht_Exp2)

#Varianzanalyse Einfaktoriell
summary(aov(Sprossgewicht_Exp2$Frischmasse~Sprossgewicht$Verduennung))
pairwise.t.test(Sprossgewicht_Exp2$Frischmasse,Sprossgewicht_Exp2$Verduennung, p.adjust.method="holm")

#Export der Daten
table_Exp2 <- pairwise.t.test(Sprossgewicht_Exp2$Frischmasse,Sprossgewicht_Exp2$Verduennung, p.adjust.method="holm")
table_Exp2$p.value
write.table(table_Exp2[["p.value"]], file="Output_Exp2.csv", sep=",")

```

Abbildung 34 R-Skript der Darstellung und statistischer Auswertung des Experiment 2, Programm R (Version 3.1.1)

F: Plagiatserklärung



Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmaßnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Zürich, 27.3.18

Unterschrift:



Das Original dieses Formulars ist bei der ZHAW-Version aller abgegebenen Bachelorarbeiten im Anhang mit Original-Unterschriften und -Datum (keine Kopie) einzufügen.

Closing the loop on poop

Sarah Sommer, BA17/18
ZHAW LFSM

Einleitung

Längere Weltraumfahrten wie Marsmissionen oder Aufenthalte in einer Mondbasis stellen neue Herausforderungen. Das Schliessen der Wasser- und Nährstoffkreisläufe wird essentiell für den Erfolg bemannter Raumfahrt sein. In Life Support Systemen sind die menschlichen Fäkalien die mit Abstand grösste dauernd verfügbare Quelle von Nährstoffen. Eine möglichst vollständige Rückgewinnung der Nährstoffe für die Nahrungsmittelproduktion liegt daher auf der Hand. Aus menschlichen Abfällen sollen Wertstoffe entstehen. (Lasseur et al., 2010).

Die ZHAW Wädenswil hat diese Idee aufgenommen und ein innovatives, ökotechnologisches Konzept für Life Support Systeme, das SpaceLoop, mit integrierter Pyrokohle-Produktion erstellt. Der Fokus dabei liegt auf dem Handling der menschlichen Fäkalien. Mit der Pyrolyse, einer thermo-chemischen Zersetzung, der menschlichen Fäzes, soll einerseits der Kohlenstoffkreislauf ausbalanciert werden, andererseits die Pathogene beseitigt und die Nährstoffe zur Wiederverwertung verfügbar gemacht werden. (Schönborn & Bleuler, 2017) Die Projekte und Forschungen im Weltraum zu den geschlossenen Life Support Systemen verfolgen den gleichen Ansatz wie die Ecological Sanitation (EcoSan) auf der Erde. Das Ziel dabei: Kreisläufe schliessen.

Zielsetzungen

Diese Arbeit soll im Rahmen des SpaceLoop Projekts von Schönborn und Bleuler (2017) die Gewinnung von Nährstoffen aus der Kohle menschlicher Fäzes und deren Wiederverwendung in der Pflanzenproduktion als Düngemittel näher untersuchen. Dabei soll das Prinzip eines geschlossenen Nährstoffkreislaufes unter kontrollierten Bedingungen angewandt werden.

Folgende Fragestellungen werden in dieser Arbeit untersucht:

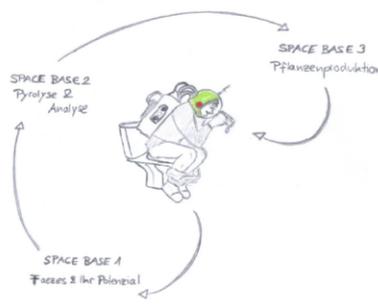
- Welche Charakteristika hat die Fäzeskohle (FK) und wie lassen sich diese mit den Ansprüchen der Pflanzen in der Pflanzenproduktion vereinbaren?
- Ist Pyrolysekohle aus menschlichen Fäkalien geeignet, um Pflanzen mit den benötigten Nährstoffen zu versorgen?

Space Base 1: Fäzes und ihr Potenzial

Die Fäzes eignen sich dank des hohen Anteils an organischer Materie zur Strukturverbesserung eines Bodens und das Wasserhaltevermögen kann gesteigert werden. Reich an Kalium und Phosphor eignet sich der Fäzes auch als langfristiger Nährstofflieferant und zur Förderung von Mikroorganismen. Von der gesamten Menge an Nährstoffen findet sich in den Fäzes, je nach Ernährung, ungefähr 12-30% N und 36-75% P (Jönsson et al., 2010). Eine Schliessung des Kreislaufs und die Wiederverwendung der Fäzes in der Landwirtschaft ist ein Ziel der EcoSan. Die Produktion von Kohle aus menschlichen Fäkalien wäre einerseits eine nachhaltige Lösung zur Entsorgung von Abfallstoffen, da kein sauberes Wasser verschmutzt und wieder aufgereinigt werden müsste, andererseits könnte das Pyrolyseprodukt in hygienischer Form zur Bodenverbesserung oder als Nährstofflieferant verwendet werden, was auch für die Raumfahrt interessant sein könnte (Schönborn & Bleuler, 2017).

Methode

-Sammlung der Fäzes von freiwilligen SpenderInnen am Campus Grütental, ZHAW Wädenswil. Trocknung bei 105°C im Wärmeofen und Lagerung im Gefrierschrank bei -20°C bis zur Pyrolyse.



Space Base 2: Pyrolyse & Analyse

Vor der Pyrolyse wurden die Fäzes im Wärmeschrank bei 105°C ca. 48 h getrocknet und von Hand zerkleinert. Dies resultierte in einem Masseverlust von 70-75%.

Die Pyrolyse ist eine thermochemische Umwandlung von Biomasse in einer inerten Atmosphäre, also ohne Oxidationsmittel. In der Laborpyrolyseanlage PYREKA 4.0 an der ZHAW Wädenswil am Campus Grütental wurden die Fäzes bei einer durchschnittlichen Pyrolysetemperatur von 300°C und einer Verweilzeit von rund 20 Minuten pyrolysiert. Der Fäzeskohleertrag der TS betrug ~55%.



Abb. 1 Während der Pyrolyse der Fäzes: getrocknete Fäzes im Fächer (links), frische FK zur Abkühlung in Wasseremmer (mitte), Erstick in der Brennkammer durch das Zulufröhrchen (rechts)

Analysemethoden

- Ermittlung des pH- und EC-Wertes in verschiedenen Wasserextrakten mit Sonden am HQ 40d Multi von Hach Lange
- CHN Analyse am TruSpec CHN Macro Analyser von Leco
- Ermittlung der leicht pflanzenverfügbaren Nährstofffraktion (N, P, K, Ca, Mg, Na, Su, Cl) in der Volumenextraktion mit Wasser (1:1.5) nach H2OSU-Ex (ACW, 2012) mittels Ionenchromatographie nach SOP-UI1204a (ZHAW, 2017) durch Rahel Wanner, Forschungsgruppe Bodenökologie, ZHAW.

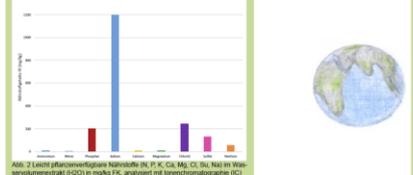


Abb. 2 Leicht pflanzenverfügbare Nährstoffe in FK: Ca, Mg, Na, Su, Cl, Na in Wasserextrakt (K0) in mg/kg FK, analysiert mit Ionenchromatographie (IC)

Mittels der Methode der Wasservolumenextraktion wurden die leicht verfügbaren Nährstoffe aus der FK gelöst und konnten analysiert werden. Dabei wurde klar, dass die Kohle nicht als Stickstoffdünger eingesetzt werden kann, jedoch einen relativ hohen Gehalt an Phosphat und Kalium besitzt. Calcium und Magnesium, als weitere wichtige Nährstoffe sind nur in geringen Mengen in der Extraktion zu finden. Solch ein Missverhältnis zwischen den Makronährstoffen könnte bei direkter Anwendung als Düngemittel zu Mangel führen und die Eignung als Nährstofflösung müsste in einem längeren Pflanzversuch ermittelt werden. Weiter auffallend war der hohe Gehalt an Chlorid, welcher bei einer Anwendung als Düngemittel ebenfalls problematisch sein kann.

Der ermittelte hohe pH-Gehalt von 9-10 hängt mit dem Aschengehalt zusammen und ist typisch für Pyrokohlen. Beim Experiment mit den Microgreens konnte festgestellt werden, dass der pH-Wert der Extrakte mit Verhältnis der FK zum VE 1:20 oder 1:50 nach circa einer Woche stark gesunken ist und bei einem leicht basischen pH-Wert über 7 stagnierte. Diese Erkenntnis könnte für weitere Experimente von Nutzen sein.

Space Base 3: Pflanzenproduktion Microgreens

Um die Eignung der Fäzeskohle als Düngemittel zu evaluieren, werden zwei verschiedene Experimente durchgeführt. Im Experiment 1 will herausgefunden werden, ob und in welchem Verhältnis die Fäzeskohle einem Substrat beigegeben werden kann, um die Pflanzen mit Nährstoffen zu versorgen, ohne eine toxische Wirkung zu erzielen. Im Experiment 2 wird untersucht, ob sich die Wasserextrakte der Fäzeskohle bzw. deren Verdünnung direkt als Nährlösung für den Anbau von Pflanzen eignen. Ob es signifikante Unterschiede bei der Messung der Sprossgewichte gibt, wurde statistisch ausgewertet. Als Versuchspflanzen wurden Microgreens Sempans ausgewählt. Microgreens eignen sich einerseits aufgrund ihrer bescheidenen Ansprüche und der kurzen Wachstumsdauer.

Methode Experiment 1

- Versuchsreihe in Weckgläsern, 3fache Wiederholung
- 0.5 g Samen pro Glas
- Anteil FK des Perlitsubstrates von 2.5% bis 50% (V2.5-V50)
- Positivkontrolle (K1) mit Hydroponic-Nährlösung, Negativkontrolle (K0) nur mit Perlit und vollentsalztem Wasser (VE)
- Versuchsdauer 15 Tage im Klimaschrank (T = 20°C, LF 80%, Tageslicht 12h)

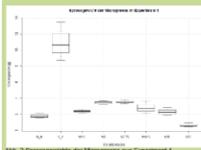


Abb. 2 Sprossgewichte der Microgreens aus Experiment 1

Statistische Signifikanz der Unterschiede im Sprossgewicht: (α-Wert = 0.005)

K1 ausgesprochen
K0 - V5 / V7.75

Methode Experiment 2

- Versuchsreihe in Petrischalen mit Vlies, 9fache Wiederholung
- 0.2 g Samen pro Petrischale
- Wasserextrakte als Nährlösung (VE : FK= 1_1000, 1_50, 1_20)
- Positivkontrolle (K1) mit Nährlösung, Negativkontrolle (K0) VE
- Versuchsdauer 17 Tage im Klimaschrank (T = 20°C, LF 80%, Tageslicht 12h)
- Messung pH- und EC-Werte in den Wasserextrakten

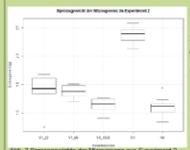


Abb. 2 Sprossgewichte der Microgreens aus Experiment 2

Statistische Signifikanz der Unterschiede im Sprossgewicht: (α-Wert = 0.005)

K1 - K0 / V1_20 / V1_50 / V1_1000
K0 - K1 / V1_20 / V1_50

Bei beiden Experimenten zeigte sich, dass mit einer zu tiefen Konzentration kein wachstumsfördernder Effekt auf die Pflanzen erzielt werden kann und dass es bei einer zu hohen Konzentration zu einer toxischen Wirkung kommen kann. Keine der Versionen konnte jedoch mit der Positivkontrolle mithalten, was mit dem fehlenden Stickstoff begründet werden kann.

Positive Resultate mit nachgewiesener wachstumsfördernder Wirkung der Fäzeskohle erzielten folgende Varianten:

Experiment 1:

- V5 5% FK und 95% Perlit, VE
- V7.75 7.75% FK und 92.25% Perlit, VE

Experiment 2:

- V1_20 Wasserextrakt 1:20 mit 25g FK und 500ml VE
- V1_50 Wasserextrakt 1:5 mit 20g FK und 100ml VE, 10fach verdünnt

Fazit

Aktuelle sanitäre Systeme führen auf der Erde einerseits zu Verunreinigung von Trinkwasser, Verlust von Nährstoffen oder hygienischen Problemen; andererseits ignorieren sie Diskussionen der Bodendegradation und der Ressourcenknappheit. (Esrey et al., 2000). Das SpaceLoop-Konzept von Schönborn und Bleuler (2017) nach dem Prinzip eines Life Support Systems könnte auch auf der Erde angewendet werden und neue Erkenntnisse in diesem Bereich könnten die Entwicklungen der EcoSan positiv beeinflussen und Innovationen zur Schliessung der Kreisläufe fördern. Trotz der eindeutigen Relevanz der Thematik wurde bis anhin in diese Richtung wenig geforscht und in der Öffentlichkeit sind Fäzes und der Umgang damit tabuisiert. Bei der Organisation des Projektes und der Sammlung der Fäzes wurde das gespaltenen Verhältnis zur Thematik veranschaulicht. So gab es nach dem Spendenaufruf an der ZHAW Reaktionen zwischen Ekel, Unglauben über Neugierde bis hin zu starkem Interesse am Projekt. Für das Vorantreiben der Forschung und um Investitionen zu fördern, wäre eine vermehrte Thematisierung in der Öffentlichkeit von seitens Bildungsinstituten oder Forschungsanstalten daher wünschenswert und notwendig. Die Resultate dieser Arbeit liefern einen Anhaltspunkt mit welcher Verdünnung bzw. zu welchen Anteilen in einem Substrat die FK wirkungsvoll eingesetzt werden kann. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können nun geeignete Nährlösungen oder neue Substratmischungen zusammengestellt werden, welche den Bedürfnissen der Pflanzen gerecht werden. Let's close the loop on poop!

Quellenverzeichnis:

- ACW (2012) Schweizerische Referenzmethode der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1, E1 056 d, Methode H2OSU-Ex, Version 2012.
- Esrey, S. A., Anderson, I., Hillers, A., & Sawyer, R. (2000) CLOSING THE LOOP: Ecological sanitation for food security. Water Resources (Vol. 18). Mexico: UNDP & SIDA.
- Jönsson, H., Stenitz, A., Vinnerås, B., & Salomon, E. (2010). Guidelines on use of urine and faeces in crop production. Uppsala. Abgerufen von <http://www.ecosanres.org/publications.htm>
- Lasseur, C., Binnet, J., Die Weever, J., Dixon, M., Dunsap, G., & Goda, F. (2010) Melissa: The European project of a closed life support system. In T. Bushart, A. Cogli, L. Cubano, E. Hutton, J. Kiss, W. Landis, S. Wyatt (Eds.), *Gravitational and Space Biology* (Vol. 2). New York: American Society for gravitational and space biology.
- Schönborn, A., & Bleuler, M. (2017). Biochar-based life support loop (SpaceLoop). Wädenswil. <https://doi.org/10.21256/zhaw-3480>
- ZHAW (2017). Ionenchromatographie, Forschungsgruppe Bodenökologie, SOP-UI1204a, Version 13.06.2017.