

Institut für Polymertechnologien e. V.

**Verhinderung des Algenbefalls von Saugsystemen aus Ton
zur Bewässerung von Nutzpflanzen in tropischen Gebieten
der Sahel-Zone am Beispiel Ghanas**

Abschlussbericht AZ: 33672/01 – 23

gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr. Harald Hansmann

Dipl.-Ing. Jan Siering

Wismar, den 9. Juni 2018

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	AZ 33672/01	Referat	23	Fördersumme	77.328,00 €
Antragstitel		Verhinderung des Algenbefalls von Saugsystemen aus Ton zur Bewässerung von Nutzpflanzen in tropischen Gebieten der Sahel-Zone am Beispiel Ghanas			
Stichworte		Saugbewässerung, Algenbefall, Tonkörper, Sahel-Zone			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
8 Monate	11.08.2017	10.04.2018	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger		Institut für Polymertechnologien e. V. Alter Holzhafen 19 23966 Wismar		Tel	03841 758-2394
				Fax	03841 758-2399
				Projektleitung Prof. Dr. Harald Hansmann	
				Bearbeiter Dipl.-Ing. Jan Siering	
Kooperationspartner		Hochschule Wismar, Lehrstuhl für Nachwachsende Rohstoffe Lake-Agege-Farm, Mankessim, Ghana Fa. Affum-Tech, Vume, Ghana University of Cape Coast, Cape Coast, Faculty School of Agriculture			

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Vorhaben basiert auf dem Ansatz, Pflanzenbewässerung in Wurzeltiefe über Versorgungsleitungen zu realisieren, die mit Tonkörpern zur Wasserabgabe ausgestattet sind. Die eigentliche Wasserabgabe über diese Tonkörper wird durch die Saugspannung des umgebenden Bodens kontrolliert, die mit zunehmender Trockenheit des Bodens zunimmt. Ein erhöhter Wasserverbrauch von Pflanzen, der ohne eine solche Bewässerung zu einer zunehmenden Austrocknung des Bodens führen würde, soll auf diese Weise ausgeglichen werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das vorliegende Vorhaben dient dazu, die Algenbildung und deren Wirkung auf die Saugfähigkeit des Systems unter simulierten tropischen Bedingungen über einen Zeitraum von mehreren Monaten zu untersuchen. Hierzu werden Saugbewässerungsversuche innerhalb einer Klimakammer durchgeführt, in der tropisches Klima mit den sich einstellenden hohen Bodentemperaturen und Luftfeuchtigkeiten simuliert werden kann. Als Versuchsboden wird der in der Sahel-Zone überwiegend anzutreffende Laterit eingesetzt, sodass auch die Bodenbeschaffenheit tropischen Bedingungen nahekommt. Der Boden selbst wird in einer Tiefe von ca. 50 cm (maximale Verlegungstiefe für Saugbewässerung) aktiv auf ca. 30 °C gehalten, einer Temperatur, die der Laterit bspw. in Ghana (Versuchsfeld) in dieser Tiefe etwa aufweist. Parallel dazu sollen diese Effekte auf zwei kleineren Versuchsflächen in Ghana (Moringa Pflanzen werden mit Brunnenwasser bewässert; Gemüsepflanzen werden mit Flusswasser bewässert) untersucht werden.

Im Detail sind folgende Arbeitsschritte erforderlich:

1. Entwicklung, Aufbau und Test von Versuchsanlagen zum gleichzeitigen Einbau in Klimaschrank sowie auf Versuchsfeldern in Ghana (u.a. Herstellung der Tonkörper und kompletten Versorgungsleitungen und Einbringen in Versuchsfeld)
2. Versuchsdurchführung und Auswertung der Versuche in Klimakammer sowie der Versuche auf Versuchsfeldern in Ghana

Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchung der Mikrobewässerungssysteme auf den Testfeldern zeigte auf beiden Testfeldern eine Wasserabgabe von ca. 200 ml/Tag und Tonkörper. Die Biomasse entwickelte sich auf beiden Testfeldern unter Mikrobewässerung gut. Im Versuchszeitraum wurde keine Beeinträchtigung der Bewässerungsleistung in Folge des Algenbefalls, der optisch an beiden Systemen beobachtet wurde, festgestellt. Durch die Messung der Wasserqualität im Bewässerungssystem wurde bestätigt, dass sich über den Versuchszeitraum keine durch Algenbefall hervorgerufene Einbuße der Wasserqualität eingestellt hatte. Die Mikrobewässerung führte trotz geringen Wasserverbrauches nicht zu einem eingeschränkten Pflanzenwachstum, sondern konnte sogar zu einer Verbesserung des Ertrages führen, womit das Prinzip der Mikrobewässerung im Feldtest bestätigt werden konnte.

In Laborversuchen wurde unter Einsatz sehr hoher Algenkonzentrationen im Wasser gezeigt, dass die Bewässerungsleistung der Systeme deutlich durch hohen Algenbefall eingeschränkt werden kann. Zur Klärung der Frage, inwieweit das Algenwachstum innerhalb des Bewässerungssystems ausreicht, die Leistungsfähigkeit signifikant zu beeinträchtigen, sind weiterführende zeitaufwändige Versuche erforderlich. Experimentell untersuchte Methoden zur Einschränkung des Algenbefalls waren die Abtötung von Algensporen im Bewässerungswasser mittels UV-C-Bestrahlung und der Entzug der Nahrungsgrundlage für das Algenwachstum durch das Einbringen phosphatbindender Substanzen. Phosphatbinder ermöglichen die erhebliche Reduzierung des Algenanteils. UV-C-Lichtfilter führen zum Absterben der Algen, wobei die abgestorbene Biomasse durch geeignete Filter oder regelmäßige Spülmaßnahmen aus dem System entfernt werden müssen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

An der vorliegenden Studie wurden vor Ort beteiligt:

University of Cape Coast (UCC): Prof. Sam-Amoah, Dr. Francis Kumi u. a.

GIZ: Herr Holger Kahl

Fa. Affum-tech, Accra: Herr Günter Rose GF

Auf Grundlage der vorliegenden Untersuchungsergebnisse wird an der UCC im Herbst 2018 ein Promotionsvorhaben zur Mikrobewässerung gestartet, das durch das Institut für Polymertechnologien e. V. (IPT) unterstützt wird.

Fa. Affum-tech ist daran interessiert über den Technologietransfer zur Herstellung von geeigneten Systemen vor Ort die Herstellung und den Vertrieb solcher Systeme in Ghana zu übernehmen.

Das Vorhaben wurde ebenfalls bei verschiedenen Partnern in Namibia vorgestellt. Dort soll eine erste Feldstudie, begleitet durch die Namibian University of Science and Technology, Windhoek, Prof. Dr. Pio Barone Lumage in zwei Greenhouses (Homulus in Okahandja, Herr D. Wölbling und Paulinenhof in Outjo, Herr G. Waldschmidt) beginnend im August 2018 durchgeführt werden.

Involviert wurden in Namibia ferner:

GIZ Nam: Herr T. Schild, Frau N. Faschina, Herr A. Schöning

Penduka, Windhoek: Frau E. Kaunapower Mudhengi, Gen Man.

Renewable Energy Industry Association of Namibia: Herr H. Schütt

Eine erste Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift ist für 2019 geplant.

Eine erste Maßnahme zum Technologietransfer ist mit Partnern aus Bulgarien, Mazedonien und Spanien im Rahmen eines Bridge2Era-Vorhabens mit Beginn 3/2019 geplant.

Fazit

Das Mikrobewässerungssystem auf der Basis poröser Tonkörper hat sich in ersten Feldstudien bewährt und wird durch den Antragsteller weiter wissenschaftlich untersucht, technisch weiterentwickelt und weiter weltweit verbreitet.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Diagrammverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
1 Zusammenfassung.....	9
2 Einleitung.....	10
3 Vorhabensdurchführung und -ergebnisse.....	14
3.1 Das Tonkörpersystem.....	14
3.2 Feldstudie - Somanya.....	16
3.2.1 Planung und Installation.....	17
3.2.2 Inbetriebnahme.....	18
3.2.3 Versuchsdurchführung.....	18
3.2.4 Auswertung der Messergebnisse.....	20
3.2.4.1 Wasserverbrauch.....	20
3.2.4.2 Bodenanalyse.....	22
3.2.4.3 Wasserqualität und Algenbefall.....	23
3.2.4.4 Güte der Früchte.....	25
3.3 Feldstudie - Vume.....	26
3.3.1 Planung und Installation.....	26
3.3.2 Inbetriebnahme.....	28
3.3.3 Versuchsdurchführung.....	28
3.3.4 Auswertung der Messergebnisse.....	29
3.3.4.1 Wasserverbrauch.....	29
3.3.4.2 Bodenanalyse.....	30
3.3.4.3 Algenbefall.....	32
3.3.4.4 Fruchtgüte.....	33
3.4 Erkenntnisse aus den Feldstudien.....	34
3.5 Untersuchung der Saugspannung des Laterit-Bodens unter Laborbedingungen.....	35
3.6 Untersuchung des Algen-Einflusses auf die Saugfähigkeit der Tonkörper.....	39
3.6.1 Messprinzip zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit.....	39
3.6.2 Untersuchung der Saugfähigkeit von Tonkörpern in mit Algenpulver angereichertem Wasser.....	40
3.6.3 Untersuchung vorbeugender Maßnahmen zum Schutz vor Algenwachstum in Bewässerungssystemen.....	42

3.6.3.1 Versuchsvorbereitung	42
3.6.3.2 Versuchsdurchführung	43
3.6.3.3 Auswertung der Messergebnisse	45
4 Fazit	49
Literaturverzeichnis	51
Anhänge	53
A1 Feldstudie – Somanya.....	53
A 2 Feldstudie – Vume.....	56
A 3 Saugspannungsmessung – Laterit-haltige Erde.....	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Querschnitt eines installierten Tonkörpers.....	14
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Tonkörper-Systems in der Praxis.....	16
Abbildung 3:	Ausheben der Rinnen für die Tonkörper-Leitungen.....	18
Abbildung 4:	Testfeld: schematische Darstellung der Messpunkte unter Berücksichtigung der Lage der Tonkörper-Leitungen (irrigationlines).....	20
Abbildung 5:	Mangofrüchte zum Ende der Versuchsdauer.....	25
Abbildung 6:	Anordnung der verschiedenen Gurkenarten.....	27
Abbildung 7:	Ausheben der Rinnen für die Tonkörper-Leitungen.....	27
Abbildung 8:	Anordnung der Messpunkte im Testfeld.....	28
Abbildung 9:	Algenbildung im Bereich der über dem Erdboden gelegenen Schläuche.....	32
Abbildung 10:	mit Tonkörper-System bewässerte Gurkenfrüchte nach 6 Wochen.....	33
Abbildung 11:	Schematischer Aufbau zur Untersuchung der Saugspannung in Laterit-haltiger Erde.....	37
Abbildung 12:	Schematische Darstellung des Messprinzips zur Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit.....	39
Abbildung 13:	Algenanreicherung im Tonkörper-System.....	40
Abbildung 14:	kultivierte Algensuspension der <i>Chlorella vulgaris</i>	43
Abbildung 15:	Tonkörper in Wasser-Algenlösung.....	43
Abbildung 16:	Ermittlung des Phosphat- (oben) und Nitratwertes (unten) durch Verwendung von Indikatorfarbstoffen.....	44
Abbildung 17:	Wasser-Algenlösung und Tonkörper (links) ohne und (rechts) mit Phosphatbinder... ..	46
Abbildung 18:	Einsatz des UV-C Lichtfilters in Wasser-Algenlösung: (links) vor und (rechts) nach Inbetriebnahme.....	47
Abbildung 19:	Anordnung der Mango-Bäume in Reihe 1.....	53
Abbildung 20:	Anordnung der Mango-Bäume in Reihe 2.....	53
Abbildung 21:	Tonkörper-Leitung in einer ausgehobenen Rinne (bereits mit Wasser gesättigt).....	54
Abbildung 22:	Messung des Wasserverbrauches.....	54
Abbildung 23:	Abgedeckte Schlauchleitung an der Zulauf-Armatur.....	55
Abbildung 24:	Anordnung und Einpflanzung der Gurkenpflanzen unter vorheriger Aufzucht in Topfen.....	56
Abbildung 25:	Gurkenpflanzen nach 7 Tagen (links); Gurkenpflanzen nach 12 Tagen (rechts).....	56
Abbildung 26:	Gurkenpflanzen nach 22 Tagen (links); Gurkenpflanzen nach 26 Tagen (rechts).....	57
Abbildung 27:	Parasitenbefall an den Gurkenpflanzen.....	58
Abbildung 28:	Messanordnung im Behälter mit Laterit-haltige Erde (von links nach rechts: Hygrometer, Tensiometer, Bodenfeuchte-Messgerät, Tonkörper-Schlauch).....	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zuordnung der Bodenfeuchtwerte des analogen Messgerätes zum zusätzlichen Wassergehalt im Laterit-Boden.....	19
Tabelle 2:	pH-Werte und Nitrat-Werte des Wassers in den Tonkörper-Leitungen.....	24
Tabelle 3:	Wasserverbrauch der Testfelder Somanya und Vume.....	34
Tabelle 4:	Hydraulische Leitfähigkeit von zwei Tonkörper-Modulen vor- und nach Algenbeladung des Wassers mit 5 g/l Algen.....	42
Tabelle 5:	Gemessene Wasser-Werte der Wasser-Algenlösung über einen Zeitraum von 4 Wochen.....	46
Tabelle 6:	Messwerte der Wasserstandshöhe h und Hydraulischen Leitfähigkeit C_h	48

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1:	Klimatische Daten von Kpong (etwa 15km von Agomeda entfernt).....	16
Diagramm 2:	Wasserverbrauch für das Somanya Testfeld.....	21
Diagramm 3:	Wasserverbrauch bezogen auf einen Tonkörper für das Somanya-Testfeld.....	22
Diagramm 4:	Bodenfeuchtigkeit analog im Somanya Testfeld.....	22
Diagramm 5:	Bodenfeuchtigkeit digital im Somanya Testfeld.....	23
Diagramm 6:	Klimatische Daten von Sogakope (2 km von Vume).....	26
Diagramm 7:	Wasserverbrauch für das Vume Testfeld.....	30
Diagramm 8:	Bodenfeuchtigkeit analog im Vume Testfeld.....	31
Diagramm 9:	Bodenfeuchtigkeit digital im Vume Testfeld.....	31
Diagramm 10:	Saugspannung pF in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Böden.....	36
Diagramm 11:	Saugdruckmessung von Laterit-haltiger Erde bei konstanten klimatischen Bedingungen.....	38
Diagramm 12:	Ermittelte Wasserstandshöhe in Abhängigkeit von der Zeit von Tonkörpern vor und nach der Algenanreicherung.....	41
Diagramm 13:	Messung der Wasserstandshöhe in Abhängigkeit von der Zeit.....	47

Abkürzungsverzeichnis

Bezeichnung	Beschreibung
<i>Gew</i> – %	prozentualer Gewichtsanteil
<i>C_h</i>	hydraulische Leitfähigkeit
<i>a</i>	Querschnittsfläche des Schlauches
<i>s</i>	Wandstärke Tonkörper
<i>A</i>	durchströmte innere Mantelfläche des Ton-Zylinders
<i>t</i>	gemessene Zeit
<i>h</i>	aktuelle Wasserstandshöhe
<i>h₀</i>	Ausgangshöhe
<i>pF</i>	Saugspannung
<i>c_{Algen}</i>	Algenkonzentration
<i>m_{voll}</i>	Masse des leeren Zentrifugenglases
<i>m_{leer}</i>	Masse des getrockneten Zentrifugenglases
<i>V_{Probe}</i>	Volumen der entnommenen Wasser-Algenlösung

1 Zusammenfassung

Zur gezielten Wasserversorgung von Pflanzen wurde ein neuartiges Unterflur-Bewässerungssystem entwickelt, das auf eine Saugbewässerung durch halbindustriell gefertigte Tonkörperhülsen basiert. Dieser Bericht beschäftigt sich mit dem Einfluss des Algenbewuchses auf die Saugfähigkeit dieses Systems unter tropischen Umwelt- und Klima-Bedingungen. Dazu wurden zwei Feldstudien in Ghana innerhalb der Trockenzeiten durchgeführt, deren Aufgabe die messtechnischen und analytischen Untersuchungen von eingesetzten Tonkörper-Systemen an Pflanzen war.

Die erste Studie fand für einen Zeitraum von 16 Wochen auf einer Plantage in Somanya statt, auf der das Tonkörper-System in landwirtschaftlich genutzten Boden zum Einsatz kam und die Wurzeln von Mangobäumen unterflur bewässerte. In der zweiten Studie, die zeitlich parallel gestartet wurde, wurden verschiedene Arten von Gurkenpflanzen in einem Gewächshaus in Vume über einem Zeitraum von 10 Wochen ebenfalls durch das Tonkörper-System unterflur bewässert.

Hinsichtlich der Berücksichtigung der Bodensaugwirkung auf das Bewässerungssystem wurde die Saugspannung eines Bodenvolumens aus Laterit-haltiger Erde unter simulierten klimatischen Bedingungen in einer Klimakammer ermittelt. Die Untersuchung des Algeneinflusses auf die hydraulische Leitfähigkeit der Tonelemente fand unter Laborbedingungen statt. Dabei wurden Tonkörper mit Wasser durchnässt, in dem Algen gezüchtet bzw. das durch Algen angereichert wurde, um Erkenntnisse zum Einfluss des Algenbefalls auf die Saugwirksamkeit zu gewinnen. Darüber hinaus wurden Methoden zur Verhinderung des Algenwachstums untersucht.

Das eingesetzte Tonkörper-System lieferte das erforderliche Wasser aus dem bereitgestellten Wasserreservoir, wobei der Wasserverlust durch Verdunstung an der Bodenoberfläche gering war. Während des Versuchszeitraumes konnte visuell Algenwachstum innerhalb des Schlauchsystems festgestellt werden. Jedoch konnte weder eine Abnahme des Wassertransportes durch die Tonkörper noch eine Veränderung der Wasserqualität beobachtet werden.

Detaillierte Analysen bezüglich der Auswirkungen von Algenbefall auf die Leistungsfähigkeit von Mikrobewässerungssystemen wurden durch Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit dieser Systeme anhand kleiner Module durchgeführt. Unter Laborbedingungen wurden hierzu Algen in Mikrobewässerungsmodulen eingebracht sowie in diesen gezüchtet. Hierbei wurde das System bei einer Temperatur von 28 °C gefahren; dies entspricht der Bodentemperatur in Verlegungstiefe bei Feldversuchen in Ghana. Zur Bewertung des resultierenden Algenbefalls wurden ergänzende Messungen der Wasserqualität (pH-Wert, Nitrate und Phosphate) sowie Trockenmassegehalt bestimmt.

Zur Verhinderung von Algenbefall wurden folgende Maßnahmen vorgeschlagen und deren Wirkung experimentell untersucht:

- Entziehung der Nahrungsgrundlage der Algen
- Abtötung durch UV-C-Bestrahlung.

Beide Maßnahmen haben sich als wirksam erwiesen.

Die Feldstudie in Somanya wurde von der Fakultät für Landwirtschaft der ghanaischen Cape Coast University begleitet und von der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) unterstützt. Bei der Studie in Vume beteiligte sich eine örtlich ansässige deutsche Familie. In Kooperation mit der Hochschule Wismar, Lehrstuhl für nachwachsende Rohstoffe, Prof. Dr. Stollberg wurden die Laboruntersuchungen durchgeführt. Das Projekt wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 33672/01-23.

2 Einleitung

Bewässerungssysteme

Für den Anbau von Pflanzen als Nahrungsmittel ist der Bedarf an Süßwasser zur Versorgung ein wichtiger Faktor. In besonders trockenen und heißen Gebieten der Erde ist der Wasserverbrauch durch die schnelle Verdunstung erheblich. In Afrika beträgt der Anteil des Süßwasserverbrauches allein für die Landwirtschaft 85 %.¹ Je nach Häufigkeit der örtlich auftretenden Regenzeiten kann dieser Wert schwanken. Da der Anteil an Süßwasser auf der gesamten Erde lediglich 2,65 % beträgt² und trockene Gebiete davon nur einen Bruchteil besitzen, sind die sozioökonomischen Folgen unüberschaubar. Gerade in trockenen Gebieten entsteht ein Konflikt zwischen der Gewinnung bzw. dem Einsatz von Süßwasser für die Landwirtschaft und der Versorgung der Menschen und Tiere. Nicht unerheblich steigt dazu auch der Wasserbedarf in der ständig wachsenden Industrie, wodurch folglich das Problem der Wasserverknappung steigt. Als Folge des Klimawandels verschieben sich die Regenzeiten in der Sahelzone, wodurch sich das Problem der Wasserverknappung gerade in den ohnehin am stärksten betroffenen Gebieten der Erde weiter verstärkt.

Das vorliegende Vorhaben bezieht sich auf die Erprobung eines neuartigen Bewässerungssystems („Mikrobewässerung“) mittels poröser Tonkörper. In Ghana, wie auch in anderen Regionen der Sahelzone, spielt die effiziente und sparsame Nutzung von Wasserressourcen eine lebenswichtige Rolle. Für die Bewässerung von Pflanzen wurde durch den Antragsteller ein System vorgeschlagen, das ein hohes Potential zur effizienten Bewässerung aufweist. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden erste Untersuchungen zur Umsetzbarkeit dieser Bewässerungstechnik in Ghana durchgeführt.

Ein Schwerpunkt dieser Machbarkeitsstudie war die Untersuchung des Algenbefalls dieser Bewässerungssysteme unter subtropischen Bedingungen im Freifeld sowie im Gewächshaus.

Bei der Oberflächenbewässerung geht ein großer Teil des aufgebrachten Wassers bereits durch Verdunstung verloren, bevor es die Pflanzenwurzeln erreicht. Die hohe Verdunstungsrate in ariden bzw. auch subtropischen Gebieten führt in Trockenzeiten weiterhin dazu, dass infolge der Oberflächenbewässerung mittels Brunnenwasser oder Fluss/See-Wasser Mineralien in der obersten Bodenschicht angereichert werden, wodurch sich auf die Dauer der Salzgehalt in der oberen Bodenschicht erhöht. Zyklisches Befeuchten des Bodens in Kombination mit zyklischer Austrocknung der oberen Bodenschichten infolge der einfallenden Sonnenstrahlung verursacht zudem eine Verdichtung und damit Verhärtung dieser Bodenschicht, die damit zunehmend weniger Wasser aus der Oberflächenbewässerung aufnehmen kann. Dies erfordert regelmäßige Bearbeitung zur Lockerung des Bodens.

Systeme zur Tropfbewässerung sind bereits – auch in Ghana - im Einsatz. Diese können oberirdisch oder auch unterirdisch verlegt werden. Hierbei handelt es sich in beiden Fällen im Prinzip um Versorgungsschläuche mit Tropföffnungen. Bei der unterirdischen Verlegung kommt den Pflanzen ein höherer Anteil des zugeführten Wassers zugute, als bei der überirdischen Tropfbewässerung, bei der ein höherer Anteil des zugeführten Wassers oberflächlich verdunstet. Hierdurch werden Einsparpotentiale gegenüber der überirdischen Tropfbewässerung genutzt. Auch können starke Regenfälle mit Überflutung die unterirdischen Versorgungsleitungen im Gegensatz zu überirdisch verlegten Systemen nicht wegspülen oder die Tropferöffnungen verschlammen.

Nachteilig bei der unterirdischen Tropfbewässerung sind einige Faktoren, die der Akzeptanz dieser Technologie entgegenstehen:

¹ Lozan (2011) S. 149-150

² Hopp (2016) S. 319-320

Zum einen neigen Wurzelpflanzen dazu, in Richtung zunehmender Wasserkonzentration im Erdreich zu wachsen. Dies kann zu einer Verstopfung der Tropferöffnungen durch Pflanzenwurzeln führen, deren Spitzen immer einen geringeren Durchmesser, als die Tropferöffnungen haben.

Weiterhin ist die unterirdische Verlegung von Tropfleitungen deutlich aufwendiger, als die überirdische Verlegung.

In jedem Falle wird zur Tröpfchenbewässerung ein Versorgungssystem benötigt, das in Abhängigkeit von der Niederschlags-Situation und dem Wasserbedarf der Pflanzen im jeweiligen Wachstumsstadium die zugeführte Wassermenge regelt. Die Leitungen der Tropfbewässerung werden an das zur Verfügung stehende Wasserversorgungsnetz oder ein Pumpsystem angeschlossen, das einen gewissen Wasserdruck aufweist. Die Regelung erfolgt in der Weise, dass die Ventile zur Versorgung der Tropfleitungen täglich oder auch wöchentlich nur für einen kleinen, den Erfordernissen anzupassenden Zeitraum geöffnet werden. Hierdurch bedingt, fallen die Tropfleitungen regelmäßig trocken, was zu Verkrustungen der Tropferöffnungen auch bei unterirdisch verlegten Systemen insbesondere bei hoher Wasserhärte führt. Dies erfordert dann die Aufbereitung bzw. den Austausch der Leitungen, was Grabarbeiten zur Folge hat. Bei der Bewässerung mit relativ hartem Wasser muss diese Regenerierung in jeder Saison einmal durchgeführt werden.

Mikrobewässerung

Zur Verringerung der für die Bewässerung in der Landwirtschaft sowie im Gartenbau erforderlichen Wassermenge wurde die Unterflurbewässerung mittels poröser Tonkörper vorgeschlagen. Diese Tonkörper werden in Form von Hülsen auf Wasserversorgungsschläuche aufgezogen, die von einem zentralen Tank quasi drucklos gespeist und permanent mit Wasser versorgt werden. Die Freigabe des Wassers an den umgebenden Boden erfolgt durch den Wassertransport durch Tonkörper. Die sogenannte hydraulische Leitfähigkeit der Tonkörper ist eine Folge der porösen Struktur dieser Tonkörper, die aufgrund der Kapillarwirkung dieser Porenstruktur eine Saugspannung aufbauen können. Auf der äußeren Oberfläche der Tonkörper bildet sich in Folge des Wassertransportes ein Wasserfilm, der infolge von Verdunstung an das umgebende Erdreich abgegeben wird. Die Verdunstungsrate hängt hier sowohl von der Temperatur, als auch von der umgebenden Erdfeuchte ab. Sie ist in jedem Falle aber so niedrig, dass nur eine geringe, kontinuierlich abzugebende Wassermenge erforderlich ist, um die Versorgungsleitungen und Tonkörper nie trockenfallen zu lassen. Hierdurch bedingt kann es nicht zu Verkrustungen kommen. Der geringe Wasserbedarf dieser Bewässerungsart führt zu der Bezeichnung „Mikrobewässerung“. Da die umgebende Erdfeuchte sowohl von Oberflächenniederschlägen, als auch vom Pflanzenbedarf abhängt, kann das Mikrobewässerungssystem auf diese Einflüsse reagieren, ohne dass eine äußere Regelung der Wasserzufuhr erforderlich ist.

Ghana als Experimentalzone für die Untersuchung der Einsatzbarkeit der Mikrobewässerung

Die Bodentemperatur ist in Ghana auch in Wurzeltiefe mit ca. 30 °C durchgängig hoch, was eine hohe Verdunstungsrate der Mikrobewässerungssysteme ermöglicht. Die Landwirtschaft ist seit Jahrzehnten die wichtigste Komponente der ghanaischen Wirtschaft. Bemerkenswert ist der Rückgang des BIP-Beitrag dieses Sektors von 30,4 % im Jahr 2006³ auf 19,5 % im Jahr 2017⁴. Eines der Hauptprobleme, das zu diesem Ergebnis führte, ist die Unfähigkeit von Kleinbauern moderne Produktionstechnologien einschließlich Bewässerung zu nutzen, um die Produktion zu steigern. Die meisten Bauern in Ghana sind am Regenfeldbau beteiligt. Die lokalen Landwirte nutzen nur im geringen Maße Bewässerungssysteme. Dabei verwenden sie meistens Systeme zur Oberflächenbewässerung.

³ Ghana Statistical Service (2010)

⁴ CIA World FactBook (2017)

Darüber hinaus wird der Klimawandel als Bedrohung für die landwirtschaftliche Produktivität in der Region gesehen. Laut Lacombe et al (2012) war das Muster der Niederschläge in den letzten Jahrzehnten nicht stabil und die Trockenperioden haben zugenommen, so dass Landwirte mit sehr kurzen Regenfällen für die Pflanzenproduktion übrigblieben.⁵ Dies hat negative Auswirkungen auf die Produktivität der Pflanzen. Aus der Studie von Terrason et al (2009) wurde eine Beobachtung der Verringerung der Wasserproduktivität und der Erträge von Getreide in Betrieben in der Nähe des Volta-Beckens des Landes berichtet.⁶ Andere Arbeiten von Kankam-Yeboah et al (2013) und Darko et al (2016) prognostizierten, dass der Klimawandel in den kommenden Jahrzehnten den Hauptbeitrag zur Produktivitätsreduktion leisten wird.^{7,8} Es ist daher wichtig, wassersparende Methoden zu implementieren, um die zukünftigen Wasserproduktivitäts- und Pflanzenproduktionsanforderungen zu erfüllen.

Folglich gilt die Tropfbewässerung als eine der effizientesten wassersparenden Bewässerungsmethoden, obwohl sie selten von Landwirten im Land verwendet wird. Bei denjenigen, die diese Technologie verwenden, werden die Rohre oft auf der Oberfläche des Bodens installiert. Die ungewünschten Folgen „schwebend“ verlegter Rohre sind oftmals „Störungen“ bei den landwirtschaftlichen Aktivitäten. Darüber hinaus neigen die Emittter der Tropfleitungen solcher Systeme zum Verstopfen durch den Boden und andere Partikel, die den Gesamtwirkungsgrad des Systems verringern könnten.

Die unterschiedlichen Bodenqualitäten (u. a. Sand, Lehm, Laterit) und die oben genannte topographische Vielfalt, bestimmt durch hügeliges Land mit langen Hängen und den flachen schwimmenden Gebieten, spiegeln die gesamte Vielfalt der landwirtschaftlichen Bedingungen in Ghana wider. Die Zusammenarbeit mit der Universität von Cape Coast und mit dem Bau- und Straßenforschungsinstitut in Kumasi führte in den folgenden Jahren zur Idee der Gründung des so genannten Instituts für Ökologischen Landbau und Erdbau (Abb. 1 a, b, c). Dieses Institut verfolgt das klare Ziel, nachhaltiges Leben und Landwirtschaft an einem Ort zu verbinden. Das Institut möchte die Bauern vor Ort davon überzeugen, dass ihr Brandrodungsbau die Natur und das Klima zerstört. Aufgrund der immer noch steigenden Lebenshaltungskosten in Ghana ist diese Art der Landwirtschaft heute keine effiziente und angemessene Lebensform mehr.

Das Institut für Polymertechnologien e. V. unterstützt die Bemühungen der Cape Coast University, im Rahmen eines Promotionsvorhabens die Anwendungsgrenzen sowie die Chancen der Mikrobewässerung in Ghana im Hinblick auf Bodenbeschaffenheit, Art der Pflanzen etc. systematisch zu untersuchen.

Algenbefall in Mikrobewässerungsanlagen im Feldversuch (Ghana)

Hohe Temperaturen bei gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit begünstigen im großen Maße das Wachstum von Algen und Pilzen. Algen verschieben das chemische Gleichgewicht im Wasser potentiell zu Werten, die zur Versorgung der Pflanzen nicht mehr akzeptabel sein können. Die Folgen können von der Verschlechterung der Fruchtgüte bis hin zu Ernteaussfällen reichen.

Algenwachstum kann zudem potentiell zur Verstopfung von Düsen, Öffnungen und Filtersystemen sowie der Tonkörperporen in der eingesetzten Mikrobewässerung führen.

Die nachfolgenden Studien und Untersuchungen beschäftigen sich mit dem praktischen Einsatz der Tonkörper-Systeme in Ghana. Im Hinblick auf die Erfüllung der gegebenen klimatischen und pedologischen Anforderungen wurden Testfelder auf einer Freilandfläche und in einem Gewächshaus in Ghana in Anspruch genommen. Zur Bewässerung wurde in beiden Fällen Flusswasser aus dem Volta genutzt.

⁵ Lacombe et al (2012)

⁶ Terrason et al (2009) S.104-118

⁷ Kankam-Yeboah et al (2013)

⁸ Darko et al (2016)

Aufgrund des Lichteinfalls ist bei Flusswasser davon auszugehen, dass Algensporen mit in das Bewässerungssystem eingetragen werden.

Auf den Testfeldern sollten unterschiedliche Pflanzensorten in bestimmten Abständen zueinander versorgt werden. Dabei konnte die Bewässerung an Mangobäumen auf einer Plantage und an Gurkenpflanzen eingeplant werden. Mangobäume sind perfekt an die klimatischen Verhältnisse angepasst, währenddessen Gurkenpflanzen für ihr Wachstum einen erheblichen Wasserbedarf haben. Auch unter diesen Aspekten sollte eine Bewertung der Funktionalität des Bewässerungssystems erfolgen. Dazu wurde die Wasserqualität innerhalb des Bewässerungssystems über die Laufzeit der Versuche gemessen. Begleitend wurden Bodenfeuchte und Pflanzenqualität über den Versuchszeitraum gemessen und bewertet.

Ein Schwerpunkt dieser Versuche war die Untersuchung des Algenbefalls auf die hydraulische Leitfähigkeit des Systems, die allerdings im Feldversuch nicht direkt gemessen werden konnte, sondern anhand des Wasserverbrauchs über den Versuchszeitraum beurteilt wurde. Zum Nachweis der Algenbildung wurden optische Bewertungen der Zuleitungs-Schläuche vorgenommen, die zu diesem Zweck transparent ausgeführt waren, sowie in regelmäßigen Abständen Wasserproben aus dem Mikrobewässerungssystem zur Analyse entnommen.

3 Vorhabensdurchführung und -ergebnisse

3.1 Das Tonkörpersystem

Die Bewässerung von Pflanzen erfolgte unterflur mit Hilfe von Tonkörper-Elementen, die über Schläuche das Wasser zu den Wurzeln transportieren. Das Wirkprinzip basiert dabei auf den Kapillareffekt, der durch die Porosität des Tonmaterials entsteht. Die Oberflächenspannung des Wassers sowie die Adhäsion an der Grenzfläche zwischen dem flüssigen und festen Medium begünstigt die Flüssigkeitsbenetzung der Kapillargefäße. Die Poren des Tonmaterials sind zwar von ihrer Größe und Form verschieden, bilden jedoch ein kommunizierendes Netzwerk, so dass der hydrophile Tonkörper im Gleichgewichtszustand mit einer 100 % feuchten Umgebung eine gewisse Wassermenge aufnimmt.

Der Boden, in dem sich die Pflanzenwurzeln befinden, übt ebenso ebenfalls eine Saugwirkung aus. Der Wasserbedarf der Pflanzen lässt die Bodenfeuchtigkeit in der direkten Wurzelumgebung sinken, was dazu führt, dass die Saugspannung des Bodens steigt. Damit erhöht sich auch die Evaporationsrate auf der Oberfläche des Tonkörpers. Dementsprechend steigt der Wasserverbrauch des Systems im Einsatz.

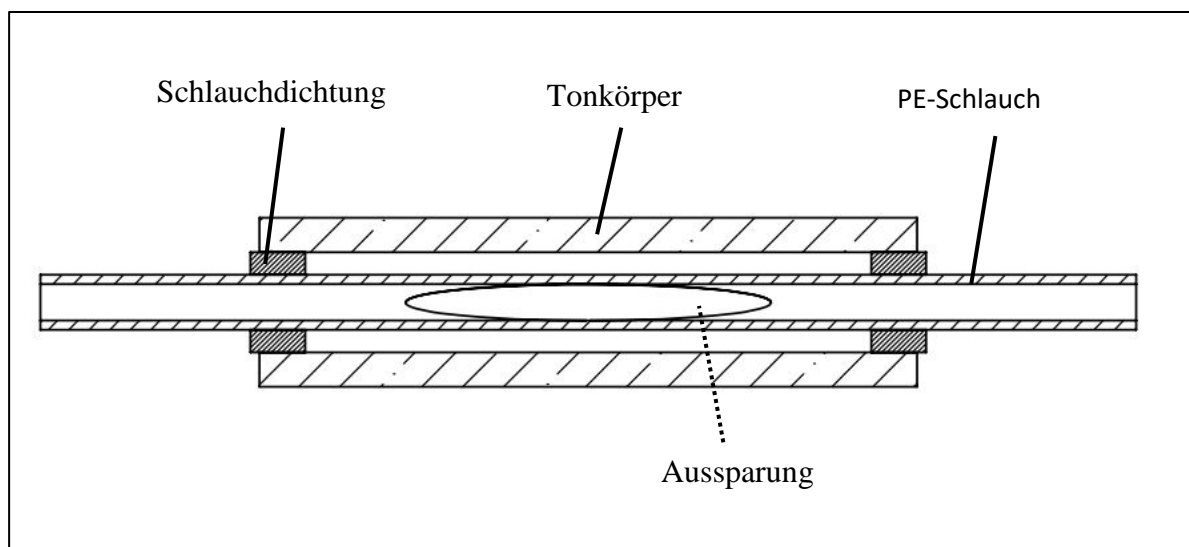


Abbildung 1: Querschnitt eines installierten Tonkörpers

Ein Tonelement ist ein geformter Hohlzylinder aus porösem, niedrig ($< 1000\text{ °C}$) gebranntem Ton, das sowohl eine bestimmte Zusammensetzung, insbesondere aber eine geringe Korngröße der Partikel ($70\% < 2\text{ }\mu\text{m}$) aufweist. Das Wasseraufnahmevermögen der Tonkörper ist eine Bemessungsgröße, auf die hin die Zusammensetzung des Tonmaterials sowie die Sieblinie der Ton-Rohstoffe optimiert wurde. Bei den eingesetzten Tonkörpern wurde im Mittel ein Wasseraufnahmevermögen von $10\% \text{ w/w}$ gemessen.

An der freien Oberfläche des von innen heraus mit Wasser beaufschlagten Tonelements kommt es zur Evaporation des Wassers. Dadurch entsteht ein sogenannter Sogeffekt im Inneren der Gefäße, so dass das Wasser nachfließen kann. Die durch Evaporation hervorgerufene Saugförderung führt im geschlossenen System dazu, dass sich ein Unterdruck aufbaut, der als zunehmende Saugspannung messbar ist. Die gemessene Saugspannung, bei der in den Kapillaren des Tonkörpers die Flüssigkeitssäule zusammenbricht, stellt ein weiteres Bemessungskriterium für Mikrobewässerungsanlage dar. Die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens eingesetzten Tonkörper zeigen eine Saugspannung von $400 \pm 150\text{ mbar}$.

Diese Tonelemente werden in Modulen zu je 3 Stück in einem vorgegebenen Abstand, der idealerweise der Wassertransportvermögen (Wirkung der Saugspannung) des jeweiligen Bodens (30 – 60 cm) angepasst ist, auf einen Verbindungsschlauch aufgezogen, der in Höhe des jeweiligen Tonkörpers eine Öffnung zur Freigabe des Wassers in den Körper aufweist (Abbildung 1). Aus Kostengründen wurde hierzu ein Polyethylenschlauch (Außendurchmesser 6 mm) eingesetzt. Zur Abdichtung des Tonkörpers wurde an beiden Enden der Tonhülse eine zylindrische Flach-Dichtung auf den PE-Schlauch gezogen.

Für die Module, die in die Testanlagen eingebaut wurden, wurde ein Abstand zwischen den Tonkörpern von 40 cm festgelegt. Dieser Wert wurde als Grenzwert für das Wassertransportvermögen der Böden im Freifeld prognostiziert, in denen Sand, Lehm- und Lateriatanteile örtlich stark schwanken können.

Nach Montage der Module wurden diese einzeln auf Luft-Dichtigkeit überprüft und ggf. durch dichte Module ersetzt. Hierzu wurden die Module unter im Vergleich zur Saugspannung der Tonkörper hohem Überdruck (ca. 1 bar) mit Luft beaufschlagt und unter Wasser auf Freisetzung von Luftblasen geprüft. Im praktischen Einsatz würde dieser Überdruck einer Verlegetiefe von 10 m unterhalb des Wasserreservoirs entsprechen. Die Höhendifferenzen im Testfeld lagen dagegen bei < 1 m, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Mikrobewässerungssysteme auch unter Betriebsbedingungen keine Leckagen aufweisen werden. Damit kann der gemessene Wasserverbrauch im Feldversuch mit einer gewissen Sicherheit der Evaporationsrate über die Oberfläche der Tonkörper zugeordnet werden.

Umgekehrt sind die eingesetzten Tonkörper aufgrund ihrer hohen Saugspannung in der Lage, einen Unterdruck innerhalb des Systems aufzubauen, der den Wassertransport auch aus tieferliegendem Reservoir ermöglichen würde. Jedoch setzt dies eine vollständige Dichtigkeit des Systems und vollständige Fehlerfreiheit aller Tonkörper im Gesamtsystem voraus. Da dies nicht zu 100 % gewährleistet werden kann, wurde das Wasserreservoir im Testfeld leicht oberhalb des Niveaus der Tonkörper angeordnet. Ein Systemausfall aufgrund von Undichtigkeiten oder Fehlern in Tonkörpern wurde durch diese Maßnahme ausgeschlossen. Für Vergleichsuntersuchungen im Labor wurde derselbe Aufbau gewählt.

Über Leitungsverbinder wurden die Module aneinander oder mit den Endschläuchen beidseitig verbunden und in Höhe der Pflanzenwurzel verlegt. Am Ende einer jeden Bewässerungsleitung verhindert eine Endkappe den Austritt der Flüssigkeit, erlaubt aber auch nach der Installation die Entlüftung der Schlauchleitung. Hierzu wurde das Ende jeder Bewässerungsleitung knapp oberhalb des Bodenniveaus verlegt (Abbildung 2).

Reservoirseitig wurden mehrere Schlauchleitungen mittels T-Konnektoren verbunden und zentral an einen Wassertank angeschlossen.

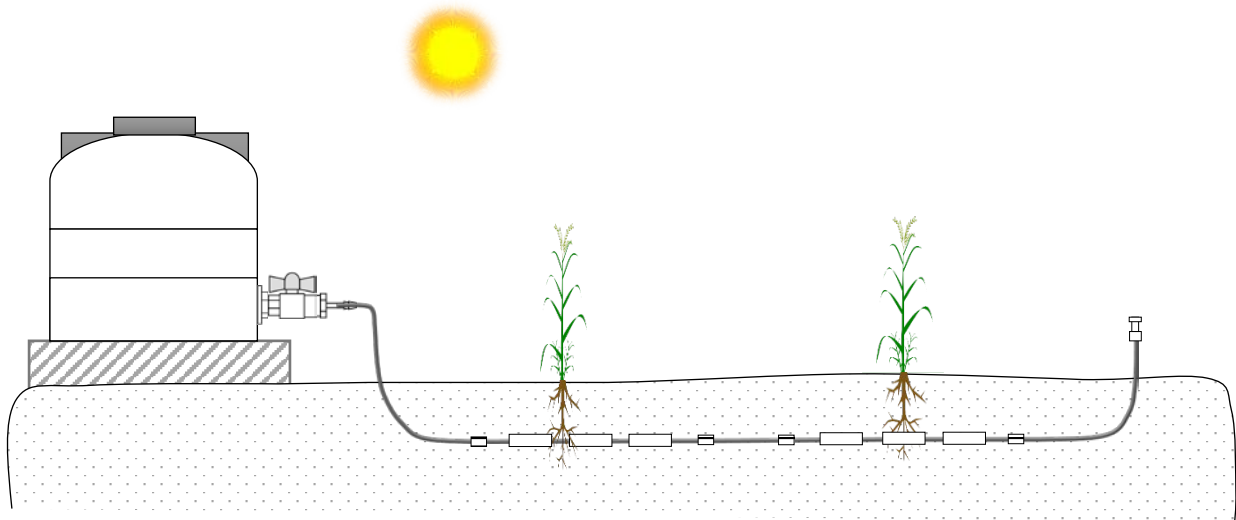


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Tonkörper-Systems in der Praxis

3.2 Feldstudie - Somanya

Die Stadt Somanya liegt in Ghana, ca. 65 km nordöstlich der Hauptstadt Accra. Trotz der örtlichen Tagesdurchschnittstemperaturen von 26 °C bis 30 °C und einer 12-stündigen Sonneneinstrahlung liegt hier eine relativ konstant hohe Luftfeuchtigkeit zwischen 75 % und 85 % vor (Diagramm 1).

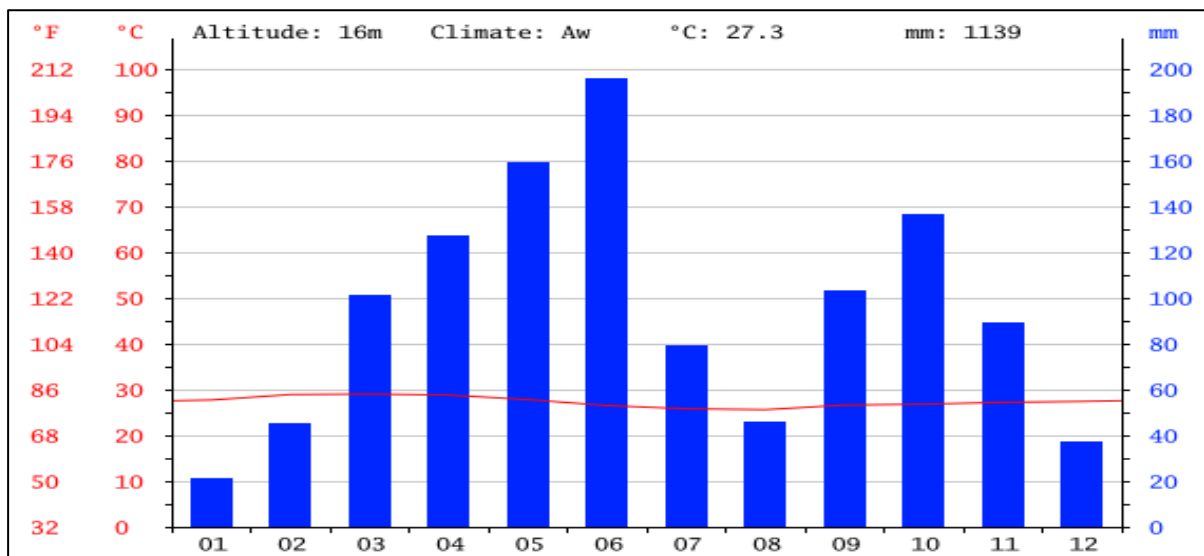


Diagramm 1: Klimatische Daten von Kpong (etwa 15km von Agomeda entfernt)⁹

Unter diesen idealen Bedingungen können sich Algen besonders günstig entwickeln und verbreiten. Das Tonkörper-System wurde hier für die Bewässerung von bereits ausgewachsenen Mango-Bäumen in der Trockenzeit von Dezember bis Ende Februar verwendet. Die Mango-Farm befand sich neben der Ansiedlung Agomeda etwa 10 km südlich von Somanya. Unterstützt wurde das Projekt von der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. In deren Auftrag war der örtliche Farmer für die Instandsetzung und Wartung des Bewässerungssystems sowie für die beratende Beurteilung der Mango-Pflanzen-Güte tätig. Seine Aufgaben bestanden in:

- dem Nachfüllen des Wasserreservoirs nach der regelmäßigen Messung

⁹ Gesammelte Klimatische Daten 1982-2012

- der Beobachtung des Pflanzenwachstums
- der begleitenden Durchführung messtechnischer Untersuchungen

In Kooperation mit der Fakultät für Landwirtschaft der ghanaischen University of Cape Coast (UCC) wurden die praxisorientierten Versuche mit dem Bewässerungssystem realisiert. Dazu führten Mitarbeiter der UCC Feuchtemessungen im Boden, chemische Untersuchungen der Wasserqualität im Bewässerungssystem und Evaluierung zum Pflanzenwachstum an vordefinierten Mango-Baumreihen durch.

Analysiert wurden neben der Bodenfeuchtigkeit, Saugspannung und Wasserverbrauch speziell das Algenwachstum im Bewässerungssystem.

Hierzu wurde der Anschluss des Tanks an das Bewässerungssystem sowie die Schlauchleitungen der mit transparenten PE-Schläuchen ausgeführt, die die optische Begutachtung auf Algenbefall ermöglichen.

Die Wasserqualität wurde über den Versuchszeitraum durch die Messung von pH- und Nitrat-Werten über ein Photometer ermittelt. Nach Installation des Bewässerungssystems wurden diese Messungen zweiwöchentlich durchgeführt. Zur Messung der Parameter wurden geringe Wasserproben aus dem Ende der Schlauchleitung durch Öffnen der Endkappe entnommen. Die Ergebnisse wurden zeitnah an das IPT übermittelt.

3.2.1 Planung und Installation

Auf der Mango-Plantage wurden 2 Baumreihen mit je 5 Mangobäumen bei einem mittleren Abstand von 4 m zwischen den Pflanzen zur Verfügung gestellt. Die Bäume hatten jeweils ein unterschiedliches Wachstumsstadium erreicht und trugen bereits Früchte. Die Mango-Früchte zogen durch ihr Gewicht so stark an den Ästen, dass diese nach außen hin absanken und zum Teil abgestützt werden mussten. Die herkömmliche Bewässerung außerhalb der Regenzeiten dieser Pflanzen erfolgte oberirdisch durch Flusswasser des Flusses Volta mittels Photovoltaik-Pumpen.

Für die Verteilung der Tonkörper-Leitungen mussten links und rechts der Baumreihen Rinnen ausgehoben werden. In direkter Umgebung zum Wurzelbereich befanden sich die Leitungen in 40 cm Tiefe und in jeweils 25 cm Abstand zum Stamm der Pflanzen (Abbildung 3). Je ein Tonkörper-Modul (3 Tonkörper) auf einer Seite eines Mangobaumes versorgte diesen mit Wasser. Dementsprechend mussten die Restschläuche als Modul-Verbinder für die Verteilung zugeschnitten werden. Ein 200 Liter Polytank wurde als Wasserreservoir abgedeckt in der Mitte zwischen den beiden Baumreihen auf leicht erhöhter Stelle positioniert. Zuvor angeschaffte transparente Kleinbehälter zur Beobachtung des Algenwachses waren aufgrund der Sicherheitslage (Diebstahlsgefahr) in der abgelegenen Farm nicht installiert worden. Der gegen Sonnenbestrahlung undurchdringliche Polytank wurde am unteren Viertel mit einer Zuflussarmatur für das Mikrobewässerungssystem ausgestattet. Bestandteil dieser Zuflussarmatur war ein zwischengeschalteter kommerziell verfügbarer Kraftstofffilter (Maschenweite ca. 50 µm). Dieser wurde mit den Verbindungsschläuchen über T-Stücke und gerade Leitungsverbinder verbunden. Dadurch versorgte ein einzelner Polytank alle Tonkörper-Module. Ausnahmslos jedes verwendete Schlauchmaterial ist transparent und damit durchlässig für Sonnenstrahlen. Im Gegensatz zu den Tonkörper-Leitungen, die im Boden eingegraben waren, befand sich ein kleiner Teil des Schlauchsystems oberhalb des Bodens. Dieser wurde durch einen intransparenten Schlauchüberzug abgedeckt und konnte während der Untersuchungen auf Algenbefall wieder abgezogen werden (siehe auch im Anhang Abbildung 23).

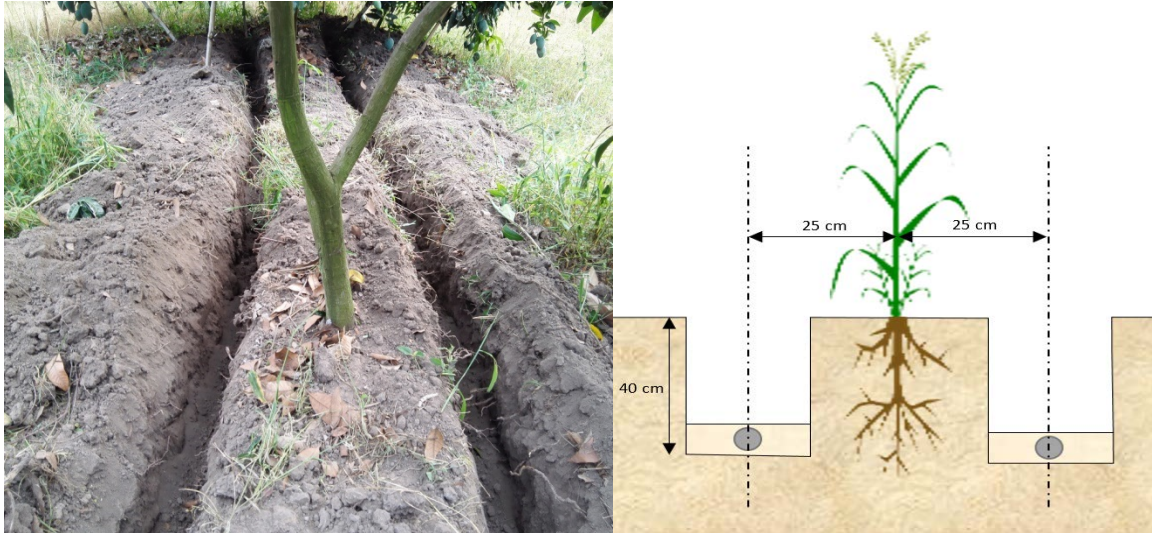


Abbildung 3: Ausheben der Rinnen für die Tonkörper-Leitungen

Die Rinnen, in denen sich die Tonkörper befanden, wurden sorgsam mit feinem Sand zugeschüttet, um eine Beschädigung der Tonkörper durch im Boden befindliche Steine zu vermeiden. Aufgrund der Position des Polytanks weist jede Baumreihe 4 Schlauchenden auf, die als einziger Teil der Tonkörper-Leitungen aus dem Boden an der Oberfläche herausgeführt wurden. Im Anhang ist die Anordnung der Bäume in Abbildung 19 und Abbildung 20 im Testfeld dargestellt.

3.2.2 Inbetriebnahme

Das Wasser für die Bewässerung wurde aus dem in der Nähe befindlichen Fluss Volta gewonnen. Für die Filterung des Wassers wurde ein faserhaltiges Textil verwendet, durch das das Wasser in den Polytank gegossen wurde. Die Zufluss-Apparatur war zu diesem Zeitpunkt geschlossen. Nach der Füllung wurde die Apparatur geöffnet und die Leitungen geflutet, wobei die Schlauchenden beobachtet wurden. Trat Wasser aus, war das System durchlüftet und die Enden wurden mit Endkappen abgedichtet. Bemerkbar waren der Wasseraustritt in Form von Tropfen auf der Oberfläche der Tonkörper (siehe auch im Anhang Abbildung 21). Das Bewässerungssystem arbeitete nun vollkommen selbstständig.

3.2.3 Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung des Bewässerungssystems waren örtliche Messpunkte festgelegt worden. Die Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der geplanten Messpunkte im Testfeld.

In Reihe 1 wurden Bodenfeuchtigkeit und pH-Wert an definierten Abständen zu einer Tonkörper-Reihe ermittelt. Dabei sollten insgesamt 9 Messpunkte in unterschiedlichen Tiefen die Wirkung des Bewässerungssystems auf den Bodenhorizont wiedergeben. Zum Einsatz kamen hier analoge und digitale Feuchtigkeitsmessgeräte, deren Messprinzip auf eine erzeugte Spannung zwischen zwei Elektroden in einem elektrisch leitfähigen Medium (hier Wasser im Boden) basiert. Das analoge Feuchtigkeitsmessgerät wurde fest in den aufgelockerten Boden am Grund des Bohrloches eingesteckt und Bodenfeuchte abgelesen. Zusätzlich verfügte es über eine pH-Wert Funktion, dessen Werte ebenfalls abgelesen werden. Das digitale Messgerät besaß 3 kabellose Sensoren, die die Bodenfeuchtigkeitswerte auch im vergrabenen Zustand an einem Empfänger senden konnten. Dies hatte den Vorteil, dass die Sensoren störungsfrei am definierten Ort messen konnten, ohne dass ein Ausgraben nötig war.

In Reihe 2 befanden sich die Messpunkte in 20 cm Abstand zum Stamm in Richtung der Pflanzenreihe und in 30 cm Bodentiefe. Auch hier wurden Bodenfeuchtigkeit und pH-Wert analog ermittelt.

Begleitend zur optischen Bewertung auf Algenbefall wurde das Bewässerungssystem (das darin enthaltende Wasser) auf pH-Wert und Nitrat-Wert überprüft. Hierzu wurde im 14-tägigen Abstand eine Wasserentnahme in Küvetten aus den Schlauchenden der 4 Tonkörper-Leitungen durchgeführt. Die Wasserqualität wurde anhand dieser Küvettenproben überprüft.

Die Ermittlung des Nitrat- und pH-Werts erfolgte mittels Photometer „Aqua Check“ der Firma Söll. Das Photometer arbeitet nach dem Prinzip des "Lambert Beers Law", nach dem die Lichtintensität einer bestrahlten Lösung von wellenlängenabhängigen Absorptionseigenschaften der Substanz, der Konzentration und der Länge des Lichtweges in der Lösung abhängt. Indikatorlösungen verfärben das zu prüfende Medium und zeigen damit den chemischen Zustand auf. Das Photometer verfügt über eine Lichtquelle und einem Sensor, der die Menge des durch die Probenflüssigkeit diffundierten Lichtes misst. Durch die Farbveränderung der Flüssigkeit bestimmt das Gerät möglichst genau die zu messende Ionenkonzentration.

Neben der entnommenen Küvettenprobe benötigte das Photometer zusätzlich eine Referenzprobe aus nicht für die Bewässerung vorgesehenem Wasser. In die Küvettenprobe wurde eine entsprechend der zu ermittelnden Ionenkonzentration vorgesehene Indikatorlösung mit einer festgelegten Anzahl an Tropfen gegossen. Nach der Verfärbung der Flüssigkeit wurde der Messaufnehmer des Gerätes erst in die Referenzprobe und dann die Küvettenprobe gehalten. Nach wenigen Sekunden konnte der Messwert abgelesen werden.


Die Bodenfeuchte wurde an vorgegebenen Positionen in einheitlich 15 cm Tiefe durch ein analog anzeigendes Messgerät ermittelt, das auf der Messung eines galvanischen Stromflusses zwischen 2 Elektroden beruht, der von der umgebenden Bodenfeuchte abhängt. Das analoge Messgerät zeigt einen Messwert an, sobald mehr als 24 Gewichtsprozent (Gew%) zusätzliches Wasser in den Boden hinzugefügt wurde (siehe Tabelle 1).

Ab 41,7 Gew-% zusätzliches Wasser gilt die Erde als „feucht“, ab 50 Gew-% Wasser als „sehr feucht“.

Zusätzlich wurde ein digitales Messgerät eingesetzt.

Tabelle 1: Zuordnung der Bodenfeuchtwerte des analogen Messgerätes zum zusätzlichen Wassergehalt im Laterit-Boden

Anzeige (analog)	zus. Gew.-Anteil H ₂ O
1	0 % - 24 %
2	40 %
3	41,7 %
4	43,3 %
5	45 %
6	46,7 %
7	48,3 %
8	50,0 %
9	51,7 %
10	53,3% - 100%



The image shows a green analog moisture meter. It has a circular scale with numbers 1 through 10. Below the scale, there are three colored zones: 'DRY' (red), 'MOST' (green), and 'WET' (blue). The needle is currently pointing to the number 6, which is in the 'MOST' zone. The words 'MOISTURE METER' are embossed on the front of the device.

Zur Ermittlung der örtlichen Saugspannung des Bodens (als Maß für dessen Feuchtegehalt) wurde an einem Messpunkt M1.2 ein Tensiometer mit analogem Unterdruck-Messgerät in die vorgegebene Bodentiefe eingebracht.

Zum Vergleich wurden im Kontrollfeld (gleiche Ausdehnung, gleiche Anzahl von Mango-Bäumen, in unmittelbarer Nachbarschaft zum Testfeld), das ausschließlich herkömmlich mit Oberflächenwasser bewässert wurde, ebenfalls Bodenfeuchtigkeit, pH-Wert und Saugspannung ermittelt.

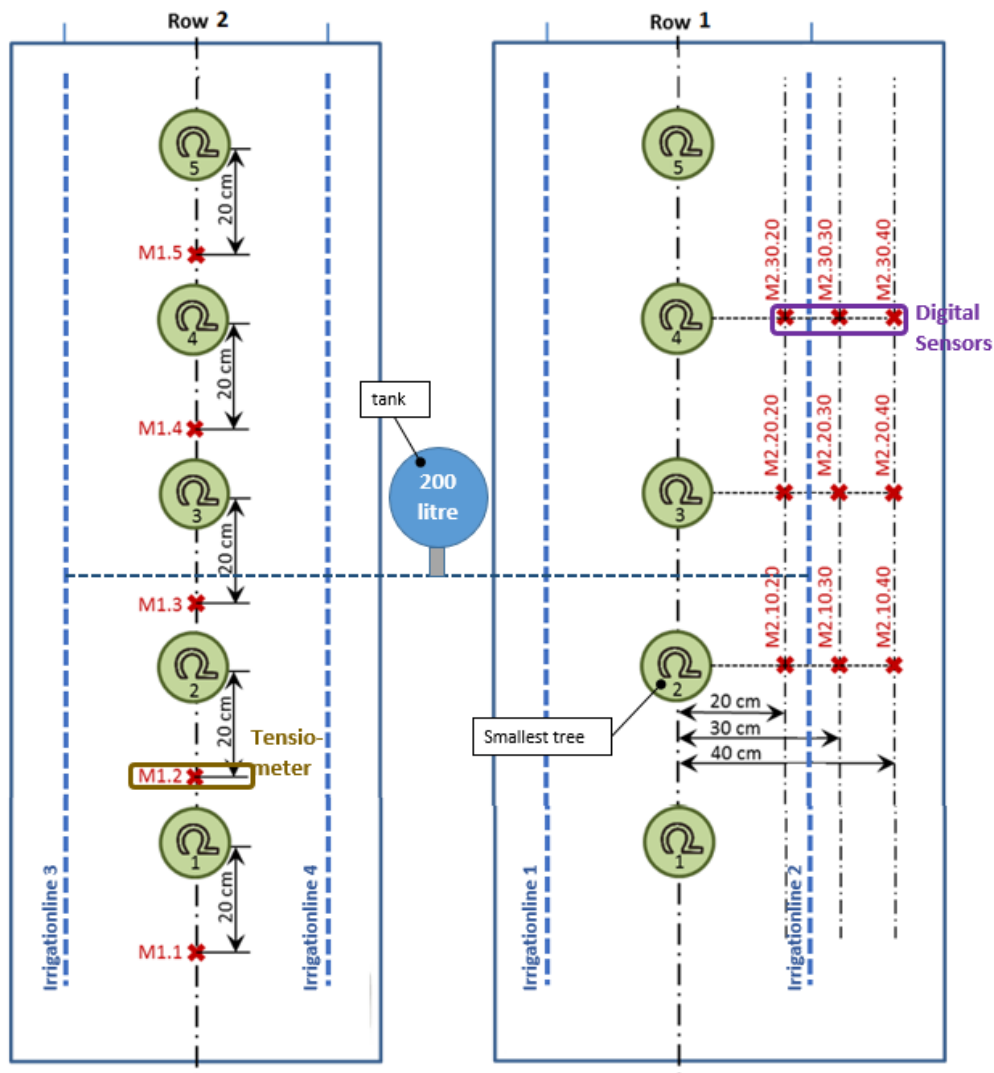


Abbildung 4: Testfeld: schematische Darstellung der Messpunkte unter Berücksichtigung der Lage der Tonkörper-Leitungen (irrigationlines)

Der Wasserverbrauch des Bewässerungssystems wurde in zweiwöchentlichem Abstand am Wasserlevel im Polytank mittels Messstab ermittelt (siehe auch im Anhang Abbildung 22). Wachstum und Fruchtgüte der Mangobäume wurden vom hiesigen Farmer begutachtet.

3.2.4 Auswertung der Messergebnisse

3.2.4.1 Wasserverbrauch

Nach der Installation und ersten Inbetriebnahme des Tonkörperbewässerungssystems war zunächst ein hoher Wasserdurchfluss von ca. 14 Liter/Tag zu verzeichnen. Nach der Sättigung des Bodens stabilisierte sich der Verbrauch zwischen 7,1 und 10,7 Litern/Tag. Hierbei waren auch Schwankungen des

Wasserverbrauches beobachtbar (Diagramm 2). Bezogen auf einen Tonkörper wurde nach einem anfänglich hohen Wert von ca. 239 ml/Tag ein Verbrauch zwischen ca. 119 und 178 ml/Tag gemessen (Diagramm 3).

Interpretation: Der zu Beginn des Versuchs zunächst höhere Wasserverbrauch ist vermutlich auf eine zu diesem Zeitpunkt noch hohe Saugwirkung des Bodenmaterials in der Umgebung der Tonkörper zurückzuführen. Dies ist auch dadurch erklärbar, dass die Bewässerungsleitungen zunächst in ein trockenes Sandbett eingelegt wurden und der die Tonkörper umgebende Boden nach Aushub zur Herstellung der Verlegungsrinne auf der Oberfläche zum Teil austrocknete, und erst im Verlauf der Zeit hinsichtlich seines Feuchtegehaltes wieder mit der Feuchte des nicht ausgehobenen Bodenmaterial im Gleichgewichtszustand war. Im weiteren Verlauf der Versuche ist die Wasserabgabe als eine Summe von Wasserentzug infolge der Saugwirkung der Pflanzenwurzeln, ggfls. auch Versickerung und Verdunstung zu verstehen. Verbrauchsschwankungen sind auf Niederschläge zurückzuführen, durch die der Boden auch in der Tiefe der Tonkörper zusätzliches Wasser erhielt und damit eine geringere Saugspannung aufwies.

Die Verbrauchsmessungen wurden über das Ende des eigentlichen Versuchszeitraumes hinaus fortgeführt. Auch in dieser Zeit ist der Wasserverbrauch, zeitlichen Schwankungen unterliegend, wie sie auch innerhalb der Versuchszeit registriert wurden, nicht abgefallen.

Dies kann als ein Indiz dafür gedeutet werden, dass die Funktionalität des Bewässerungssystems auch längerfristig nicht durch Algenbefall beeinträchtigt wurde.

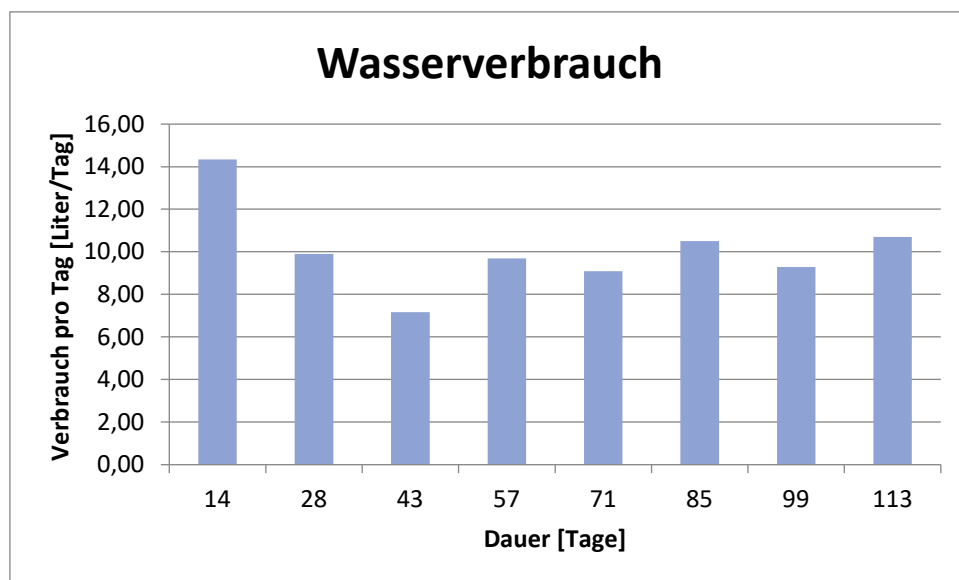


Diagramm 2: Wasserverbrauch für das Somanya Testfeld

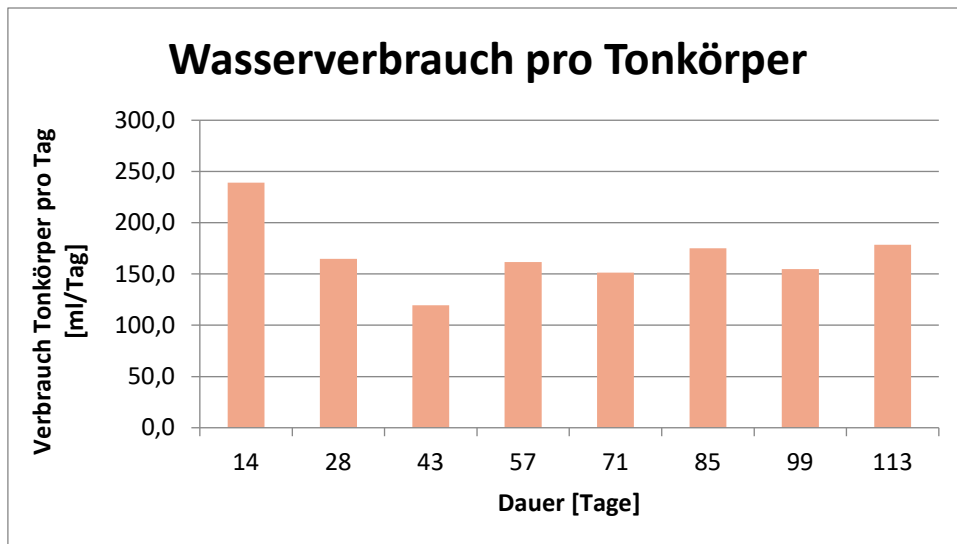


Diagramm 3: Wasserverbrauch bezogen auf einen Tonkörper für das Somanya-Testfeld

3.2.4.2 Bodenanalyse

Messung der Bodenfeuchte mit analogem Messgerät:

Bis auf zu Beginn (14 Tage) und am Ende der Messung (113 Tage) ergab sich, dass sich 24 Gew-% - 43,3 Gew-% zusätzliches Wasser ständig in dem Boden des Testfeldes und des Kontrollfeldes befand (Diagramm 4).

Eine Ermittlung des Einflusses der Tonkörper auf die Bodenfeuchtigkeit auf der Mango Plantage war damit kaum möglich. Zwischen Testfeld und Kontrollfeld waren kaum Unterschiede in den analogen Messwerten feststellbar.

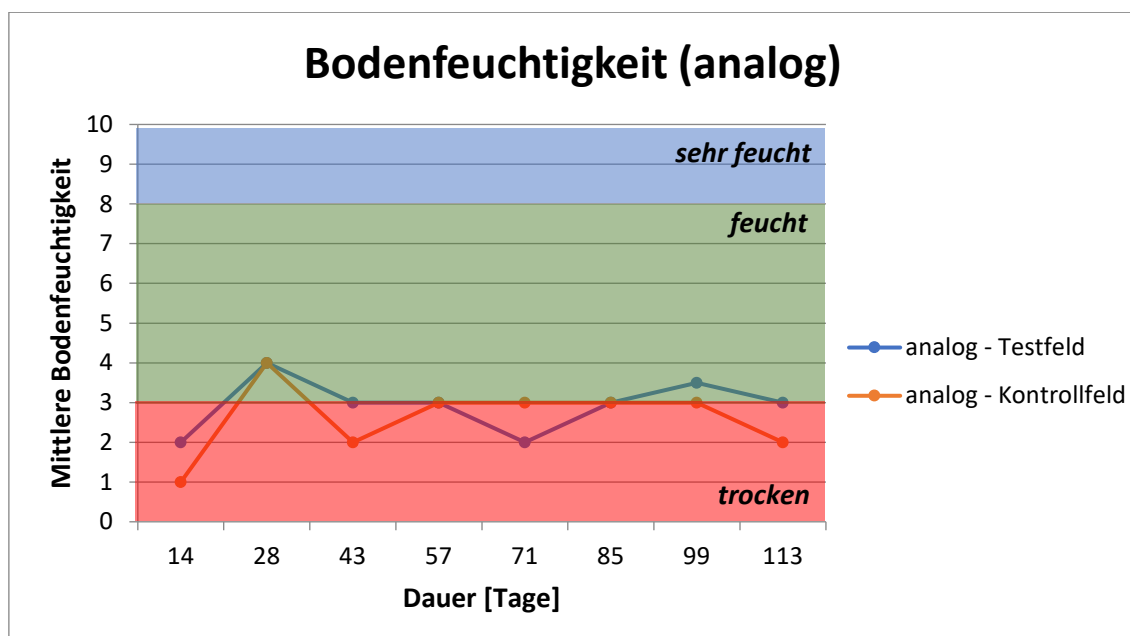


Diagramm 4: Bodenfeuchtigkeit analog im Somanya Testfeld

Messung der Bodenfeuchte mit digitalem Messgerät:

Das digitale Messgerät musste durch seinen Ausfall bei der zweiten Messung (28 Tage) durch ein weiteres ersetzt werden. Zu Beginn des Versuchs zeigte es 56 % an. Das neue Messgerät gab ab dem 43. Tag konstant den Wert von ca. 30 % an (Diagramm 5).

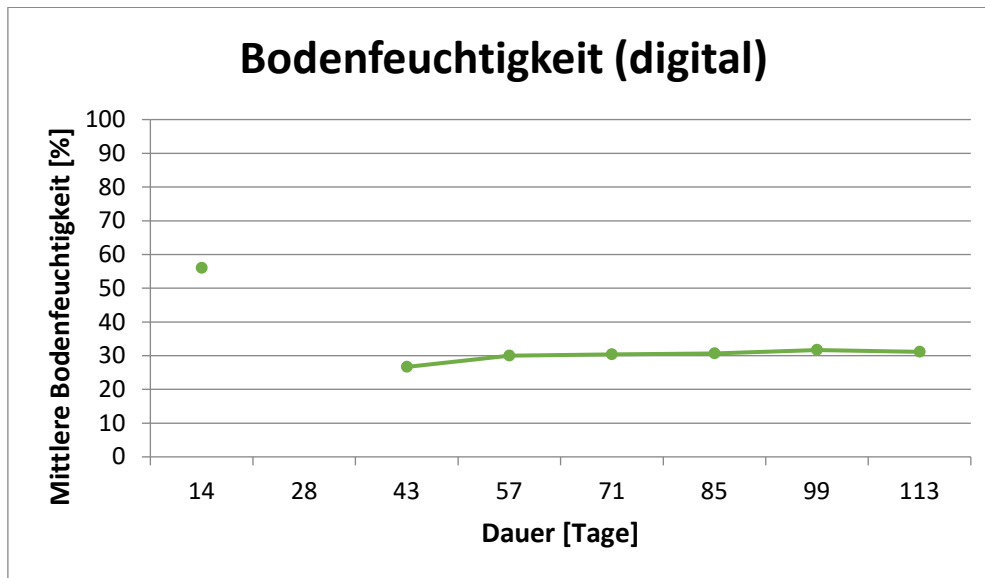


Diagramm 5: Bodenfeuchtigkeit digital im Somanya Testfeld

Interpretation: Die Tonkörper-Leitungen befanden sich in 40 cm Tiefe, aus denen Wasser regelmäßig austrat, wie der Wasserverbrauch bestätigte. Ein Teil des Wassers wurde durch das Wurzelgeflecht verbraucht. Wenn ein Großteil des abgegebenen Wassers in Richtung Bodenoberfläche bei Bodentemperaturen bis zu 30 °C bereits verdunstet, war die Messung des Bodens mit nur geringem Feuchtegehalt verständlich. Zudem ließen sich durch die trotz der ghanaischen Trockenzeit auftretenden Niederschläge genaue Aussagen zur Bodenfeuchteentwicklung zwischen Test- und Kontrollfeld nicht treffen.

3.2.4.3 Wasserqualität und Algenbefall

Das in den Schlauchleitungen befindliche Wasser war auf pH-Wert und Nitrat-Wert untersucht worden. Tabelle 1 gibt die aufgezeichneten Werte für jede der 4 Tonkörper-Leitungen über den gesamten Versuchszeitraum wieder. Diese zeigten bis zum Versuchsende keine signifikanten Veränderungen. Die pH-Werte schwankten zwischen 6,0 und 7,4. Der Neutralwert von Wasser liegt bei 7,0. Grund- und Regenwasser zeigten aufgrund des darin gelösten Kohlenstoffdioxids typischerweise einen leicht sauren pH-Wert zwischen 5,6 und 6,0.¹⁰ Die nur geringen Schwankungen um den Neutralwert des Wassers ergaben während der gesamten Versuchsdauer weder eine Unter- und Übersäuerung des in den Schlauchleitungen befindlichen Wassers.

¹⁰ Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

Tabelle 2: pH-Werte und Nitrat-Werte des Wassers in den Tonkörper-Leitungen

date	Test field 2				Test field 1			
	Irrigation line 1		Irrigation line 2		Irrigation line 3		Irrigation line 4	
	pH	NO3- [mg/l]	Ph	NO3- [mg/l]	pH	NO3- [mg/l]	pH	NO3- [mg/l]
01.12.2017	7,4	6	7,3	6	6,7	6	6,3	6
15.12.2017	7	6	7	6	6	6	6	6
30.12.2017	6,9	6	6,1	6	6	6	6,8	6
13.01.2018	6,1	6	6	6	6	6	6,8	6
27.01.2018	6,3	6	6,3	6	6,1	6	6,1	6
10.02.2018	6,1	6	6,1	6	6	6	6	6
24.02.2018	6,5	6	6,5	6	6	6	6	6
10.03.2018	6,5	6	6,5	6	6,5	6	6,5	6

Der Nitrat-Wert zeigte zudem einen niedrigen konstanten Wert von 6 mg/l an. Hohe Nitrat-Werte sind oft Hinweise auf eine Belastung des Wassers durch organische Substanzen. Grün- und Fadenalgen benötigen neben dem Sonnenlicht Nährstoffe wie Nitrate und Phosphate aus dem Wasser.¹¹ Da der Nitrat-Wert konstant blieb, ist eine rasche Algenausbreitung hieraus nicht anzuleiten.

Dennoch verfärbten sich die Schläuche im Kontrollbereich (Anschluss Polytank zu Bewässerungsleitungen) mit der Zeit grünlich, was nur durch Algenbefall zu erklären ist. Die vorgefundenen Verfärbungen lassen erkennen, dass sich Algen offenbar bevorzugt an den Orten ansiedelten, an denen sie aufgrund verringerter Strömungsgeschwindigkeit an Oberflächen anhaften können. Spalten und Hinterschneidungen waren besonders betroffen.

Transparente Schläuche, die direkt (am Auslassventil des Polytank) oberhalb der Bodenoberfläche angeordnet waren, waren naturgemäß eher der Sonneneinstrahlung ausgesetzt, als erdverlegte Teile des Bewässerungssystems. Die Algenbildung war tatsächlich stärker in diesem Teil des Bewässerungssystems im Vergleich mit dem erdverlegten Teil zu beobachten. Nicht transparente Schläuche könnten hier bereits Abhilfe schaffen.

Trotz der Algenbildung war das Tonkörper-Schlauchleitungssystem bis zum Ende des Versuchs mit einer Dauer von ca. 3,5 Monaten immer noch funktionstüchtig und eine Beeinträchtigung der Bewässerungsleistung war nicht erkennbar. Der Wasserdurchfluss sowie die Wasserqualität waren über den gesamten Beobachtungszeitraum und auch noch einige Monate darüber hinaus konstant.

¹¹ Knop (2016) S. 20ff

3.2.4.4 Güte der Früchte

Die Betrachtung der pflanzlichen Entwicklung war für die Mango-Bäume auf der Farm schwierig. Die Höhe dieser Pflanzen konnte nicht als Maß für die Entwicklung von Biomasse ausgewertet werden, da die Äste durch das Gewicht der Früchte nach unten gezogen wurden. Sie mussten oftmals abgestützt werden (Abbildung 5). Die Mangos hatten sich während der gesamten Versuchsdauer gut entwickelt. Ein Unterschied zu den Früchten im Kontrollfeld war nicht erkennbar.

Infolge der Rinnenaushebung zum Verlegen der Schlauchleitungen war das Wurzelgeflecht der Bäume im Testfeld sichtbar geschädigt worden. Es wurde jedoch keine Beeinträchtigung der Pflanzenqualität festgestellt.



Abbildung 5: Mangofrüchte zum Ende der Versuchsdauer

3.3 Feldstudie - Vume

Die Stadt Vume liegt im Osten Ghanas, etwa 30 km nahe der Küste. Sie ist geprägt von dem Handel und der Fertigung von Tonkrügen. Die klimatischen Bedingungen (Diagramm 6) weichen von denen in Somanya (vergl. Diagramm 1 im Kapitel 3.2) kaum ab.

Das Tonkörper-Bewässerungssystem wurde hier mit gleichem Aufbau, wie für Somanya (40 cm Abstand der Tonhülsen) für die Bewässerung von Gemüse in einem Gewächshaus installiert. Der Anbau von Gemüse in tropischen Gebieten ist durch den kritischen Einfluss der Sonnenstrahlung, auftretende Parasiten und hohen Wasserbedarf der Pflanzen vergleichsweise schwierig.

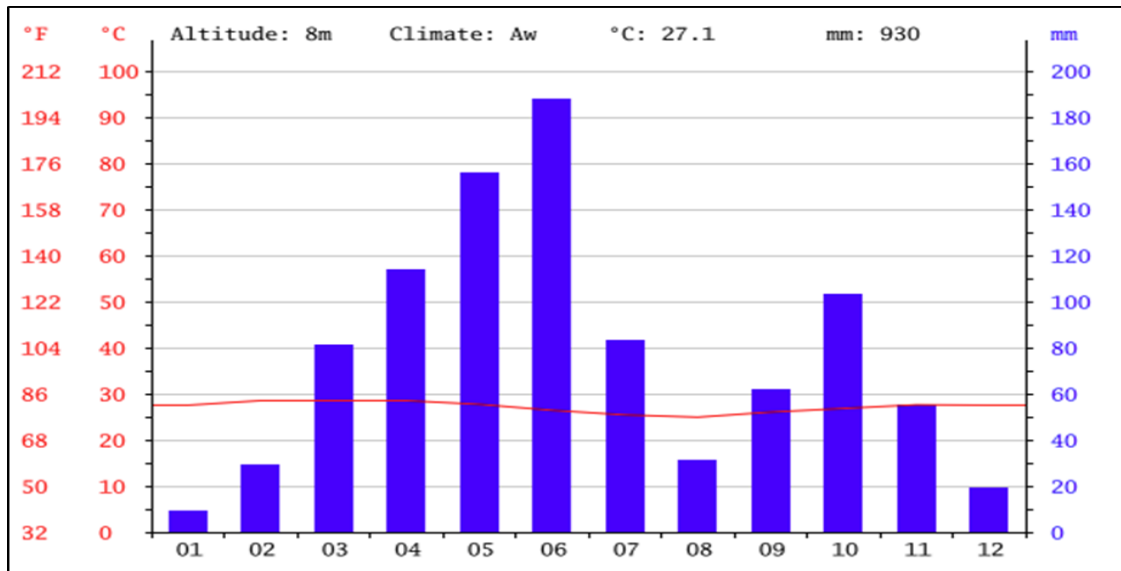


Diagramm 6: Klimatische Daten von Sogakope (2 km von Vume)¹²

Messungen und Evaluierungen an einem Testfeld wurden durch eine örtliche deutsche Familie durchgeführt. Die Beobachtung des Algenwachstums beschränkte sich hier jedoch auf die optische Begutachtung der transparenten PE-Schläuche in unregelmäßigen Abständen in einem Zeitraum vom Einpflanzen in dem Boden bis zur Ernte des Gemüses.

3.3.1 Planung und Installation

Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit pro Tag in Vume liegt bei 75 % - 85 %. Das Versuchsfeld lag in einem Gewächshaus, in dem die Luftfeuchtigkeit von über 90 % diese noch übersteigt. Die Strahlungsintensität in den tropischen Gebieten war um ein Vielfaches höher als in der gemäßigten Zone. Die Photosyntheseleistung der Pflanzen kann nach Überschreitung des Lichtsättigungspunktes nicht mehr gesteigert werden.¹³ In der Zeit zwischen Sonnenaufgang- und -untergang wurden häufig Beleuchtungsstärken von mehr als 200.000 LUX gemessen, in den Pflanzen unter Photodestruktion leiden, die an die örtlichen hohen Lichtintensitäten nicht angepasst sind. Daher war das Gewächshaus, in dem das Testfeld und ein Kontrollfeld installiert wurde, mit einem Netzfilter zur Reduzierung der Lichtintensität ausgestattet.

Verschiedene Arten von Gurken wurden in zwei abgesteckten Reihen gepflanzt. Jede Pflanzenwurzel erhielt an zwei Seiten je einen Tonkörper. Bei 22 Gurkenpflanzen kamen damit 44 Tonkörper zum Ein-

¹² Gesammelte Klimatische Daten 1982-2012

¹³ Smith et al (2009) S.145-147

satz, die sich auf 4 Tonkörper-Leitungen verteilen (Abbildung 6). Auch hier kam ein für Sonnenstrahlung undurchlässiger 200-Liter-Polytank zum Einsatz, an dem im unteren Viertel des Tanks eine Zulauf-Apparatur installiert wurde. An dieser wurden die Schlauchleitungen über T-Stücke und gerade Leitungsverbinden angeschlossen. Auch hier wurden die transparenten Schlauchreste oberhalb der Bodenoberfläche vor der Sonneneinstrahlung abgedeckt.

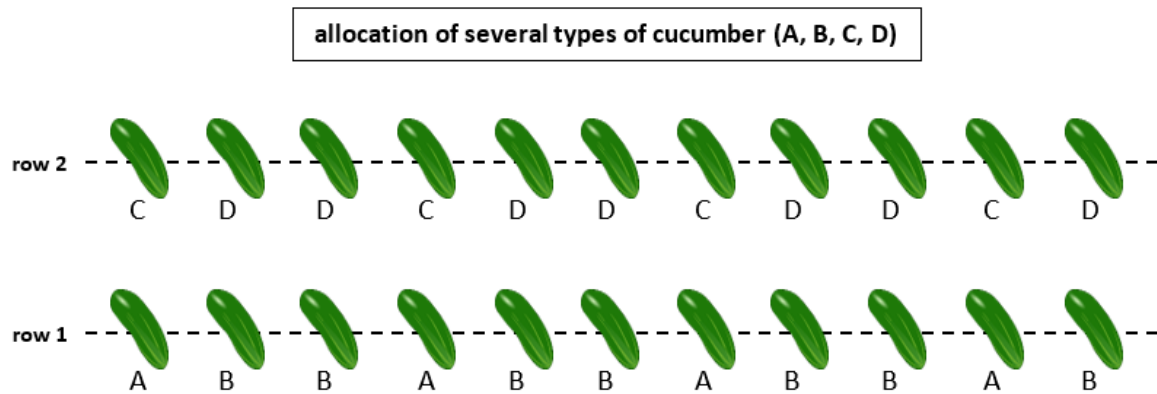


Abbildung 6: Anordnung der verschiedenen Gurkenarten

Unter Berücksichtigung der Wurzeltiefe wurden die Tonkörper in 20 cm Bodentiefe verlegt.

Aufgrund des bekanntermaßen hohen Wasserbedarfes der Gurken wurden die Gurkenpflanzen mit jeweils 2 Bewässerungsleitungen versorgt. Hierbei wurde ein links- und rechtsseitiger Abstand von 20 cm der Tonkörper-Leitungen zur Pflanze festgelegt (Abbildung 7).

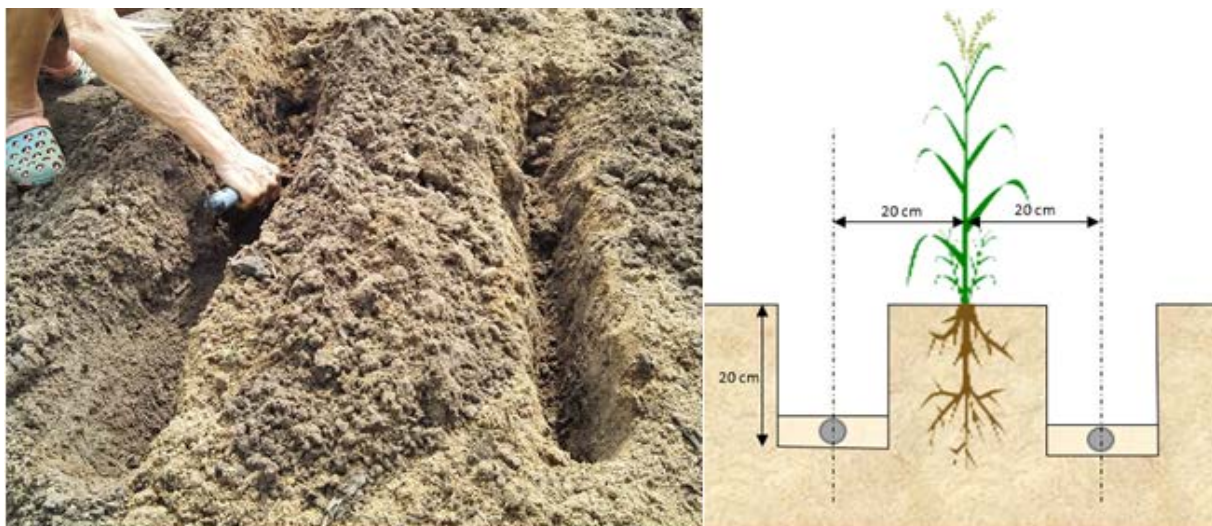


Abbildung 7: Ausheben der Rinnen für die Tonkörper-Leitungen

3.3.2 Inbetriebnahme

Vor der Inbetriebnahme des Bewässerungssystems erfolgte eine vorherige Aufzucht der Gurkenpflanzen in separaten Töpfen im Gewächshaus damit die Wurzel stark genug war, sich selbstständig das Wasser aus dem nährstoffarmen Boden im Gewächshaus zu ziehen. Zudem verhinderte diese Maßnahme ein Eingehen der sensiblen Pflanzen durch die extremen klimatischen Bedingungen im Gewächshaus.

Wie auch in Somanya wurde der Polytank mit Wasser bei geschlossenem Zulauf-Hahn gefüllt. Erst dann wurde der Zulauf geöffnet und die Schlauchenden beobachtet. Nach der Entlüftung der Leitungen wurden die Schlauchenden mit Endkappen abgedichtet. Das Tonkörpersystem arbeitete nun autark.

3.3.3 Versuchsdurchführung

Auch im Gewächshaus wurden an vorgegebenen Messpunkten (Abbildung 8) Bodenfeuchtigkeit sowie pH-Werte über den Versuchszeitraum hinweg gemessen. In Reihe 1 befanden sich 5 definierte Messpunkte zwischen den Pflanzen in Richtung der Pflanzenreihe und in 20 cm Bodentiefe. Wie in Somanya wurden hier Bodenfeuchtigkeit und pH-Wert analog ermittelt. Die Saugspannung des Bodens wurde an einer Position (Messpunkt 1.2) mit einem Tensiometer gemessen.

In Reihe 2 befanden sich insgesamt 9 Messpunkte für die Messung der Bodenfeuchtigkeit in unterschiedlichen Tiefen, die Aufschlüsse über Wirkung des Bewässerungssystems auf den Bodenhorizont wiedergeben. Zum Einsatz kamen auch hier analoge und digitale Feuchtigkeitsmessgeräte. Bodenfeuchte und pH-Werte wurden während Versuchszeitraumes aufgezeichnet. Das digitale Messgerät mit seinen 3 kabellosen Sensoren nahm die Messwerte an den Punkten M2.30.20, M2.30.30 und M2.30.40 in 30 cm Bodentiefe auf.

Der Wasserverbrauch wurde auch hier am Wasserstand des Polytanks gemessen. Pflanzenwachstum und Fruchtgüte sowie der Algeneinfluss auf das Leitungssystem wurden optisch betrachtet.

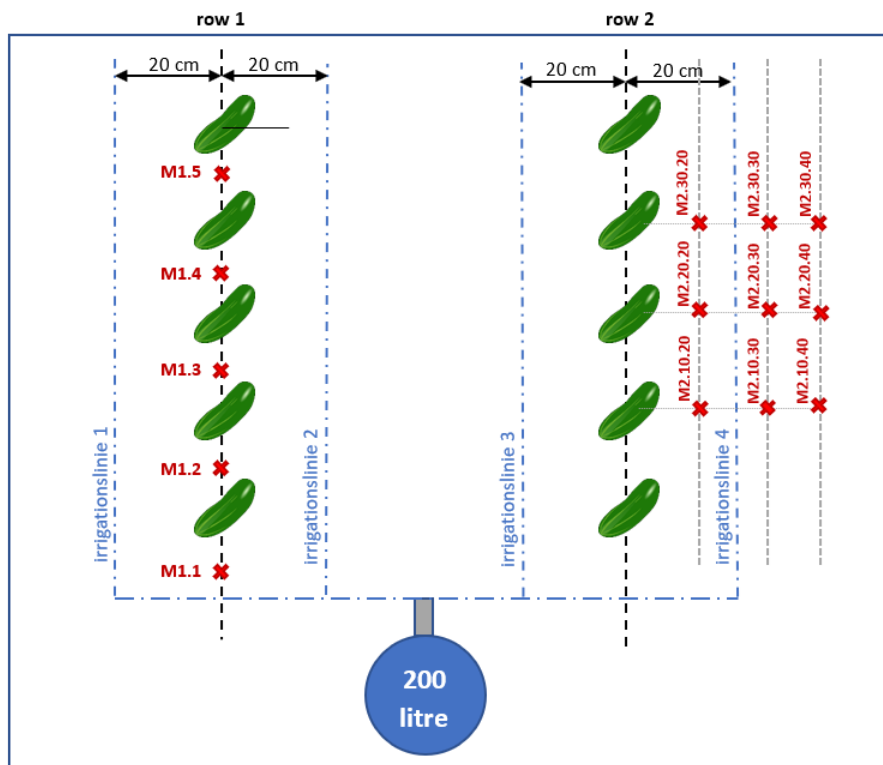


Abbildung 8: Anordnung der Messpunkte im Testfeld

3.3.4 Auswertung der Messergebnisse

Die Ernte der ersten Bepflanzung erfolgte nach 30 Tagen. Die Versuche mussten entgegen der Versuchsplanung, die auch hier einen Versuchszeitraum 10 Wochen vorgesehen hatte, nach 48 Tagen wegen eines plötzlich eingetretenen Parasitenbefalls abgebrochen werden. Die geplante Auswertung einer zweiten Bepflanzung konnte daher nicht mehr erfolgen.

3.3.4.1 Wasserverbrauch

In den ersten Tagen war ein hoher Wasserverbrauch von ca. 6,5 Liter pro Tag (325 ml pro Tonkörper) zu verzeichnen. Im weiteren Verlauf sank der Wasserverbrauch zunächst auf 3,9 – 4,0 Liter am Tag (195 – 200 ml pro Tonkörper), fiel nach 36 Tagen jedoch ab (Diagramm 7).

Interpretation: Der zu Beginn des Versuchs zunächst höhere Wasserverbrauch ist vermutlich auf eine zu diesem Zeitpunkt noch hohe Saugwirkung des Bodenmaterials in der Umgebung der Tonkörper zurückzuführen. Dies ist auch dadurch erklärbar, dass die Bewässerungsleitungen zunächst in ein trockenes Sandbett eingelegt wurden und der die Tonkörper umgebende Boden nach Aushub zur Herstellung der Verlegungsrinne auf der Oberfläche zum Teil austrocknete, und erst im Verlauf der Zeit hinsichtlich seines Feuchtegehaltes wieder mit der Feuchte des nicht ausgehobenen Bodenmaterial im Gleichgewichtszustand war. Im weiteren Verlauf der Versuche ist die Wasserabgabe als eine Summe von Wasserentzug infolge der Saugwirkung der Pflanzenwurzeln, ggfls. auch Versickerung und Verdunstung zu verstehen. Verbrauchsschwankungen sind auf Niederschläge zurückzuführen, durch die der Boden auch in der Tiefe der Tonkörper zusätzliches Wasser erhielt und damit eine geringere Saugspannung aufwies.

Die klimatischen und ökologischen Bedingungen im Gewächshaus sind jedoch von denen der Farm in Somanya zu unterscheiden. Neben der hohen Luftfeuchtigkeit bestimmten folgende Einflussfaktoren zum Teil die Werte des Wasserverbrauchs:

Zum erfolgreichen Wachstum der empfindlichen Gurkenpflanzen war der Einsatz von Düngemittel mit hohem Wasseranteil eine kurze Zeit lang erforderlich gewesen. Abwechslungsreiche Niederschläge beeinflussten zudem die Bodenfeuchte.

Nach ca. 38 bis 40 Tagen wurde eine strukturelle Veränderung des Bodens feststellbar. Der anfänglich für die Pflanzenzucht aufgelockerte Boden hatte sich deutlich verdichtet und verhärtet. Gerade Laterit-Boden hat die Eigenschaft, ähnlich wie Lehmerde, sich bei Wasserentzug stark zusammenzuziehen und zu verfestigen. Dies erhöht den Benetzungswiderstand, was zur Folge hat, dass Wasser behindert wird, sich überall hin auszubreiten.¹⁴ Damit korreliert die Beobachtung des geringer werdenden Wasserverbrauchs zum Ende des Versuchs mit der Beobachtung der Bodenverdichtung.

¹⁴ Densch et al (2013) S.240ff

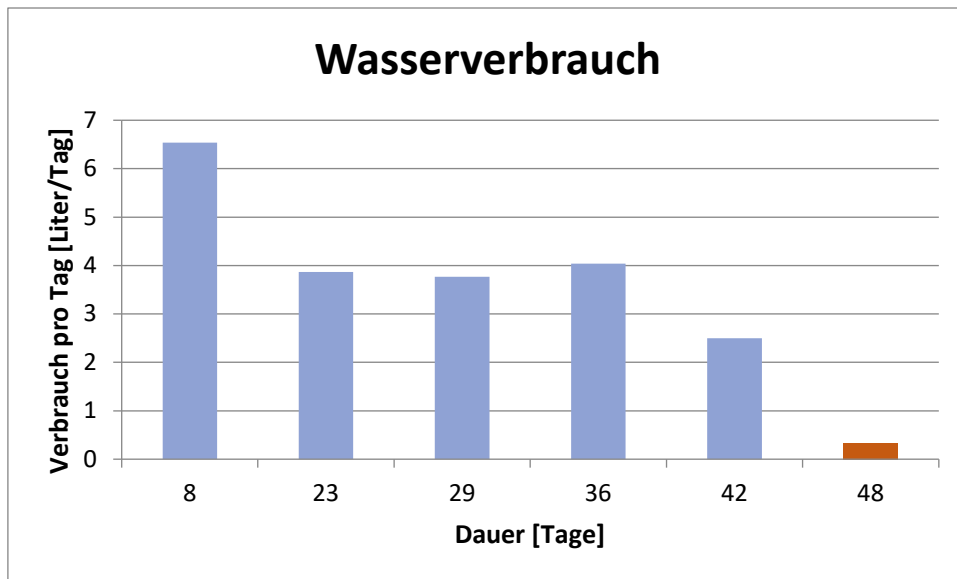


Diagramm 7: Wasserverbrauch für das Vume Testfeld

3.3.4.2 Bodenanalyse

In Diagramm 8 und Diagramm 9 sind die mittleren Bodenfeuchtigkeitswerte analog und digital in Abhängigkeit der Versuchsdauer dargestellt. An den ersten Tagen des Versuchs zeigte der noch aufgeloockerte Boden eine hohe Bodenfeuchtigkeit.

Die analogen Messwerte beider Versuchsreihen unterschieden sich nur geringfügig. Die Anzeige des analogen Messinstrumentes zeigte bei einer minimalen Zugabe von 24 Gewichtsprozent (Gew-%) Wasser in den Boden Werte von >1 an, währenddessen es seinen maximalen Anzeigewert 10 bei mindestens 53,3 Gew-% zusätzliches Wasser erreicht (siehe Kapitel 3.2.4.2). Mit knapp unter 10 auf der Skala war die Erde also sehr feucht. Dies bestätigte auch das digitale Messgerät mit bis zu 96 % Feuchtigkeit.

Mit fortschreitender Zeit sanken diese Werte leicht ab. Nach 23 Tagen wurde immer noch ein Skalenswert von 7,8 – 8,2 (49 – 51 Gew-% zusätzlicher Wasseranteil) festgestellt.

Die Erntezeit für Gurken liegt im Gewächshaus Vume bei durchschnittlich etwa 30 Tagen. In dieser Zeit lagen die digitalen Feuchtigkeitswerte immer noch über 77 %. Reihe 1 zeigte einen stärkeren Abfall im analogen Messwert gegenüber Reihe 2 an, der sich jedoch bis zum 36. Tag wieder stabilisierte. Dennoch war eine Tendenz einer zeitabhängigen sinkenden Bodenfeuchtigkeit bei beiden Messgeräten erkennbar. Bis zum Ende des Versuches fielen die Messwerte sogar noch stärker ab. Die analogen Messwerte lagen zwischen 3,4 und 3,9, was bedeutet, dass der zusätzliche Wasseranteil im Boden bei nur noch bei 30 – 37 % lag. Dieser starke Abfall ließ sich auch beim digitalen Messwert (71 %) beobachten.

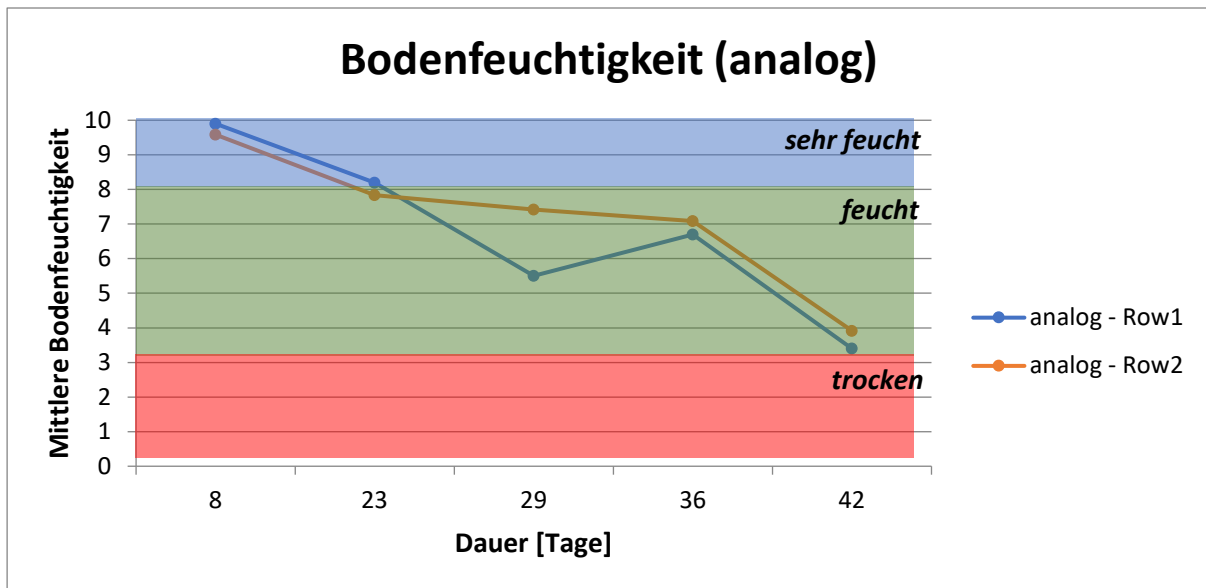


Diagramm 8: Bodenfeuchtigkeit analog im Vume Testfeld

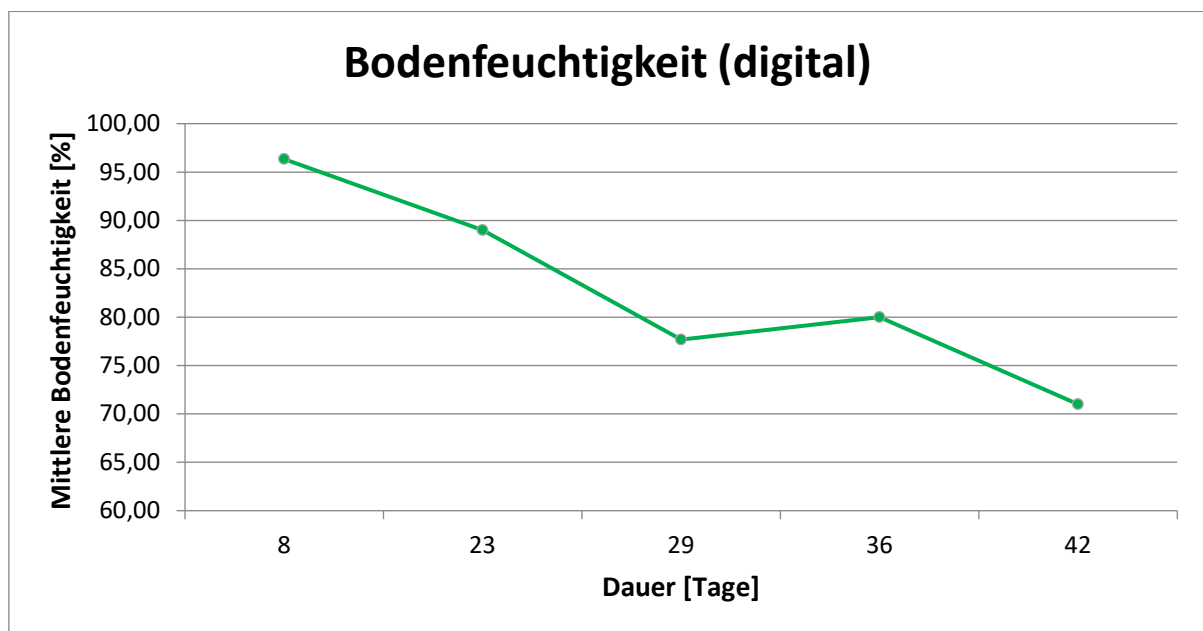


Diagramm 9: Bodenfeuchtigkeit digital im Vume Testfeld

Auch diese Beobachtung konnte auf die strukturelle Veränderung des Bodens zurückgeführt werden. Am 48. Tag war es durch die harte Bodenoberfläche nicht mehr möglich gewesen, den analogen Sensor unbeschädigt in die Erde zu platzieren. Daher sind Messwerte nicht mehr ermittelt worden.

Die ermittelten pH-Werte aller Messpunkte hatten sich während der gesamten Versuchszeit kaum verändert. Sie schwankten zwischen 6,5 und 8,0. Eine Alkalose des Wassers war nicht feststellbar gewesen. Jedoch war eine genauere Untersuchung nur unter Laborbedingungen möglich.

Das Tensiometer lieferte die ersten 14 Tage brauchbare Werte bevor die Funktionalität nicht mehr vorhanden war. In dieser Zeit war ein Anstieg von 37 mbar pro Tag zu verzeichnen.

Die aufgezeichneten Messwerte waren Schwankungen über die Dauer des Versuchszeitraumes ausgesetzt. Diese gingen so weit, dass die Aussagekraft über die Wechselwirkung der Tonkörper mit dem

umgebenden Bodenmedium zu den festdefinierten Orten (Messpunkte) schwierig ist und einen Vergleich untereinander unmöglich macht.

Zur Bekräftigung hatten folgende Faktoren erheblichen Einfluss:

- Heterogenität des Bodens
Lunker, Korngröße und Wasseraufnahmeverhalten verschiedener Stoffe im Boden beeinflussen die Messwertaufnahme der eingesetzten Gerätschaften.
- Analoges Feuchtemessgerät
Die Nicht-Kalibrierbarkeit des analogen Gerätes kann zu weiteren Schwankungen führen, speziell wenn sich die beobachteten Werte nur geringfügig ändern. Zudem bilden die Metalle der Elektroden eine Oxidationsschicht im Kontakt mit sauerstoffreichem Wasser, das zu Abweichungen in den Messwerten führen kann.
- Digitales Feuchtemessgerät
Ähnliche Gegebenheiten wie beim analogen Gerät.
- Feldstudien

Eine exakte Untersuchung gestaltet sich bei Feldstudien schwierig, da keine definierten Laborbedingungen gegeben sind. Unter anderem waren Analysen von Volumenproben zur Ermittlung des Wassergehaltes in diesen Gebieten nicht durchführbar gewesen. Die Bodenfeuchtemessgeräte konnten den Feuchtegehalt nur im direkten Kontakt ihres Sensors zum elektrisch leitenden Medium messen.

3.3.4.3 Algenbefall

Trotz des zur Verfügung gestellten gefilterten Wassers hatten sich nach wenigen Wochen erste Anzeichen von Algenbildung im Inneren der PE-Schläuche gezeigt. Besonders an Spalten und Hinterschneidungen des Schlauchsystems waren Ansammlungen von Algen erkennbar (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Algenbildung im Bereich der über dem Erdboden gelegenen Schläuche

Interpretation: Die klimatischen Bedingungen zum Algenwachstum (hohe Feuchtigkeit, hohe Temperatur) waren äußerst günstig, so dass sich dies in eine rasche Vermehrung der Algen widerspiegelt. Durch den Bedarf an Kohlendioxid aus den gelösten Hydrogencarbonaten, war ein einsteigender pH-

Wert im Wasser zu erwarten. Jedoch wurde dies bei der Bodenanalyse nicht bestätigt. Offenbar konnten sich Algen an den Orten strömender Flüssigkeiten weniger gut ausbreiten. Bei Hinterschneidungen und Spalten hingegen konnten sich Algen besser anlagern. Dies war auch an den inneren Schlauchwänden der Fall.

Dennoch behinderte die vermehrte Algenbildung die Bewässerung Gurken und damit das Wachstum nicht innerhalb des Versuchszeitraumes nicht.

Das Schlauchsystem im Boden hatte eine weitgehend geringere oder kaum eine Grünverfärbung als die Verbindungsschläuche zur Zulauf-Apparatur. Offenbar reichte ein kleiner Spalt, Lichtreflexion anderer Bauteile bzw. das kleine Zeitfenster der Schlauchüberprüfung aus, so dass das Algenwachstum erheblich ist.

3.3.4.4 Fruchtgüte

Die vom Tonkörper-System bewässerten vielfältigen Gurkenfrüchte (siehe Abbildung 10) waren nach Begutachtung voluminöser als die Gurkenfrüchte, die auf herkömmliche Weise durch Gießen bewässert wurden. Offenbar wurde ausreichend Wasser vom Tonkörper-System zum idealen Pflanzenwachstum abgegeben. Bodentiefe und Abstand der Tonkörper zur Pflanze waren für die Wurzeln optimal. Aufkommende Algenbildung im Schlauchsystem war für die Entwicklung der Pflanzen nicht nachteilig. Bereits nach etwa 30 Tagen erfolgte die Ernte. Nachfolgende Messungen von weiteren Gewächsen waren aufgrund von parasitärem Befall und der in inzwischen starken Verfestigung des Bodens nicht mehr möglich. Die Entwicklungsstadien der Gurkenpflanzen sind im Anhang in Abbildung 24 bis Abbildung 27 ersichtlich.



Abbildung 10: mit Tonkörper-System bewässerte Gurkenfrüchte nach 6 Wochen

3.4 Erkenntnisse aus den Feldstudien

Wasserverbrauch

Die eingesetzten neuartigen Tonkörper-Bewässerungssysteme in den Feldstudien in Somanya (freies Feld) und Vume (Gewächshaus) versorgten die Pflanzen mit dem für ihr Wachstum benötigten Wasser in jedem Falle ausreichend. Je nach Wasserbedarf der Pflanzen lieferte das Bewässerungssystem erfolgreich das notwendige Wasser. Jedoch ist der Einfluss der örtlichen klimatischen Verhältnisse und der strukturellen Bodenbeschaffenheit auf den Verbrauch und die Saugwirkung der Systeme zu berücksichtigen.

Tabelle 3: Wasserverbrauch der Testfelder Somanya und Vume

	Wasserverbrauch	Anzahl der Pflanzen	Wasserverbrauch pro Pflanze
SOMANYA (Mangos)	ca. 9 ½ Liter/ Tag	10 Bäume	ca. 950ml/ Tag
VUME (Gurken)	ca. 4 Liter/ Tag	22 Gurkengewächse	ca. 180ml/ Tag

Die gemessenen Verbrauchswerte (Tabelle 3) bestätigen die gegenüber der überirdischen Tropfbewässerung äußerst geringen für die Mikrobewässerung erforderlichen Wassermengen. Auch erscheint der Mehrverbrauch pro Pflanze bei Mangobäumen gegenüber Gurkenpflanzen plausibel.

Interpretation: Eine Oberflur-Bewässerung hat den entscheidenden Nachteil, dass ein Großteil des Wassers bereits auf der Bodenoberfläche durch die hohen Temperaturen verdunstet, bevor es versickern kann. Auch herkömmliche Pumpensysteme, die perforierte Schlauchleitungen im Boden versorgen, verbrauchen mehr Wasser, da die Pflanzen nur eine bestimmte Menge an Wasser benötigen, die diese Systeme nicht feststellen können. Die restliche Menge verdunstet bzw. versickert.

Algenbefall

Algenbefall der Mikrobewässerungssysteme trat in beiden Testfeldern auf. Die vorgeschalteten Filter sind nicht in der Lage, einzelne Algensporen vor dem Eintritt in das Bewässerungssystem auszufiltern. Hierzu wäre der Einsatz von relativ teuren Keramikfiltern mit einem Porendurchmesser $< 1 \mu\text{m}$ erforderlich. Trotz der Algenbildung in den Schlauchleitungen beider Testfelder blieben die Systeme funktionstüchtig.

Das Algenwachstum vollzog sich vorwiegend in dem Bereich der oberhalb des Bodens gelegenen Schlauchanbindungen. Diese konnten anscheinend nicht immer vor Sonneneinstrahlung abgeschirmt werden. Bereits wenige Augenblicke der Sonnenbestrahlung bzw. Reflexionen durch andere nicht vollständig absorbierende Bauteile können ausreichen, das Algenwachstum anzuregen.

Die Erträge bzw. Fruchtgüte waren bei beiden Studien gut. Im Gewächshaus war der Ertrag an Gurken durch größere Früchte als nach herkömmlicher Anpflanzung gekennzeichnet. Allerdings war der Einsatz der Tonkörper in Gewächshäusern zeitlich eingeschränkt, da sich der Boden strukturell durch die gegebenen Bedingungen (hohe Luftfeuchte, hohe Temperatur) veränderte. Auf freiem Feld in Somanya war dieser Effekt weniger wahrnehmbar.

3.5 Untersuchung der Saugspannung des Laterit-Bodens unter Laborbedingungen

Zur Vorbereitung der in der Klimakammer geplanten Untersuchungen zur Mikrobewässerung unter definierten Bedingungen wurde zunächst laterithaltiger Modellboden durch Abmischen von kommerziell erhältlichem Laterit (Zac-Laterit ZZ015110) mit 20 % w/w Quarzsand mit hoher Reinheit (93 %) der Körnung 100 – 400 µm und 40 % durch Silikat-Verwitterung entstandene Tonminerale hergestellt. Lateritische Böden besitzen neben Tonmineralien und Silikaten einen hohen Anteil an Aluminium- und Eisenoxiden, die dem Boden seine typische rotbraune Farbe geben. Aufgrund des Wechsels zwischen Regen- und Trockenzeit bei hoher Temperatur in Ghana ist die chemische Verwitterung intensiv.¹⁵ Der eingesetzte Laterit-Anteil im Modellboden wies augenscheinlich eine breite Körngrößenverteilung auf.

Angestrebt wurde hierbei eine Boden-Zusammensetzung, die eine Ähnlichkeit zu den in Ghana anzufindenden Böden aufweist, da die direkte Beschaffung der Böden in für die geplanten Versuche in der Klimakammer ausreichender Menge (ca. 3 m³) nicht wirtschaftlich erschien und daher zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht geplant war.

An diesem Modellboden sollte die Feuchte, die durch das Mikrobewässerungssystem aufrechterhalten wurde, über die Messung der Saugspannung des Bodens verfolgt werden¹⁶.

Die Saugspannung von Böden hängt in Abhängigkeit von ihrem Wassergehalt deutlich von der Zusammensetzung des Bodens ab (Diagramm 10). Die Saugspannung von Sandböden fällt im Vergleich zu fetteren Böden, wie Schluff und Lehm (Ton) mit zunehmendem Wassergehalt wesentlich schneller ab. In Sandböden fällt die Saugspannung schon bei kleineren Wassergehalten (> 5 %) erheblich ab, während in Tonböden die Saugspannung erst bei Wassergehalten > 50 % derart abfällt. Die Abhängigkeit der Saugspannung des Modellbodens vom Wassergehalt sollte daher als Referenzkurve für die kontinuierliche Messung der Bodenfeuchtigkeit während der Mikrobewässerungsversuche in der Klimakammer herangezogen werden, da ansonsten keine kontinuierliche Messung der Bodenfeuchte möglich wäre.

Die Saugspannung des Bodens wird allerdings nicht nur von der mineralischen Bodenzusammensetzung (Ton, Schluff, Sand, Laterit) beeinflusst, sondern auch von einer Reihe weiterer Faktoren wie:

- Körnung und Homogenität
- Temperatur
- Organische (humöse) Bestandteile
- Mikroorganismen, Pilze, etc.
- Bodenverdichtung
- ...

¹⁵ Bodenkunde und Standortlehre – Humboldt-Universität zu Berlin

¹⁶ UMEG (2003)

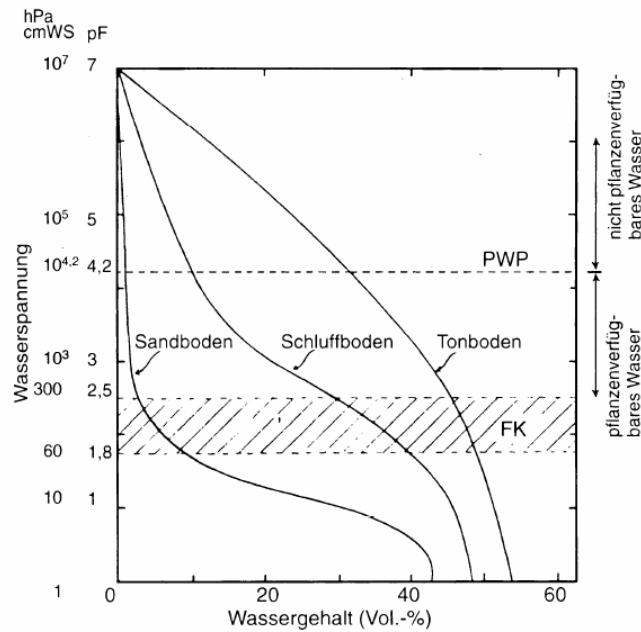


Diagramm 10: Saugspannung pF in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Böden¹⁷

Zur Bestimmung der Saugspannung des Modellbodens in Abhängigkeit vom Wassergehalt wurde ein Behälter mit Laterit-haltiger Erde unverdichtet gefüllt.

Der Modellboden wurde zunächst durch Lagerung bei 105 °C für 12 Stunden in einem Trocknungs-ofen darr-getrocknet. In der Klimakammer, in die dieser getrocknete Boden für anschließende Saugspannungsmessungen eingebracht wurde, wurde ein Klima mit 80 % und 28 °C eingestellt und konstant gehalten. Damit wurden Versuchsbedingungen geschaffen, wie sie für die Bedingungen, unter denen die Feldversuche in Ghana durchgeführt worden waren, typisch sind.

In einer Tiefe von 10 cm wurde ein digitales Tensiometer, ein analoges Bodenfeuchte-Messgerät und ein Tonkörper in den zunächst noch trockenen Modellboden eingebracht (Messanordnung siehe Abbildung 11 sowie Abbildung 28 im Anhang). Der gewählte geringe Abstand zwischen Tonkörper und Tensiometer bzw. Bodenfeuchte-Messspitze stellte sicher, dass die Messung der Bodenfeuchte innerhalb des wirksamen Saugspannungsbereiches des Bodens durchgeführt wird. Der Abstand des Tonkörpers zum Tensiometer von 11 cm ist damit deutlich geringer als der Abstand der Tonkörper zwischen den in den Feldversuchen eingetzten Tonkörpern zueinander (40 cm).

Der Tonkörper wurde zuvor durch Lagerung in einem Wasserbad (etwa 1 Stunde) vollständig gesättigt. Er war über einen PE-Schlauch mit einem mit 600 ml Leitungswasser gefüllten Messbecher verbunden. Dieser wurde oberhalb der Bodenoberfläche aufgestellt, so dass auf den Tonkörper ein geingfügiger hydrostatischer Druck (< 0,1 bar) wirkte, wie dies ähnlich auch bei den Feldversuchen in Ghana der Fall war.

Das Bodenfeuchte-Messgerät sowie das Tensiometer (Messbereich 0 – 750 mbar Unterdruck) waren baugleich mit dem in Ghana in Feldversuchen eingesetzten Geräten. Die Keramikspitze des Tensiometers wurde zur besseren Kontaktierung mit dem Modellboden zuvor mit feinem Quarzsand eingerieben.

¹⁷ Seidel - Transkript S.9

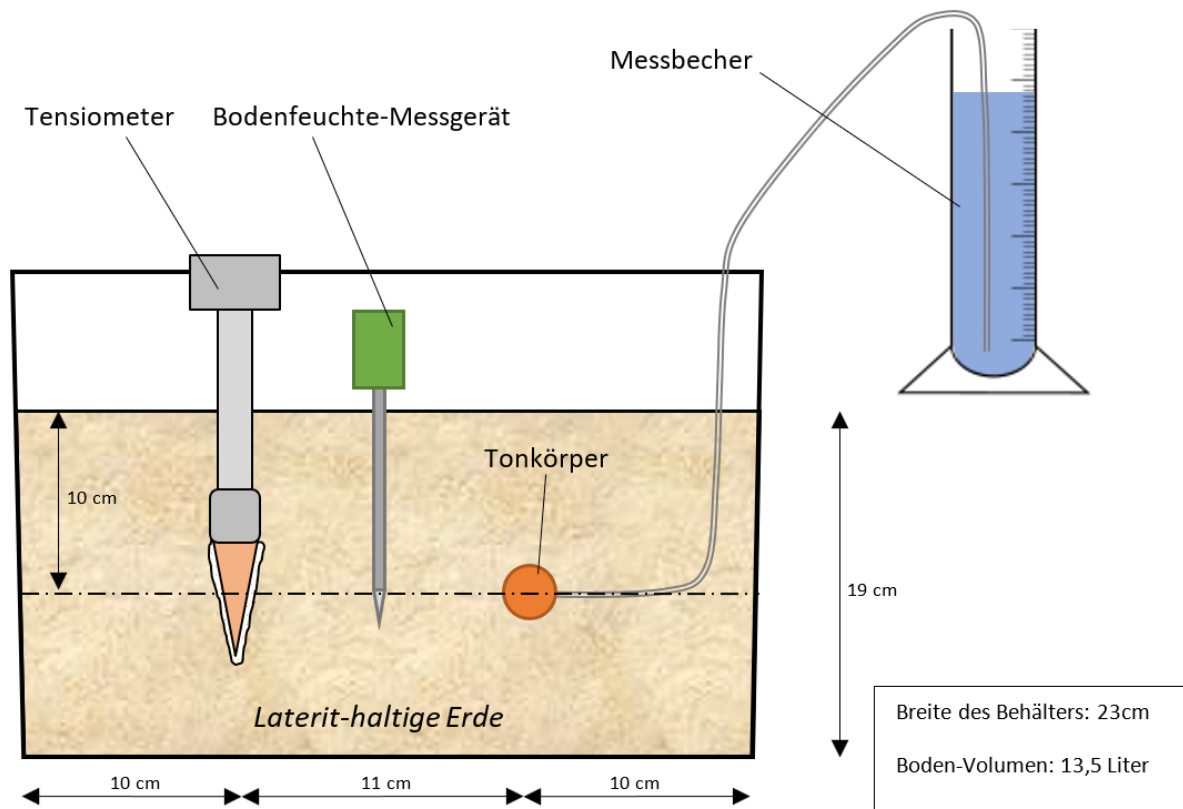


Abbildung 11: Schematischer Aufbau zur Untersuchung der Saugspannung in Laterit-haltiger Erde

Experimentelle Befund

Das Bodenfeuchte-Messgerät zeigte anfänglich erwartungsgemäß den Skalenwert 1 an.

Ein über der Zeit gemessener typischer Druckverlauf am Tensiometer ist für diese Messanordnung Diagramm 11 zu entnehmen. Bereits in den ersten Minuten des Versuches begann Unterdruck des Tensiometers sehr stark mit einer Rate von etwa 10 mbar/min von zu steigen. Weiterhin ist erkennbar, dass die Messkurve ab 300mbar immer stärker abflacht. Zwischen 2,5 bis 10 Stunden Versuchszeit ergab sich eine Steigerungsrate von nur noch 0,3 mbar/min. Mit fortschreitender Zeit konvergiert die Kurve gegen einen Grenzwert von 600 mbar. Dieser Befund wurde in mehrfachen Messungen bestätigt. Zwischen den Messungen wurde das Tensiometer durch Wasserlagerung wieder in den drucklosen Zustand überführt.

Wie sich zeigte, entspricht dieser in Diagramm 11 dargestellte, für die Messanordnung typische Druckverlauf am Tensiometer in etwa dem Druckverlauf, den das Tensiometer an Luft bei Normalbedingungen zeigt. Der gemessene Druckverlauf charakterisiert damit den Saugspannungsverlauf des Tensiometers bei quasi absoluter Trockenheit der Umgebung.

Das im Abstand von nur 5 cm zum Tonkörper positionierte Bodenfeuchte-Messgerät zeigte über den gesamten Versuchszeitraum konstant den Skalenwert 1 an. Eine messbare Zunahme der Bodenfeuchte war auch in diesem Abstand zum Tonkörper in der Messanordnung nicht gegeben.

Zu Beginn des Versuches zeigte der Messbecher einen Wasserverbrauch über den Tonkörper von 20-25ml. Danach ist bis Versuchsende kein Wasser mehr nachgeflossen.

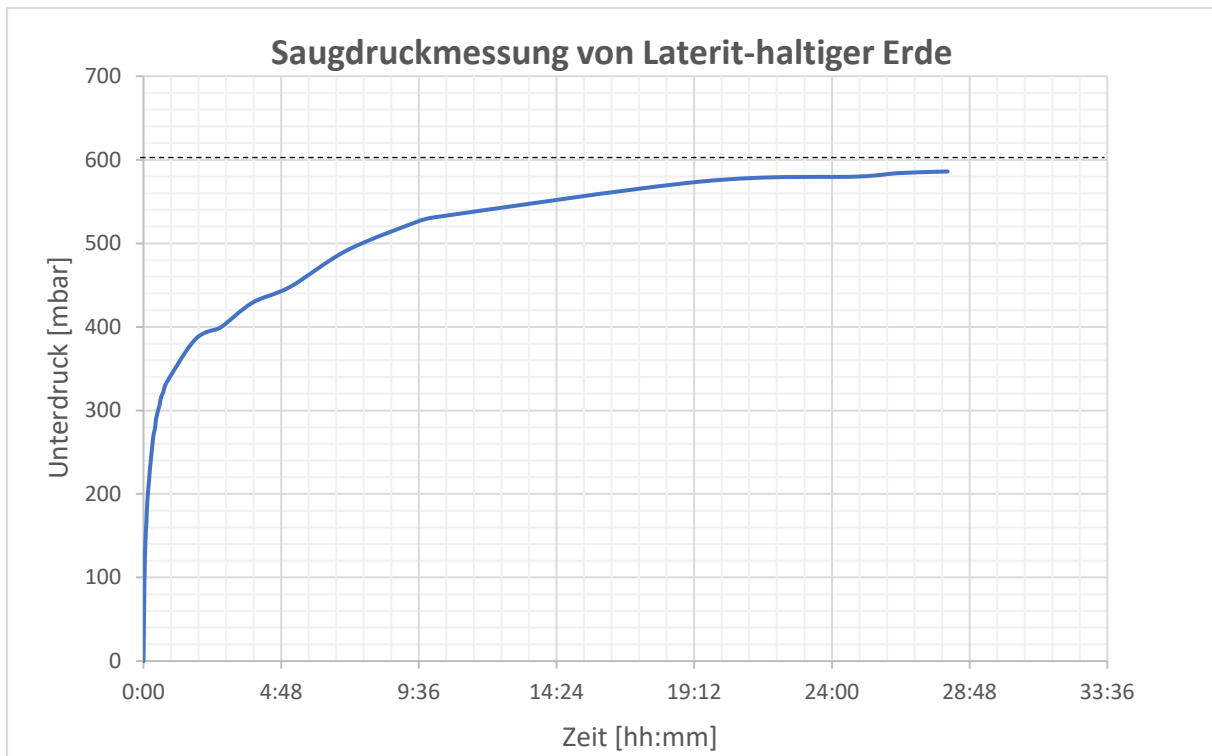


Diagramm 11: Saugdruckmessung von Laterit-haltiger Erde bei konstanten klimatischen Bedingungen

Alle genannten Befunde lassen eindeutig den Schluss zu, dass der Modellboden nicht die Fähigkeit aufwies, Wasser infolge einer ausreichenden Saufkraft zu transportieren. Damit wären die wichtigsten Forderungen an einen Modellboden, wie er als Nachbildung des laterithaltigen Bodens in Ghana für kontrollierte Versuche in der Klimakammer geplant war, nicht erfüllt:

- a) Das Mikrobewässerungssystem liefert kontinuierlich Wasser an den Modellboden im Ausgleich zu Wasserverlusten aufgrund von Verdunstung an der Oberfläche und Pflanzenevaporation
- b) Die Feuchte des Modellbodens lässt sich mittels Tensiometer messen.

Schlussfolgerungen:

Die Überlegungen, die zur Interpretation des experimentellen Befundes angestellt wurden, führten zu dem Ergebnis, dass vor dem Hintergrund der unübersichtlichen Anzahl von Einflussgrößen auf die Saugspannung von Böden eine Modellbildung laterithaltiger Böden, wie sie in Ghana vorgefunden wurden, innerhalb des Projektrahmens nicht möglich erscheint.

Als weitere Überlegung wurde die These aufgestellt, dass die Darrtrocknung des Modellbodens zu einem Zusammenbruch des Kapillarsystems im Boden führen könnte, der offensichtlich irreparabel ist.

Die ursprünglich geplanten Bewässerungsversuche in der Klimakammer mussten zu diesem Zeitpunkt auch aufgrund des technischen Ausfalls der Klimakammer aufgegeben werden.

3.6 Untersuchung des Algen-Einflusses auf die Saugfähigkeit der Tonkörper

Die Tonkörper des Bewässerungssystems nehmen Wasser durch Kapillarwirkung auf und geben durch Verdunstung zu dem umliegenden Boden ab. Die Kapillaren in porösen Tonkörpern für die Mikrobewässerung können durch Fremdstoffe, wie sie durch Algenbefall freigesetzt werden, zum Teil verstopfen, was die Wirksamkeit des Systems im Sinne der Fähigkeit zum Wassertransport an die Oberfläche einschränkt, ohne dass dies unmittelbar zu einer Abnahme der Saugspannung des Tonkörpers führen muss.

Die hydraulische Leitfähigkeit ist dagegen ein direktes Maß für die Durchlässigkeit poröser Materialien für flüssige Medien (hier Wasser). Daher wurde zur Bewertung der Wirkung des Algenbefalls auf Mikrobewässerungssysteme in Laboruntersuchungen die Messung der hydraulischen Leitfähigkeit von Modulen, bestehend aus 3 Tonkörpern, zur Mikrobewässerung vorgenommen.

3.6.1 Messprinzip zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit

Geprüft wurde die hydraulische Leitfähigkeit von Tonkörpern über eine 2 Meter hohe Wassersäule, mit der ein Wasser-gesättigtes Mikrobewässerungsmodul beaufschlagt wurde (siehe Abbildung 12). Das Bewässerungs-Modul wurde für diese Messung in ein Wasserbad eingebracht. Der hydrostatische Druck der Wassersäule über dem Modul ist bei dieser Versuchsanordnung die Treibende Kraft für den Wassertransport durch die Tonkörper.

Aufgrund dieses Wassertransportes nimmt die Wasserstandshöhe der Wassersäule ab. Diese wird in Abhängigkeit von der Zeit gemessen (Versuchsanordnung siehe Abb. 12).

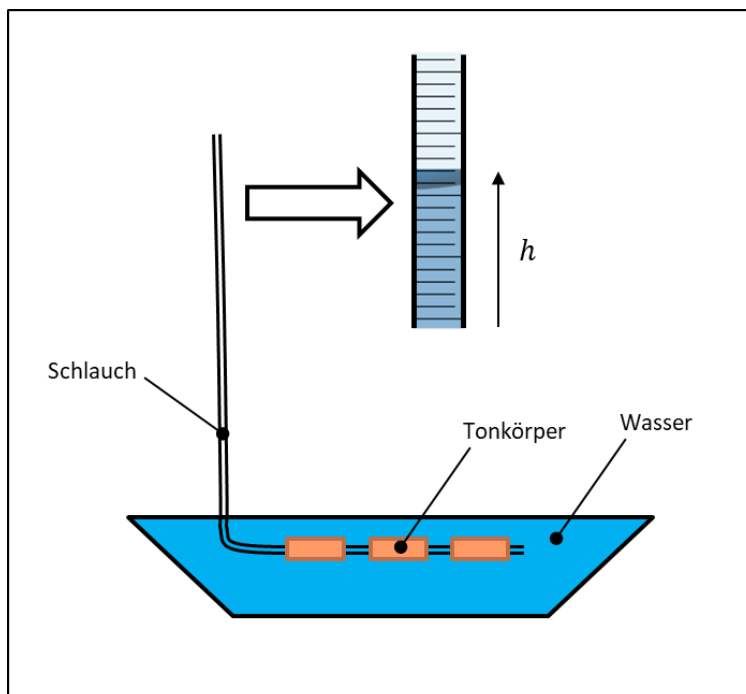


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Messprinzips zur Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit

Die hydraulische Leitfähigkeit C_h errechnet sich aus dem Abfall der gemessenen Höhe h der Wassersäule mit der Zeit t wie folgt:

$$C_h = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \cdot \frac{a \cdot s}{A \cdot t}$$

a → Querschnittsfläche Schlauch

s → Wandstärke Tonkörper

A → durchströmte innere Mantelfläche des Ton-Zylinders

h_0 → Ausgangshöhe

3.6.2 Untersuchung der Saugfähigkeit von Tonkörpern in mit Algenpulver angereichertem Wasser

Um zu überprüfen, ob eine Algenanreicherung im Bewässerungssystem die hydraulische Leitfähigkeit der Tonkörper beeinträchtigt, wurden die untersuchten Bewässerungsmodule mit Algen beaufschlagt. Hierzu wurde eine Suspension aus zuvor gefriergetrocknetem Algenpulver angelegt.

Die Tonkörper wurden dafür in ein Bad mit Algensuspension gelegt und das System außerdem von innen mit Suspension gefüllt. Die Suspensionen wurden dabei mit einer hohen Konzentration von 5 g/l angesetzt. Da sich das Algenpulver absetzte, wurden etwa jede Stunde das Bad und die Flasche geschüttelt, sowie innen mit frischer Suspension gespült.



Abbildung 13: Algenanreicherung im Tonkörper-System

Wie in der Abbildung 13 ersichtlich, haben sich die transparenten PE-Schläuche aufgrund der Algenbelastung erwartungsgemäß grün verfärbt. Grünliche Ablagerungen aus der Algensuspension befinden sich nach Algenbeladung des Moduls auch auf der Innenoberfläche der Tonkörper.

Das Diagramm 12 zeigt die Veränderung der Steighöhe h pro Zeiteinheit an zwei Tonkörper-Modulen vor und nach der Algenanlagerung. Die Steigung dieser Kurven charakterisieren die hydraulische Leitfähigkeit.

Mit fortschreitender Zeit ließ sich feststellen, dass beide Tonkörper-Module vor der Algenanlagerung bereits eine unterschiedliche hydraulische Leitfähigkeit aufwiesen. Die hydraulische Leitfähigkeit des 2. Moduls war um $1,27 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ geringer, als die des 1. Moduls.

Interpretation:

Die Tonkörper sind per Handarbeit gefertigt worden, was eine annähernd konstante Homogenität und Verdichtung des Tonmaterials während der Formgebung nicht gestattet. Hierdurch bedingt weisen einzelne Tonkörper voneinander abweichende Eigenschaften auf, die sich zum einen darin bemerkbar macht, dass die gemessenen Saugspannungen zwischen 400 und 600 mbar lagen, zum anderen aber auch die hydraulische Leitfähigkeit individuelle Unterschiede der Messwerte zeigt.

Der Einfluss der Algenanreicherung auf die hydraulische Leitfähigkeit wurde in dieser Messanordnung ebenfalls deutlich (siehe Diagramm 12): Die hydraulische Leitfähigkeit hatte sich in Folge der Algenbelastung bei dem gegebenen hohen Beladungsgrad an Algen bei Modul 1 um etwa 28 % auf $2,67 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ und Modul 2 um etwa 37 % auf $1,53 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ verringert (s. Tabelle 4).

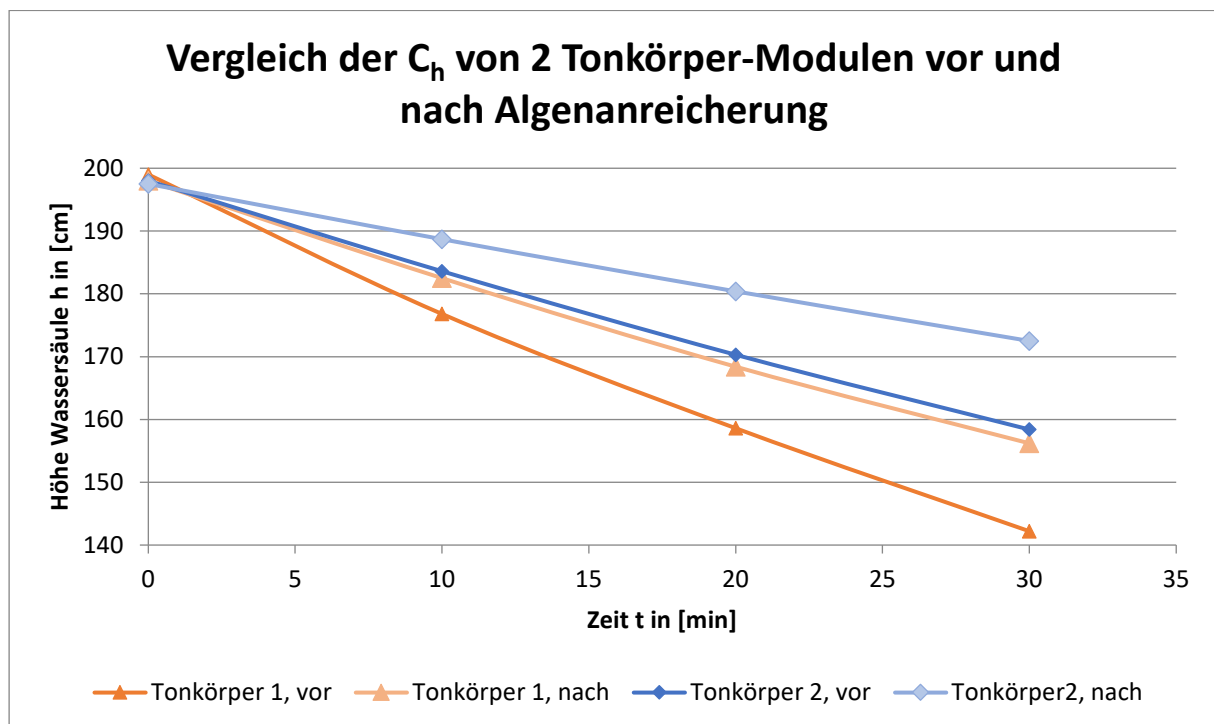


Diagramm 12: Ermittelte Wasserstandshöhe in Abhängigkeit von der Zeit von Tonkörpern vor und nach der Algenanreicherung

Tabelle 4: Hydraulische Leitfähigkeit von zwei Tonkörper-Modulen vor- und nach Algenbeladung des Wassers mit 5 g/l Algen

Tonkörper- Modul [Nr]	C_h [nm/s]	ΔC_h [%]
1, vor Algenanreicherung	3,71	
1, nach Algenanreicherung	2,67	28
2, vor Algenanreicherung	2,44	
2, nach Algenanreicherung	1,53	37

Die Funktionalität der Module war jedoch immer noch gegeben.

Damit konnte zunächst eindeutig die naheliegende Vermutung experimentell bestätigt werden, dass ein Algenbefall der Mikrobewässerungssysteme deren Leistungsfähigkeit einschränken kann.

3.6.3 Untersuchung vorbeugender Maßnahmen zum Schutz vor Algenwachstum in Bewässerungssystemen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Anwendung und Auswirkung algenbekämpfender Maßnahmen für das Tonkörper-Bewässerungssystem. Eine Aufzucht von lebenden Algen war daher für diese Untersuchungen erforderlich.

3.6.3.1 Versuchsvorbereitung

Um den Einfluss von Algen auf die Saugfähigkeit der Tonkörper analysieren zu können, mussten Vorbereitungen getroffen werden. Dazu wurden 700 ml Gläser, die als Behältnisse für die Algensuspensionen dienten, sterilisiert, in dem sie für 4 h bei 130 °C in einem Trockenschrank isotherm aufgeheizt wurden. In jedes Glas wurden 450 ml Leitungswasser gegeben, das zuvor 30 min lang abgekocht wurde.

Algen benötigen für ihr Wachstum neben dem Sonnenlicht im Wasser gelöste Nährstoffe. Handelsübliche Dünger besitzen Stoffe wie Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, etc. Daher wurden anschließend in jedes Glas jeweils 2 Tropfen Grünpflanzendünger gegeben.

Als Algenstammlösung wurde *Chlorella vulgaris* mit 150 ml jeweils in die Gläser gegeben (siehe Abbildung 14). Es handelte sich hierbei um die typische einzellige und kugelförmige Grünalge mit hohem Anteil an Chlorophyll. Sie benötigt zum Wachsen Wasser, Licht, Kohlenstoffdioxid und weitere Nährstoffe.¹⁸ Die Algen der Lösung wurde bei Raumtemperatur und einer solaren Strahlungsenergie von durchschnittlich 7.000 Lux pro Tag gezüchtet.

¹⁸ Stach (2005) S.18ff



Abbildung 14: kultivierte Algensuspension der *Chlorella vulgaris*

Die Tonkörper wurden ohne Schlauchanbindung ebenfalls sterilisiert, indem sie für 4 Stunden bei 130 °C getrocknet wurden. Diese wurden danach in die Behälter mit der 600 ml Wasser-Algenlösung eingebracht. In dieser Lösung wurden die Tonkörper gelagert (s. Abbildung 15: Tonkörper in Wasser-Algenlösung Abbildung 15).

Nach 3 Wochen Lagerung wurden die Messungen an den Tonkörpern gestartet.



Abbildung 15: Tonkörper in Wasser-Algenlösung

3.6.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdauer sah einen Umfang von 4 Wochen vor. In dieser Zeit wurden jede Woche die Algenkonzentration im Wasser, die hydraulische Leitfähigkeit der belasteten Tonkörper und Konzentration gelöster Ionen im Wasser in Form von pH-Wert, Phosphat- und Nitrat-Wert gemessen.

Bestimmung der Algenkonzentration

Die Algenkonzentration konnte durch Ermittlung der Trockenmasse bestimmt werden. Dabei wurden 30 ml Wasser-Algenlösung entnommen und in Zentrifugier-Küvetten eingefüllt. Zuvor wurden diese im leeren Zustand jeweils getrocknet und gewogen. Bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 2.000 rpm

für 15 min wurden die gefüllten Gläser in einer Laborzentrifuge rotiert. Der Überstand in den Gläsern wurde dekantiert, der restliche Algenanteil mit 10 ml destilliertem Wasser vermischt und erneut zentrifugiert. Nach Entfernung des Überstands wurden die Algenmassen in den Gläsern für 24 Stunden bei 105 °C getrocknet und im Exsikkator abgekühlt. Nach erneutem Wiegen bestimmte die Massendifferenz zwischen den leeren und mit Algen versehenen Gläsern die Trockenmasse. Die Algenkonzentration c_{Algen} ließ sich damit wie folgt bestimmen:

$$c_{Algen} = \frac{(m_{voll} - m_{leer})}{V_{Probe}}$$

m_{voll} → Masse des leeren Zentrifugenglases

m_{leer} → Masse des getrockneten Zentrifugenglases

V_{Probe} → Volumen der entnommenen Wasser-Algenlösung

Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit

Die Messung der hydraulischen Leitfähigkeit lehnt sich an Kapitel 3.6.1 an. Sie wurde jedoch nicht an einem Tonkörper-Modul, sondern jeweils an einem einzelnen Tonkörper durchgeführt. Die Änderung der Wasserstandhöhe wurde im Abstand von 10 min gemessen.

Ermittlung der pH-, Phosphat- und Nitrat-Werte

Der pH-Wert wurde mit Hilfe eines digitalen Messgerätes der Firma *Maozua* ermittelt. Über eine Elektrode konnte der Messwert des entnommenen Wassers mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ (laut Hersteller) bestimmt werden. Zuvor ist jedoch eine Kalibrierung nötig gewesen.

Die Bestimmung des Phosphat- und Nitrat-Wertes wurde analog mit Hilfe von Indikatorfarbstoffen durchgeführt. Dabei wurde die visuelle Farbänderung der Proben mit einer Farbskala verglichen und der Wert der Konzentration ausgelesen (Abbildung 16).



Abbildung 16: Ermittlung des Phosphat- (oben) und Nitratwertes (unten) durch Verwendung von Indikatorfarbstoffen

Bekämpfung der Algen

Zur Bekämpfung des Algenwachstums in Bewässerungssystemen sind neben dem Einsatz effektiver mechanischer Filtersysteme die Entziehung der Nahrungsgrundlage der Algen und die direkte Bekämpfung durch Bestrahlung möglich.

Die mechanische Filterung basiert auf das Auffangen kleinster Partikel durch ihre Mikrostruktur, bestehend aus Fasern bzw. Körnern. Bei Algenfilter bleiben neben Algen auch Schmutzpartikel und Fremdkörper hängen, die mindestens die Größe der Algen besitzen. Bei ungereinigtem Wasser sind Filter zeitnah verstopft und müssen ausgetauscht werden. Der Einsatz solcher keramischen Filter mit einer Maschenweite $< 1 \mu\text{m}$ ist außerdem recht kostenaufwendig. Daher wurde auf die Untersuchung dieser Methode verzichtet.

UV-C-Lichtfilter basieren auf die Wirkung von Ultravioletter Strahlung auf biotische Stoffe. Ein UV-C-Leuchtmittel strahlt dabei ultraviolettes Licht im C-Bereich mit einer kurzen Wellenlänge von 100 nm – 280 nm auf das zu filternde Wasser. Die Bestrahlung ist abhängig von der Bestrahlungsstärke und der Dauer. Kurzweilige Strahlung ist hochenergetisch. Die Strahlungsenergie wird bei Absorption in photochemische Reaktionsenergie umgewandelt. UV-C-Strahlung ist daher besonders aggressiv und schädigt die Zellen von Lebewesen, indem sie Strangbrüche in der DNA verursacht.¹⁹

Die Entziehung der Nährstoffe zum Energiestoffwechsel der Algen kann unter anderem durch einen Phosphatbinder geschehen. Dabei können im Wasser befindliche Phosphate durch den Einsatz von phosphathaltigen Mineralien gebunden werden. Eine Rückbildung zu gelösten Phosphaten findet nicht mehr statt.

Einsatz des UV-C-Lichtfilters

Zur Anwendung kam in der 4. Woche der Lichtfilter „UV-C-Lichtfilter CUV-211“ bei 11 W mit einer Kapazität von 1.800 l/h, in dem eine UV-C-Leuchtröhre verbaut ist. Der Filter kann als Verbinder zwischen Wasserreservoir und Bewässerungssystem genutzt werden, bedarf jedoch einer äußeren Spannungsquelle. In diesem Versuch wurde algenhaltiges Wasser über Schläuche durch den Filter geleitet.

Einsatz des Phosphatbinders

Der kommerziell erhältliche Binder „Söll PhosLock AlgenStopp“ wurde ebenfalls in der 4. Woche eingesetzt. Die Bindung gelöster Phosphate erfolgt mittels phosphathaltigem Mineral Apatit. Laut Hersteller sollten bei einer gegebenen Phosphatkonzentration von 1,0 mg/l 75g Phosphatbinder auf 1.000 Liter Wasser angewendet werden. Die Phosphat-Messung der Gläser ergab 24 mg/l. Damit ergab sich eine eingesetzte Binder-Menge von 1,08 g auf 600 ml algenhaltigem Wasser.

3.6.3.3 Auswertung der Messergebnisse

Während der gesamten Versuchsdauer war eine ständige Zunahme der Algenkonzentration gemessen worden. Nach 4 Wochen hatte sich die Konzentration von 0,195 g/l auf 0,5 g/l mehr als verdoppelt. Die Algen hatten sich in den Gläsern mit den darin befindlichen Tonkörpern entwickelt und ausgebreitet. Dadurch war ebenfalls eine Zunahme des pH-Wertes zu beobachten (Tabelle 5).

Algen benötigen für Wachstum das im Wasser gelöste Kohlenstoffdioxid bzw. Hydrogencarbonat. Durch chemische Reaktion mit den Carbonaten steigt gleichzeitig die Konzentration an Hydroxidionen an, wodurch das Wasser basisch wird. Jedoch befand sich das Wasser nach der 4 Woche mit einem pH-Wert von 8,11 immer noch in einem neutralen Bereich.

¹⁹ Leitfaden „Ultraviolettstrahlung künstlicher Quellen“ (2013) S.6

Tabelle 5: Gemessene Wasser-Werte der Wasser-Algenlösung über einen Zeitraum von 4 Wochen

Versuchsdauer	Konzentration der Trockenmasse [g/l]	pH-Wert [-]	Nitrat [mg/l]	Phosphat [mg/l]
Woche 0	0,195	7,70	100	29
Woche 1	0,245	7,85	90	27
Woche 2	0,260	7,93	80	26
Woche 3	0,325	8,00	70	24
Woche 4	0,500	8,11	50	20
Woche 4 Phosphatbinder	1,610	8,30	50	5
Woche 4 UV-C Lichtfilter	0,080	8,58	50	21

Hinweise zur Aktivität der lebenden Algen im Wasser gaben die gemessenen Nitrat- und Phosphat-Werte wieder. Ein Rückgang der im Wasser befindlichen Mengen an Nitraten und Phosphaten ist erkennbar gewesen, was darauf hindeutet, dass die Algen diese gelösten Salze für ihr Wachstum stetig verbrauchen.

Mit Hinzugabe des Phosphatbinders sank der Phosphatgehalt auf 5 mg/l ab. Damit wurde den Algen ein Großteil der Nahrungsgrundlage entzogen. Die Konzentration der Trockenmasse stieg erheblich auf 1,61 g/l. Diese Messung ließ sich nicht mehr nur auf das Vorhandensein von Algen im Wasser beschränken. Mengen des Phosphatbinders konnten ebenfalls in die Proben gelangen. Visuell war die Wirkung des Binders auf die Wasser-Algenlösung in den Gläsern durch eine deutlich hellere Farbe zu erkennen (Abbildung 17).



Abbildung 17: Wasser-Algenlösung und Tonkörper (links) ohne und (rechts) mit Phosphatbinder

Durch Verwendung des UV-C-Lichtfilters sank die Algenkonzentration erheblich auf einen Wert von 0,08 g/l ab. Die intensive Bestrahlung führte offensichtlich zu einer signifikanten Zellschädigung und einem Absterben der Algen. Noch vorhandene leblose biotische Stoffe lagerten sich an Oberflächen

ab. Das Wasser wurde klarer. Die Menge an Algen im für die Proben entnommenen Wasser verringerte sich. In Abbildung 18 ist zu erkennen, wie das Wasser transparenter und klarer wurde.

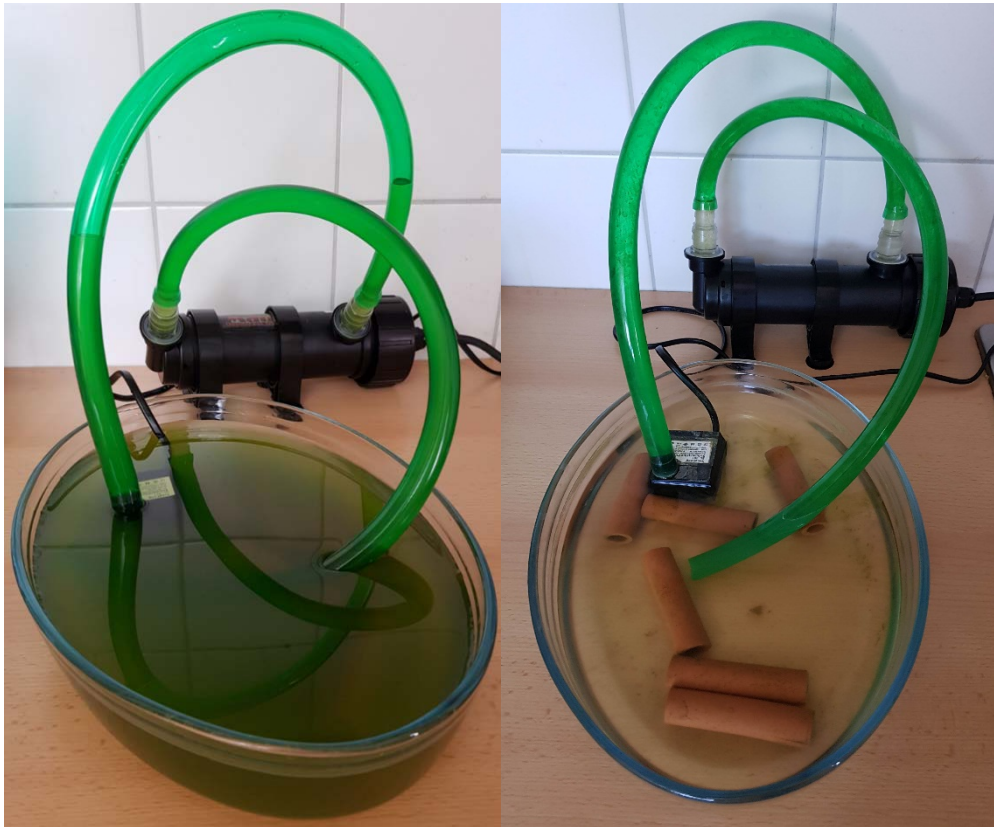


Abbildung 18: Einsatz des UV-C Lichtfilters in Wasser-Algenlösung: (links) vor und (rechts) nach Inbetriebnahme

Zur Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit wurde die Änderung der Wasserstandshöhe je 10 min an 3 Tonkörpern pro Woche einzeln gemessen. Die Mittelwerte sind im Diagramm 13 dargestellt. Zudem sind die Messungen der Tonkörper bei Einsatz des Phosphatbinders und des UV-C Lichtfilters aufgeführt.

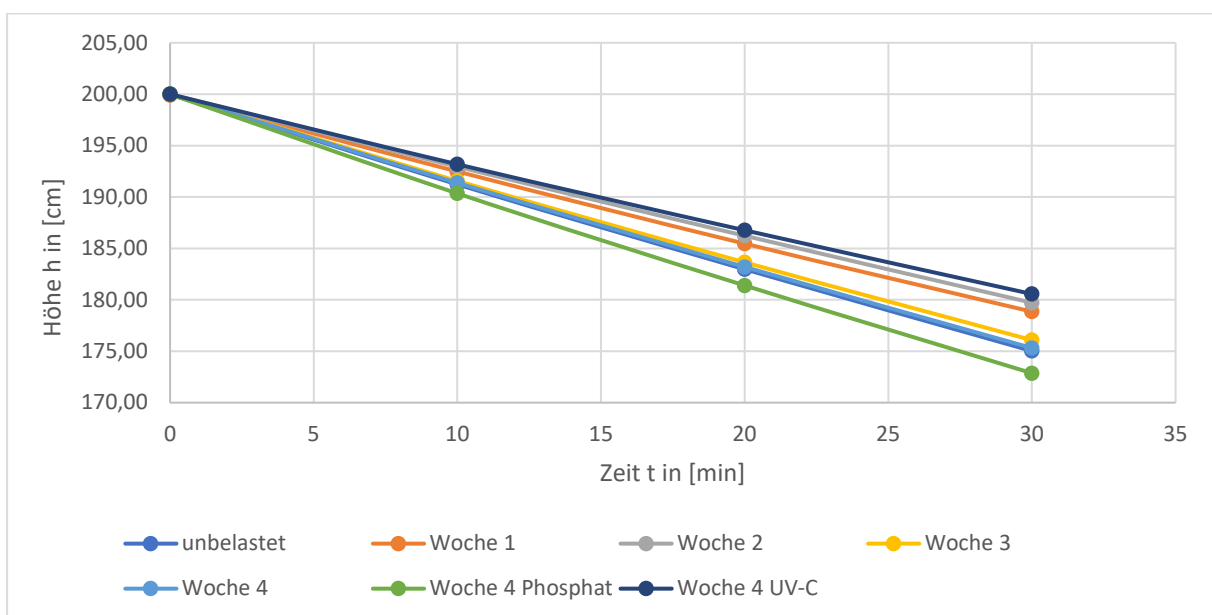


Diagramm 13: Messung der Wasserstandshöhe in Abhängigkeit von der Zeit

Alle Kurven zeigen eine kontinuierliche Verringerung der Wasserstandshöhe. Mit zunehmender Zeiteinheit nehmen die Abweichungen zwischen den Messkurven bzw. deren Steigung als Maß für die hydraulische Leitfähigkeit der Tonkörper (s. Tabelle 6) zu.

Jedoch ist eine Beurteilung bezüglich des Algeneinflusses auf die Saugfähigkeit sowie die Wirkung von Algenbekämpfungsmitteln hier schwierig. Die Leitfähigkeit der Tonkörper bei vorhandener Konzentration der Algen wurde nicht in dem Maße beeinträchtigt, als dass Aussagen getroffen werden können. Zudem könnten die geringen Abweichungen auch durch Ungenauigkeiten in der Messaufnahme entstanden sein. Durch den Einsatz der Algenbekämpfungsmittel wurde das Algenwachstum zwar erschwert bzw. behindert, jedoch können auch abgestorbene Partikel immer noch die Poren der Tonkörper verstopfen. Eine sichtbare Verbesserung der Leitfähigkeit ist daher innerhalb der kurzen Versuchsdauer nicht beobachtbar gewesen.

Tabelle 6: Messwerte der Wasserstandshöhe h und Hydraulischen Leitfähigkeit C_h

	<i>unbelastet</i>	<i>Woche 1</i>	<i>Woche 2</i>	<i>Woche 3</i>	<i>Woche 4</i>	<i>Woche 4 Phosphat</i>	<i>Woche 4 UV-C</i>
t [min]	h [cm]	h [cm]	h [cm]	h [cm]	h [cm]	h [cm]	h [cm]
0	200,00	199,92	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
10	191,23	192,48	192,95	191,57	191,37	190,35	193,18
20	182,98	185,47	186,23	183,65	183,20	181,40	186,77
30	175,03	178,85	179,72	176,08	175,31	172,87	180,57
C_h in [nm/s]	1,37	1,26	1,17	1,38	1,45	1,64	1,15

Die hydraulische Leitfähigkeit lag bei allen getesteten Tonkörpern zwischen $1,15 \cdot 10^{-9}$ und $1,64 \cdot 10^{-9}$ m/s (siehe Tabelle 6).

Im Vergleich zu Kapitel 3.6.2 lag die Algenkonzentration der Suspension nach 4 Wochen mit nur 0,5 g/l deutlich (etwa um den Faktor 10) niedriger, als die der in Kap. 3.6.2 eingesetzten gefriergetrockneten Konzentration (5 g/l).

Unter Berücksichtigung einer 3-wöchigen Algenentwicklung zur Vorbereitung und weiteren 4 Wochen Versuchszeit haben die über den Zeitraum von 7 Wochen innerhalb des Bewässerungssystems gezüchteten Algen die Saugfähigkeit der Tonkörper nicht erkennbar beeinträchtigt. Die Wirksamkeit der Algenbekämpfenden Maßnahmen konnte daher innerhalb dieses Versuchszeitraumes nicht anhand des Einflusses des Algenbefalls auf die hydraulische Leitfähigkeit bestätigt werden.

Eine höhere Konzentration könnte auch hier den Einfluss des Algenwachses auf die Leitfähigkeit beobachtbar machen. Jedoch erfordert dies eine weitere zeitintensive Versuchsreihe.

4 Fazit

Wirksamkeit des Mikrobewässerungssystems

Die Untersuchung der Mikrobewässerungssysteme auf den Testfeldern zeigte, dass sich bereits wenige Wochen nach der Inbetriebnahme ein konstanter Wasserverbrauch einstellte. Die Wasserabgabe der einzelnen Tonkörper war auf beiden Testfeldern mit ca. 200 ml pro Tag nur gering, wodurch das Prinzip der Mikrobewässerung im Feldtest bestätigt werden konnte.

Die Biomasse entwickelte sich auf beiden Testfeldern unter Mikrobewässerung gut. Hieraus ist zu schließen, dass das Mikrobewässerungssystem in der Lage ist, eine ausreichende Wasserversorgung der Pflanzen zu gewährleisten. Im Greenhouse Vume wurde eine im Vergleich zur oberflächlichen Tropfbewässerung deutlich beschleunigte Entwicklung der Pflanzen in Folge der Mikrobewässerung beobachtet. Die Mikrobewässerung führt folglich trotz geringen Wasserverbrauches nicht zu einem eingeschränkten Pflanzenwachstum, sondern kann sogar zu einer Verbesserung des Ertrages führen.

Diese Aussagen beruhen auf ersten Feldstudien und sind durch systematische Untersuchung an verschiedenen Böden, Pflanzenarten und Einbautiefen der Mikrobewässerungssysteme zu qualifizieren. Hierzu betreut und unterstützt das Institut für Polymertechnologien e. V. die Anfertigung einer Dissertation an der UCC, Ghana.

Algenbefall

Die im Feldversuch gewonnenen Ergebnisse beziehen sich auf Beobachtungen und Messungen innerhalb eines kurzen Versuchszeitraumes. Im Versuchszeitraum wurde keine Beeinträchtigung der Bewässerungsleistung in Folge des Algenbefalls, der optisch an beiden Systemen beobachtet wurde, festgestellt. Durch die Messung der Wasserqualität im Bewässerungssystem wurde bestätigt, dass sich über den Versuchszeitraum keine durch Algenbefall hervorgerufene Einbuße der Wasserqualität eingestellt hatte.

In Laborversuchen wurde unter Einsatz sehr hoher Algenkonzentrationen im Wasser dagegen gezeigt, dass die Bewässerungsleistung der Systeme deutlich durch hohen Algenbefall eingeschränkt wird. Dieser Befund wurde auf der Basis eines zunächst unrealistisch hoch erscheinenden Beladungsgrades des Wassers mit Algen von etwa 5 g/l gewonnen. Inwieweit sich der Beladungsgrad infolge des Algenwachstums innerhalb des Bewässerungssystems in die Leistungsfähigkeit signifikant beeinträchtigende Konzentrationen steigert, konnte im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht werden. Hierzu wären erheblich zeitaufwändigere Versuche erforderlich.

Um langfristige Beeinflussungen der Algen auf das verwendete Bewässerungssystem unter Bedingungen einer geringen Algenbelastung zu bewerten, reichten die Versuchszeiträume auch im Feldversuch (Beobachtungszeitraum in Somaya ca. 6 Monate) nicht aus. Hierzu sind Untersuchungen über einen längeren Zeitraum unabdingbar. Solche Versuche werden in zwei Greenhouses in Namibia mit Beginn der Pflanzsaison Mitte August 2018 durch das Institut für Polymertechnologien e. V. gestartet und wissenschaftlich durch die Namibian University of Science and Technology, Windhoek betreut.

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass Schlauchleitungen und Wasserreservoir vor Sonneneinstrahlung über das gesamte Wellenlängenspektrum der einfallenden Sonnenstrahlung zu schützen sind. Hierzu eignen sich insbesondere schwarz eingefärbte Kunststoffe.

Weitere Methoden zur Einschränkung des Algenbefalls sind z. B. die Abtötung von Algensporen im Bewässerungswasser mittels Bestrahlung des einlaufenden Systemwassers mit UV-C und der Ent-

zug/Beeinträchtigung der Nahrungsgrundlage für das Algenwachstum durch das Einbringen phosphatbindender Substanzen in das Vorratsreservoir. Phosphatbinder oder UV-C-Lichtfilter ermöglichen die erhebliche Reduzierung des Algenanteils.

Nährstoffbinder bringen das Problem mit sich, dass sie die Stoffe zurückhalten, die die Nutzpflanzen ebenfalls für ihr Wachstum benötigen. Daher ist darauf zu achten, dass die zugefügte Menge des Binders im Bewässerungssystem nicht zu hoch ist. Hierzu sind weiterführende qualifizierende Studien erforderlich.

UV-C-Lichtfilter hingegen benötigen zum Betrieb elektrischen Strom, der in Gewächshäusern zur Verfügung steht, auf abgelegenen Feldern allerdings kaum verfügbar sein wird. Die Nutzung von Photovoltaik-Technik oder Batterien wäre hier allerdings kostengünstig möglich, da nur sehr geringe elektrische Leistungen durch die UV-C-Lampe abgerufen werden.

Trotz der untersuchten Gegenmaßnahmen lagern sich mit der Zeit Fremdpartikel und biotische Stoffe im Bewässerungssystem an. Im Rahmen weiterführender Labor- und Feld-Untersuchungen sollte geklärt werden, inwieweit sich infolge der UV-C-Behandlung gebildete Agglomerate abgestorbener Sporen durch das einfache Mikrofiltersystem mit Maschenweite 50 μm zurückhalten lassen und in welchen zeitlichen Abständen diese Filter dann in Abhängigkeit von der jeweiligen Bewässerungsleistung des Systems ausgetauscht werden müssen.

Weiterhin könnte das System zur Dekontamination periodisch mit sauberem Wasser gespült werden. Dies wäre sehr einfach durch Entfernen der Endkappen an den einzelnen Bewässerungsleitungen machbar. Allerdings können belastbare Aussagen zur langzeitigen Wirksamkeit dieser Maßnahme nur gemacht werden, wenn entsprechende längerfristigen Feldversuche durchgeführt und hinsichtlich der Bewässerungsleistung über einen längeren Beobachtungszeitraum ausgewertet werden.

Nicht untersucht wurde der Einsatz von keramischen Mikrofiltern, die bei einer Maschenweite von $< 1 \mu\text{m}$ in der Lage sind, auch einzelne Algensporen mittels Filtrationstechnik zurückzuhalten. Diese Alternative sollte im Rahmen weiterführender Untersuchungen auch im Hinblick auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis mitberücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

SMITH, THOMAS; SMITH ROBERT: *Ökologie*
Auflage 6, Pearson Studium, S.143-176, 2009

LOZAN, DR. J.; GRAßL, HARTMUT; HUPFER, PETER; SCHÖNWIESE, CHRISTIAN-DIETRICH;
MENZEL, LUCAS: *WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle?*
Auflage 3, Universität Hamburg, Institut f. Hydrobiologie, S.149ff, 2011

HOPP, VOLLRATH: *Wasser und Energie: Ihre zukünftigen Krisen?*
Auflage 2, Springer Spektrum, S.319-320, 2016

STACH, SUSANNE: *Polysaccharide aus marinen Bakterien und der Mikroalge Chlorella vulgaris*
Auflage 1, Cuvillier, E, 2005

BROSE, MARTIN; BRÜGGEMEYER, HAUKE; DOLLINGER, KLAUS; GRAF, MAX; HORAK,
WERNER; JOSSEN, HERMANN; u.a.: *Leitfaden „Ultraviolettstrahlung künstlicher Quellen“*
Fachverband für Strahlenschutz e.V., 18.03.2013

DENSCH, A.; GIESECKE, NA; HELBIG, NA; Heß, NA; SCHUBERT, NA; ZUNKER, NA: *Die Physikalische Beschaffenheit des Bodens*
Springer-Verlag, S.240ff, 2013

Gesammelte Klimatische Daten von Wetterstationen
URL <https://de.climate-data.org/location/53436/> - klimatabelle.info@gmail.com - Datensammlung 1982-2012

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz
URL <https://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/wasser/grundwasser/grundwasserbericht/grundwasserbeschaffenheit/gueteparameter/grundprogramm/phwert/pH-Wert-137608.html> – abgerufen am 22.06.2018

KNOP, DANIEL: *Algen im Meerwasseraquarium: Pflege und Bekämpfung*
Auflage 2, Natur und Tier, S.20ff, 2011

ZEITZ, PROF. DR. JUTTA; VELTY, SILKE: *Bodenkunde und Standortlehre –*
URL https://www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de/boku_online/pcboku10.agrar.hu-berlin.de/cocoon/boku/sco_10_bodentypen_116a6a.html?section=N100C8 – Skript - Humboldt-Universität zu Berlin - Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät – abgerufen am 03.07.2018

UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit: *Bodenwasserhaushalt: Saugspannungsmessung*
Veröffentlichung, Kennung: U24-U61-N03, 2003

SEIDEL, DR. SABINE: *Bedeutung des Wassers für Nährstoffhaushalt und Pflanzenentwicklung*
Transskript, Universität Bonn, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, 2017

BECKER, H.C.: *Theoretische Überlegungen und experimentelle Untersuchungen zur genetischen Basis der Heterosis*
Hohenheim Universität, Stuttgart, Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik, 1984

TERRASON, I.; FISHER, M.J.; ANDAH, W.; LEMOALLE, J.: *Yields and water productivity of rainfed grain crops in the Volta Basin, West Africa.*
Water International 34(1), S.104-118, 2009

LACOMBE, G.; MCCARTNEY, M.; FORKUOR, G.: *Drying climate in Ghana over the period 1960-2005: evidence from the resampling-based Mann-Kendall test at local and regional levels*
Hydrological Sciences Journal 57(8) : 1594 – 1609

Ghana Statistical Service: Annual Gross Domestic Product
URL: http://www.statsghana.gov.gh/docfiles/GDP/GDP2015/2015_Annual_GDP_September_2015_Edition.pdf, 2015

CIA World FactBook 2017
Skyhorse Publishing, Central Intelligence Agency, Office of Public Affairs, 2017

KANKAM-YEBOAH, K.; OBUOBIE, E.; AMISIGO, B.; OPOKU-ANKOMAH, Y.: *Impact of climate change on streamflow in selected river basins in Ghana*
Hydrological Sciences Journal 58(4): S. 773-788, 2013

DARKO, R.O.; YUAN, S.; HONG, L.; LIU, J.; YAN, H.: *Irrigation, a productive tool for food security – a review*
Acta Agriculturae, Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science 66(3): S.191-206, 2015

Anhänge

A1 Feldstudie – Somanya

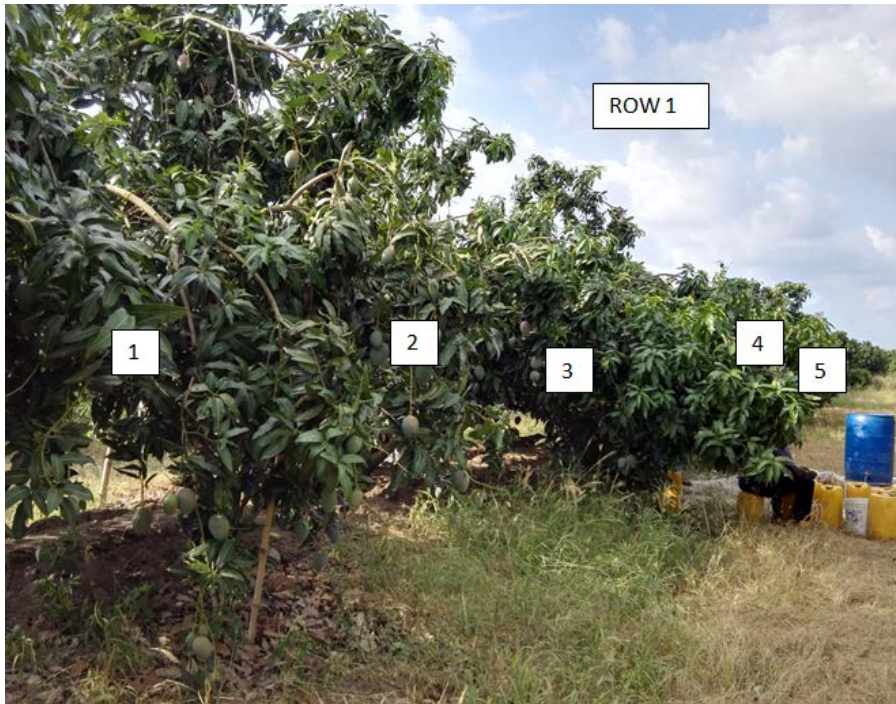


Abbildung 19: Anordnung der Mango-Bäume in Reihe 1

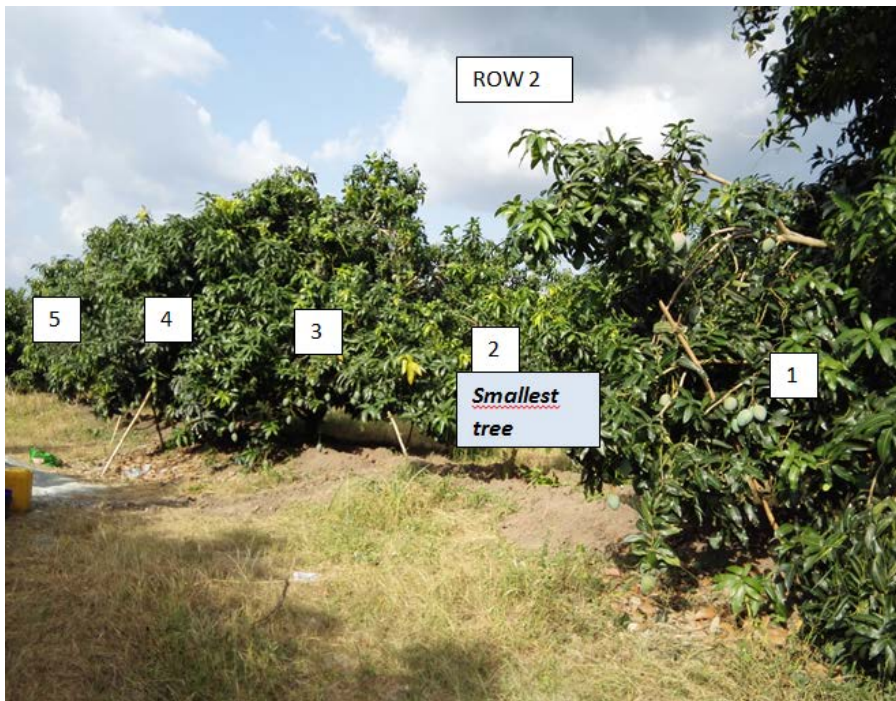


Abbildung 20: Anordnung der Mango-Bäume in Reihe 2



Abbildung 21: Tonkörper-Leitung in einer ausgehobenen Rinne (bereits mit Wasser gesättigt)



Abbildung 22: Messung des Wasserverbrauches



Abbildung 23: Abgedeckte Schlauchleitung an der Zulauf-Armatur

A 2 Feldstudie – Vume



Abbildung 24: Anordnung und Einpflanzung der Gurkenpflanzen unter vorheriger Aufzucht in Topfen



Abbildung 25: Gurkenpflanzen nach 7 Tagen (links); Gurkenpflanzen nach 12 Tagen (rechts)



Abbildung 26: Gurkenpflanzen nach 22 Tagen (links); Gurkenpflanzen nach 26 Tagen (rechts)



Abbildung 27: Parasitenbefall an den Gurkenpflanzen

A 3 Saugspannungsmessung – Laterit-haltige Erde



Abbildung 28: Messanordnung im Behälter mit Laterit-haltige Erde (von links nach rechts: Hygrometer, Tensiometer, Bodenfeuchte-Messgerät, Tonkörper-Schlauch)