

Bewilligungsempfänger

Water Future Systems GmbH



„Weiterentwicklung eines hydraulisch und energetisch effizienten Unterflurbewässerungssystems mit vollautomatischer Regelung für die direkte Wurzeldüngung von Pflanzen und den großflächigen Einsatz in der Landwirtschaft“

Abschlussbericht



AZ 31988/01 gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Verfasser:

Prof. Dr. Rüdiger Anlauf, Hochschule Osnabrück
Heidi Giesenkamp, Hochschule Osnabrück
Farida Degner, Hochschule Osnabrück
Daniel Fehmer, Water Future Systems
Jan Friedel, Water Future Systems
David Sattler, Water Future Systems

Osnabrück, August 2018

Bezugsmöglichkeiten:

Prof. Dr. Rüdiger Anlauf

Hochschule Osnabrück

Postfach 1940

49090 Osnabrück

E-Mail: r.anlauf@hs-osnabrueck.de

Bewilligungsempfänger

Water Future Systems GmbH



„Weiterentwicklung eines hydraulisch und energetisch effizienten Unterflurbewässerungssystems mit vollautomatischer Regelung für die direkte Wurzeldüngung von Pflanzen und den großflächigen Einsatz in der Landwirtschaft“

Abschlussbericht



AZ 31988/01 gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Verfasser:

Prof. Dr. Rüdiger Anlauf, Hochschule Osnabrück
Heidi Giesenkamp, Hochschule Osnabrück
Farida Degner, Hochschule Osnabrück
Daniel Fehmer, Water Future Systems
Jan Friedel, Water Future Systems
David Sattler, Water Future Systems

Osnabrück, August 2018

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	31988/01	Referat	23	Fördersumme	124.930 €
----	----------	---------	----	-------------	-----------

Antragstitel „Weiterentwicklung eines hydraulisch und energetisch effizienten Unterflur-Bewässerungssystems mit vollautomatischer Regelung für die direkte Wurzeldüngung von Pflanzen und den großflächigen Einsatz in der Landwirtschaft“

Stichworte Verfahren, Wasser, System

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 Monate	05.05.2015	31.05.2018	x

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Water Future Systems GmbH Herrn Jan Friedel Rheintalstraße 35 – 43 68723 Schwetzingen	Tel:	06202/5799621
		Fax	
		Projektleitung: Jan Friedel	
		Bearbeiter: Daniel Fehmer	

Kooperationspartner Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur
FG Boden- und Substratphysik
Prof. Dr. Rüdiger Anlauf
Am Krümpel 31
49090 Osnabrück

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In diesem Forschungs- und Entwicklungsprojekt sollten in Kooperation mit der Hochschule Osnabrück die Eigenschaften des derzeit produzierten Unterflurbewässerungsperlschlauchs (permatube®) der Water Future Systems AG (später GmbH) wissenschaftlich untersucht und dokumentiert werden, um damit die Neuentwicklung eines effizienten Unterflur-Bewässerungssystems mit vollautomatischer Regelung zur deutlichen Wassereinsparung bei gleichzeitiger Ertragsteigerung im Bereich landwirtschaftlicher Großflächenbewässerung in ariden und semiariden Regionen, sowie in Trockengebieten des gemäßigten Klimas auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse realisieren zu können.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Gesamtprojekt sollte durch 2 Teilprojekte realisiert werden. Der vorliegenden Teil 1 (Initialprojekt) war für 12 Monate geplant. Hier wurde durch Analyse und Bewertung des derzeitigen Unterflurbewässerungsperlschlauchs (permatube®) und durch Durchführung von Simulationsreihen ein neuer Produktionsprozess zur Entwicklung eines neuen Perlschlauchs realisiert. Der technische Lösungsweg der Neuentwicklung basierte auf den folgenden Zwischenschritten:

Ermittlung von theoretischen Grundlagen

Die benötigten hydraulischen und physikalischen Eigenschaften des neuen Perlschlauchs für den Einsatz zur landwirtschaftlichen Großflächenbewässerung wurden durch den Aufbau eines Messplatzes im Labor der HS Osnabrück zur Aufnahme von Wasserdruck-Wasserauslass-Kennlinien und von Leitungslänge-Wasserdruck-Kennlinien ermittelt.

Erhöhung der Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung

Zur Erhöhung der Gleichmäßigkeit bei der Wasserverteilung wurden verschiedenen Produktionsparameter angepasst und Prototypen des neu entwickelten Perlschlauchs hergestellt. Zur Zielerreichung wurden auch Anwendungsrichtlinien erstellt, die die vorhandenen Rahmenbedingungen berücksichtigen.

Erreichung einer Produktlebensdauer von mindestens 25 Jahren

Simulationen und Beprobungen von Altinstallationen sollten Aufschluss über die Produkthaltbarkeit geben.

Ergebnisse und Diskussion

- Der Druckverlust über die Schlauchlänge konnte durch Messungen und Simulationsrechnungen bestätigt und quantifiziert werden. Im eingebauten Zustand war der gemessene Druckabfall aufgrund bodenphysikalischer Prozesse allerdings sehr viel geringer als unter Laborbedingungen. Ebenso führte ein reduzierter Eingangsdruck (0,2 bar) zu einem geringeren Druckabfall im Schlauch. Dadurch konnten in der Praxis Schlauchlängen von > 75 m Länge mit befriedigender Wasserverteilung realisiert werden.
- Der Perlschlauch ist empfindlich gegen eine Verstopfung der Poren durch Schwebstoffe im Bewässerungswasser. Als Konsequenz muss notwendigerweise ein Wasserfilter vorgeschaltet sein.
- Alterungsprozesse, wie Austrocknung, Frost, Hitze, Quellen führten zu leichten Veränderungen im Wasserauslass. Diese lagen aber in ähnlichen Größenordnungen wie die derzeitige Variabilität der Schläuche und können deshalb zunächst vernachlässigt werden.
- Die angestrebte Langfriststabilität des Schlauches (25 Jahre Nutzungsdauer) konnte aufgrund der kurzen Projektlaufzeit nicht abschließend durch Messungen belegt werden. Untersuchungen an einem sehr ähnlichen Perlschlauch, der 24 Jahre für eine Sportplatzbewässerung erfolgreich genutzt wurde, haben allerdings gezeigt, dass der untersuchte Schlauch nach 24 Jahren noch immer voll funktionsfähig war.
- Simulationen der hydraulischen Prozesse im Schlauch und im umgebenden Boden konnten erfolgreich durchgeführt werden. Die Simulationen wurden als Grundlage für Praxisempfehlungen zu Verlegeabstand, Verlegetiefe und Bewässerungsintensität benutzt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Wissenschaftliche Präsentationen

- Hülsmann, S., T. Rath & R. Anlauf (2016): Bewertung des Auslassverhaltens poröser Perlschläuche. 45. Osnabrücker Kontaktstudientage, Tagungsband, 25, HS Osnabrück.
- Hülsmann, S. (2016): Bewertung von Wasserverteilung und Messverfahren auf einer mit porösen Schläuchen bewässerten Fläche. Bachelorarbeit, HS Osnabrück.
- Hölscher, K., Tenti, M. (2016): Einsatz eines Bewässerungsperschlauches in der Praxis – Erfahrungen und Optimierungsansätze. Bachelorarbeit, HS Osnabrück.
- Anlauf, R. (2017): Application of a porous pipe irrigation system to save water. Presentation at Faculty of Engineering, Naresuan University, Thailand.
- Anlauf, R. (2018): Erfahrungen mit einem Bewässerungsperschlauch. Projektvorstellung vor Praktikern im Rahmen des Praxisbeirats des Studiengangs Gartenbau, HS Osnabrück.

Öffentlichkeitsarbeit

- Internationale Landwirtschaftsmesse SIAM 04/2018 in Meknès, Marokko
- Produktschulungen für Landwirte, Marokko (11/2017 und 01/2018)
- Offizielle technische Zulassung des permatube®-Schlauchs für die Subventionierung in der Landwirtschaft, Marokko (05/2017)
- Diverse Zeitungsartikel:
 1. „Im Reich der Schwitzenden Schläuche“ erschienen am 28. August 2015 in Weinheimer Nachrichten von Jürgen Drawitsch
 2. „Schläuche helfen beim Sparen“ erschienen am 13.04.2017 im Darmstädter Echo von Constantin Lummitsch
 3. „Fußballer stehen auf dem Schlauch“ erschienen am 09.06.2017 in Der Neue Tag von Martin Maier
 4. „Vom Überwald fließt Wasser in die Welt“ erschienen am 21.10.2017 in der Odenwälder Zeitung von Fritz Kopetzky
 5. „Irriguer souterrain pour manger sain“ erschienen am 04.01.2018 in l'opinion (marokkanische Tageszeitung) von Mostafa Bouhaidous

Fazit

Der immer wieder in Labormessungen beschriebene Druckabfall über die Schlauchlänge wird zu einem großen Teil durch den Boden-Gegendruck kompensiert und steht einer Nutzung auch für Schlauchlängen von > 75 m nicht entgegen. Optimal ist hierbei ein eher geringerer Eingangsdruck.

Die Variabilität des Wasserauslasses innerhalb der Schläuche konnte verbessert werden, stellt aber noch immer eine messbare Heterogenität dar. Der Produktionsprozess kann in dieser Hinsicht weiter optimiert werden, um eine unabhängige, gleichmäßigere Bewässerung zu gewährleisten.

Inhalt

Projektkennblatt	iv
Abbildungsverzeichnis.....	vii
Tabellenverzeichnis.....	viii
Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis.....	ix
I Zusammenfassung.....	1
II Einleitung.....	2
III Hauptteil.....	5
1 Untersuchung und Simulation des Perlschlauchs.....	5
1.1 Permeabilität und Wasserabgabe der Perlschläuche.....	5
1.2 Porenverteilung.....	9
1.3 Druckverlust und Wasserauslass im nicht eingebauten Zustand.....	10
1.4 Homogenität der spezifischen Wasserabgabe im eingebautem Zustand.....	12
1.5 Vergleich der spez. Wasserabgabe zwischen eingebauten und nicht-eingebauten Schläuchen ..	17
1.6 Bewässerungstechnik: Geringer Druck und unterschiedliche Schlauchlängen.....	20
1.7 Versuche in Praxisbetrieben.....	23
1.8 Langzeiterfahrungen.....	25
1.9 Alterung.....	28
1.10 Simulationen.....	30
2 Änderungen am Produktionsprozess.....	44
2.1 Optimierung des Dosier- und Mischkonzeptes.....	44
2.2 Entwicklung an der Extrusion sowie Schnecken geometrie.....	44
2.3 Energieeffizienz der Perlschlauchproduktion.....	44
2.4 Zukünftige Weiterentwicklungen des permatube®-Schlauchs.....	44
3 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	45
4 Diskussion der Ergebnisse und Empfehlungen für die Praxis.....	46
5 Ausblick.....	47
6 Veröffentlichungen und Präsentationen im Rahmen des Forschungsprojektes.....	48
IV Fazit.....	49
V Literaturverzeichnis.....	50
VI Anhänge.....	51
A1 Zwischenbericht 1.....	51
A2 Zwischenbericht 2.....	53
A3 Zwischenbericht 3.....	55
A4 Zwischenbericht 4.....	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Messung der Durchflussrate im Labor	6
Abbildung 2: Homogenität der spezifischen Wasserabgabe von Perlschläuchen im Verlauf der 100m Rollen.....	8
Abbildung 3: Punktueller Austreten	9
Abbildung 4: Porenverteilung – Darstellung mittels Stereomikroskop	9
Abbildung 6: Porenanteil verschiedener Perlschlauchabschnitte	10
Abbildung 7: Spezifische Wasserabgabe (nicht eingebaut) an unterschiedlichen Messpunkten	11
Abbildung 8: Druckverlust in Abhängigkeit vom Eingangsdruck	12
Abbildung 9: Spezifische Wasserabgabe bei 15 m langen Perlschläuchen (im Boden) anhand der Bodenfeuchte.....	13
Abbildung 10: Durchfeuchtete Fläche nach 16h Bewässerung im Querschnitt zur Verlegerichtung	14
Abbildung 11: normale Schläuche – Verteilung der Wassermenge entlang des 100 m-Perlschlauches.....	15
Abbildung 12: dichte Schläuche - Verteilung der Wassermenge entlang des 100m-Perlschlauches.....	16
Abbildung 13: im Folientunnel verlegter Perlschlauch.....	17
Abbildung 14: Vergleich spez. Wasserabgabe der Perlschläuche – oberirdische Verlegung + eingebaut	18
Abbildung 15: Vergleich oberirdische Verlegung und eingebaut – 100m Schlauchlänge	19
Abbildung 16: Versuchsaufbau.....	20
Abbildung 17: Wasseraustritt am Ende der 100m Schläuche	20
Abbildung 18: Ergebnisse 4 Perlschläuche unterschiedlicher Länge an einer Kopfstation/Verteilung.....	21
Abbildung 19: Bewässerung über eine 4-fach-Verteilung mit unterschiedlichen Schlauchlängen	22
Abbildung 20: Bewässerung über eine 2-fach-Verteilung mit unterschiedlichen Perlschlauchlängen	22
Abbildung 21: Tropenhaus Tettau – Versuchsplanung Papaya-Neuanpflanzung	23
Abbildung 22: Versuchsaufbau Rhododendronquartier	25
Abbildung 23: Rasennarbe nach 24 Jahren Unterflurbewässerung mit Perlschläuchen.....	26
Abbildung 24: Durchwurzelter Bereich nach 24 Jahren Unterflurbewässerung mit Perlschläuchen	27
Abbildung 25: Perlschläuche Sportplatz Merdingen – spezifische Wasserabgabe nach 24 Jahren Nutzungsdauer	27
Abbildung 26: Alterungsverhalten von Perlschläuchen nach Umwelteinwirkungen (spez. Wasserabgabe ($L h^{-1} m^{-1}$)).....	28
Abbildung 27: Quellversuch Perlschläuche - spezifische Wasserabgabe ($L h^{-1} m^{-1}$).....	29
Abbildung 28: Modellgeometrie, ANSYS-Fluent-Modell	30
Abbildung 29: FEM-Netz und Randbedingungen, ANSYS-Fluent-Modell	31
Abbildung 30: Enddrücke bei verschiedenen Eingangsdrücken und Perlschlauchlängen.....	32
Abbildung 31: Spez. Wasserabgabe, 50-m-Perlschlauch, gemessen und simuliert	32
Abbildung 32: Durchflussraten, 100-m-Perlschlauch, gemessen und simuliert.....	33
Abbildung 33: Druckabfall über die Schlauchlänge, simuliert, unterschiedliche Permeabilität.....	34

Abbildung 34: Spezifische Wasserabgabe über die Schlauchlänge, simuliert, unterschiedliche Permeabilitäten	34
Abbildung 35: Spez. Wasserabgabe (links) und Druck (rechts), simuliert, verschiedene Permeabilität, (60000 Pa = 0,6 bar)	35
Abbildung 36: Spez. Wasserabgabe (links) und Druck (rechts), simuliert, versch. Schlauchdurchmesser, (60000 Pa = 0,6 bar)	35
Abbildung 37: Wassermenge ($L h^{-1}$) in Abhängigkeit von Eingangsdruck und Schlauchlänge	37
Abbildung 38: Wassergehaltsverteilung ($cm^3 cm^{-3}$) nach 5, 10, 24 und 48 Stunden bei Bewässerung über 10 Stunden mit 2,5, 2,0, 1,5 und 1,0 $L h^{-1} m^{-1}$ für die Bodenarten Sand,	39
Abbildung 39: Wassergehaltsverteilung ($cm^3 cm^{-3}$) nach 5, 10, 24 und 48 Stunden bei Bewässerung über 10 Stunden mit 2,5, 2,0, 1,5 und 1,0 $L h^{-1} m^{-1}$	40
Abbildung 40: Wassergehaltsverteilung nach 10 und 24 Stunden bei Bewässerung unter optimalen Bedingungen (Verlegetiefe, Verlegeabstand und max. Bewässerungsmenge) gem. Tab. 5	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Variabilität der Durchflussraten an 6 verschiedenen Testschläuchen 2015	7
Tabelle 2: Variabilität der Durchflussraten an 6 verschiedenen Testschläuchen 2018	8
Tabelle 3: Versuch 4 Schläuche a 100m eingebaut - Ergebnisse	15
Tabelle 4: Spezifische Wasserabgabe und Bewässerungsgabe für die Simulationen mit HYDRUS-2D	38
Tabelle 5: Übersicht über optimale Verlegeabstände, Verlegetiefen und Bewässerungsintensitäten bei verschiedenen Bodenarten	42
Tabelle 6: Maximale Bewässerungsdauer bei verschiedenen Bewässerungsintensitäten	42

Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis

P	[bar]	Druck
g	[m s ⁻²]	Erdbeschleunigung (9,81 m s ⁻²)
t	[h]	Stunde
Δh	[m]	Höhendifferenz, über die die Strömung erfolgt
Δx	[m]	Durchströmte Länge des porösen Körpers
ΔP	[Pa = N m ⁻²]	Druckdifferenz
Kf	[m s ⁻¹]	Durchlässigkeitsbeiwert / gesättigte Wasserleitfähigkeit
V	[L] [m ³]	Volumen
l	[m]	Länge / Strecke
η	[Pa s] [N s m ⁻²]	Dynamische Viskosität des Fluids, (bei Wasser 10 ⁻³ Pa s)
ρ	[kg m ⁻³]	Dichte des Fluids, (bei Wasser 1000 kg m ⁻³)
Q	[m ³ s ⁻¹] [m ³ h ⁻¹] [L h ⁻¹]	Volumenstrom
W _s	[L h ⁻¹ m ⁻¹]	spezifische Wasserabgabe
K	[m ²]	Permeabilität
v	[m s ⁻¹]	Fließgeschwindigkeit
A	[m ²]	durchströmte Querschnittsfläche des porösen Körpers

I Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „Weiterentwicklung eines hydraulisch und energetisch effizienten Unterflur-Bewässerungssystems mit vollautomatischer Regelung für die direkte Wurzeldüngung von Pflanzen und den großflächigen Einsatz in der Landwirtschaft“ wurde von Mai 2015 bis Mai 2018 der erste Projektteil bearbeitet. Im diesem Rahmen wurden Perlschläuche (permatube®) in unterschiedlichen Anwendungen auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht. Dabei waren insbesondere folgende Aspekte Gegenstand der Untersuchungen: Homogenität der Perlschläuche, Homogenität der Wasserverteilung im Boden, Verhalten bei oberflächlicher Verlegung und Einbau in den Boden, Nutzung unterschiedlicher Wasserqualitäten („Verstopfungsneigung“), langfristige Nutzung („Alterung“), Modellentwicklung und Vorhersage zum Wasserabgabeverhalten in unterschiedlichen Anwendungssituationen, Entwicklung von Empfehlungen für die Praxisanwendung.

Folgende wesentliche Ergebnisse wurden erzielt:

- Der Druckverlust über die Schlauchlänge konnte durch Messungen und Simulationsrechnungen bestätigt und quantifiziert werden. Im in den Boden eingebauten Zustand ist der gemessene Druckabfall aufgrund bodenphysikalischer Prozesse allerdings sehr viel geringer als unter Laborbedingungen. Ebenso führt ein reduzierter Eingangsdruck (0,2 bar) zu einem geringeren Druckabfall im Schlauch. Dadurch konnten in der Praxis Schlauchlängen von bis zu 75 m Länge mit befriedigender Wasserverteilung realisiert werden.
- Der Perlschlauch ist empfindlich gegen eine Verstopfung der Poren durch Schwebstoffe im Bewässerungswasser. Als Konsequenz muss notwendigerweise ein Wasserfilter vorgeschaltet sein.
- Alterungsprozesse, wie Austrocknung, Frost, Hitze, Quellen führen zu leichten Veränderungen im Wasserauslass. Dieser liegt aber in ähnlichen Größenordnungen wie die derzeitige Variabilität der Schläuche und kann deshalb zunächst vernachlässigt werden.
- Die angestrebte Langfriststabilität des Schlauches (25 Jahre Nutzungsdauer) konnte naturgemäß in einem Kurzprojekt nicht abschließend durch Messungen belegt werden. Untersuchungen an einem sehr ähnlichen Perlschlauch, der 24 Jahre für eine Sportplatzbewässerung erfolgreich genutzt wurde, haben allerdings gezeigt, dass der untersuchte Schlauch nach dieser Zeit noch immer voll funktionsfähig war.
- Simulationen der hydraulischen Prozesse im Schlauch und im umgebenden Boden konnten erfolgreich durchgeführt werden. Die Simulationen wurden als Grundlage für Praxisempfehlungen zu Verlegeabstand, Verlegetiefe und Bewässerungsintensität benutzt.

Das Bewässerungssystem Perlschlauch (permatube®) zeigte im Projektverlauf das grundsätzliche Potential durch effiziente und wassersparende Bewässerung die sozialen und technischen Folgen der Wasserknappheit in Ländern und Gebieten mit Trockenheit zu lindern. Weiterer Forschungsbedarf besteht vor allem bei Fragen des Übergangs des Wassers vom Perlschlauch in den Boden bei unterschiedlichen Bodenarten und Feuchtezuständen. Optimierungsbedarf bei der Produktion der Schläuche besteht vor Allem bei deren Homogenität, die zwar verbessert wurde, aber noch immer nicht vollständig befriedigt.

Bearbeitet wurde dieses Projekt von den Kooperationspartnern Water Future Systems und der Hochschule Osnabrück. Es wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ 31988/01).

II Einleitung

Schätzungen der *Food and Agricultural Organisation* (FAO) zufolge liegen etwa 25 % der Landoberfläche, näherungsweise 3000 Millionen Hektar, unter dem Einfluss von aridem Klima. Das bedeutet, dass eine landwirtschaftliche Nutzung dieser Regionen aufgrund von mangelndem Niederschlag und zunehmender Wasserknappheit nur unter erschwerten Bedingungen möglich ist. Ein sorgsamer und effizienter Umgang mit Wasser ist somit von großer Wichtigkeit. In einer nachhaltigen Landwirtschaft steht unter diesen Umständen die Reduzierung des Wasserverbrauchs bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität an erster Stelle. Effiziente und wassersparende Bewässerungsformen können dazu beitragen, die sozialen und technischen Folgen der Wasserknappheit zu lindern. Die derzeit wichtigsten Methoden sind die traditionelle Anstaubewässerung, die Tropfbewässerung (ober- und unterflur) sowie die klassische Beregnung. Das geeignete Bewässerungsverfahren für das jeweilige Anbaugebiet muss sich nach den Gegebenheiten vor Ort richten. Entscheidende Faktoren sind die Bodenbeschaffenheit, die Hanglage, das Wasserangebot, der zu bewässernde Pflanzenbestand sowie die Verfügbarkeit technischer und finanzieller Mittel.

Neben dem Wassereinsparungspotenzial müssen effiziente Bewässerungssysteme insbesondere kostengünstig und ressourcenschonend sein, d.h. im Idealfall vollständig aus recycelten Materialien bestehen. Der aktuelle Bewässerungsperlschlauch von Water Future Systems besteht zu ca. 2/3 aus Gummigranulat aus der Altreifenaufbereitung und zu ca. 1/3 aus recyceltem Polyethylen. Der als **permatube**[®] bekannte Schlauch ist seit einigen Jahren als Nischenprodukt im Hobbygartenbereich auf dem Markt. Im Unterschied zu herkömmlichen Unterflur-Tropfbewässerungssystemen tritt das Wasser nicht aus Tropfern aus, sondern quillt über die Gesamtlänge des Perlschlauches aus den Poren und wird damit gleichmäßiger im Boden verteilt.

Da zu Projektbeginn nur unzureichende Erfahrungswerte im praktischen Einsatz mit dem Perlschlauch bei landwirtschaftlicher Großflächenbewässerung vorlagen mussten im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsprojektes reproduzierbare Ergebnisse und Erkenntnisse über die Funktionalität des Unterflur-Bewässerungsperlschlauches gewonnen werden. Technische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber Oberflächenbewässerungsverfahren und insbesondere gegenüber der Unterflur-Tropfbewässerung sollten so nachgewiesen werden, damit neue große internationale Absatzmärkte für das Unterflur-Bewässerungssystem permatube[®] erschlossen werden können. Die hohe Umweltrelevanz in Form einer erheblichen Wasser- und Energieeinsparung bei der Bewässerung in ariden und semiariden Gebieten und eine Vermeidung der Versalzung von Böden durch die starke Verminderung der Oberflächenverdunstung trugen neben dem Einsatz von Recyclingmaterialien maßgeblich zur Förderwürdigkeit des Projektes durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt bei.

Im Rahmen des Projektes wurden die Eigenschaften des aktuell produzierten Unterflurbewässerungsperlschlauches (permatube[®]) der Firma Water Future Systems in Kooperation mit der Hochschule Osnabrück wissenschaftlich untersucht und dokumentiert. Ziel war die Neuentwicklung eines effizienten Unterflur-Bewässerungssystems mit vollautomatischer Regelung für den Einsatz in der landwirtschaftlichen Großflächenbewässerung in ariden und semiariden Regionen, sowie in Trockengebieten des gemäßigten Klimas. In dem vorliegenden Projektbericht werden die Ergebnisse aus dem bewilligten 1. Projektteil vorgestellt.

Im Frühjahr 2015 erfolgte die finale Abstimmung der Kooperationspartner zur Vorgehensweise im Forschungsprojekt mit der Erstellung eines Pflichtenheftes. Das übergeordnete Ziel war die Optimierung des Unterflur-Bewässerungssystems hinsichtlich Wasserabgabegleichmäßigkeit und Lebensdauer.

Die **Vorgehensweise** gliederte sich grob in nachfolgende Schritte:

1. *Untersuchung und Evaluierung des aktuellen Perlschlauchs,*
2. *Verbesserung der Produkteigenschaften durch Anpassung der Produktionsparameter,*
3. *Untersuchung und Evaluierung des verbesserten Perlschlauchs.*

Zur Zielerreichung wurden diese Schritte im Detail durch **8 Arbeitspakete** genauer beschrieben:

1. *Abgestimmte Erstellung des Pflichtenhefts für das Entwicklungsprojekt durch die Projektpartner*
2. *Bewertung des derzeitigen Unterflur-Bewässerungsperlschlauchs*
3. *Durchführung von Simulationsreihen*
4. *Ermittlung der Optimierungsparameter für den neuen Unterflur-Bewässerungsperlschlauch*
5. *Entwicklung des neuen Produktionsprozesses*
6. *Funktionsüberprüfung des Unterflur-Bewässerungssystems und Prototypenentwicklung*
7. *Erarbeitung von Anwendungsrichtlinien auf naturwissenschaftlich-bodenphysikalischer Basis für den effizienten Einsatz des neuen Unterflur-Bewässerungsperlschlauchs im Kontext zu optimaler Verlegetiefe, optimalem Verlegeabstand, maximalen Verlegelängen in Abhängigkeit von Relief und Bodenart*
8. *Projektbegleitende Dokumentation, Erstellung von Berichten, Projektbesprechungen*

Zu Beginn des Forschungsprojektes erstellten die teilnehmenden Projektpartner ein Pflichtenheft, welches den geplanten **Projekttablauf** und die erforderlichen Arbeitsschritte detailliert darstellt.

Im **ersten Projektquartal** sind umfangreiche Recherchen zu Wasserverteilung, Druckverhalten und Bodenabhängigkeiten erfolgt. Vorarbeiten für Labor- und Feldversuche wurden durchgeführt.

Einfache Vorversuche im Freiland zur Konkretisierung der Hauptversuche konnten bereits erfolgen und zeigten erste, zunächst vorläufige Ergebnisse:

- Der Druckabfall bei langen nicht-eingebauten Schläuchen ist sehr groß.
- Die Wasserabgabe nimmt mit der Länge des Perlschlauches ab.
- Die Wasserabgabe ist bei niedrigem Eingangsdruck gleichmäßiger.

Anhand dieser Ergebnisse konnten erste Ansätze zur Eichung computergestützter Simulationsmodelle formuliert werden. Die Resultate kamen den Ergebnissen der Vorversuche mit kleinen Abweichungen sehr nahe und eigneten sich somit als Basis für nachfolgende Simulationsreihen.

Nach Arbeitsbeginn der Projektmitarbeiterin an der Hochschule Osnabrück konnten im **zweiten Projektquartal** nach Entwicklung des optimalen Messaufbaus repräsentative Laborversuche zur Charakterisierung der aktuell produzierten Perlschläuche durchgeführt werden.

Bei der Untersuchung zur Homogenität der Wasserabgabe wurde eine hohe Variabilität innerhalb und zwischen verschiedenen Schläuchen festgestellt. Zeitgleich wurden erste Unterflur-Versuche im Folienhaus und die Eichung der Bodenfeuchte-Sensoren durchgeführt. Versuchsaufbauten und Messreihen zur Bestimmung der Einflussfaktoren Porenverstopfung sowie Alterung durch Wärme und Kälte wurden geplant.

Die Testinstallation bei dem externen Partner Tropenhaus „Klein Eden“ in Tettau wurde initiiert und für den Versuchsbeginn im November vorbereitet. Hierbei handelte es sich um eine Flächeninstallation zur Bewässerung von Papaya unter Verwendung verschiedener Wasserqualitäten.

Die bis dato gewonnenen Labormessergebnisse ließen erste Schlussfolgerungen zur Konzeptionierung neuer Perlschlauchtypen zu und bildeten eine Grundlage für die Anpassung des Produktionsverfahrens zur Reduktion der Wasserabgabevervariabilität.

Zu Beginn des **dritten Projektquartals** erfolgten weitere Freilandversuche zur Wasserverteilung im Boden sowie die Installation im Tropenhaus „Klein Eden“.

Die parallel durchgeführten computerbasierten Simulationen der Wasserverteilung im Perlschlauch und der Wasserabgabe im Boden zeigten nachvollziehbare Ergebnisse für die spätere Erarbeitung von Anwendungsempfehlungen. Bei den Untersuchungen zur Homogenität der Wasserabgabe zeigte sich eine erhebliche Variabilität innerhalb und zwischen den Produktionschargen. Dies erforderte umfangreiche Anpassungen der Produktion, was im derzeit verwendeten Maschinendesign nicht möglich war. Somit war die Entwicklung einer neuen Extrusionsapparatur erforderlich. Dies beanspruchte viel projektexterne Entwicklungszeit und erforderte ein **Pausieren des Forschungsprojektes**. Eine kostenneutrale Projektlaufzeit-Verlängerung um 9 Monate wurde beantragt.

Zwischenzeitig wurden im Frühjahr/Sommer 2016 Freilandversuche zur Wasserverteilung in einer Baumschule durchgeführt (Rhododendren, Laufzeit 3 Monate; Exaktversuch, 15 m Länge) sowie auf Versuchsflächen der Hochschule Osnabrück, welche ebenfalls eine starke Heterogenität der Wasserabgabe zeigten und somit die Notwendigkeit der Produktionsanpassung untermauerten.

Die Fertigstellung der Extrusionsapparatur nahm mehr Zeit in Anspruch als erwartet, so dass diese erst im April 2017 einsatzbereit war. Zwischenzeitig kam es zu einer Umfirmierung des Antragstellers, was eine Umwidmung der Fördermittelzuwendung erforderte. Aufgrund der unerwartet langen Unterbrechung konnte das Forschungsprojekt schließlich erst mit dem Arbeitsbeginn der neuen Projektmitarbeiterin der Hochschule Osnabrück im Januar 2018 wiederaufgenommen werden. Da das Projekt von Seiten des Kooperationspartners durch wechselnde Mitarbeiter betreut wurde, entstand ein erhöhter Arbeitsaufwand besonders durch Einarbeitung und Recherche.

Viertes Projektquartal: Mit der neuen Extrusionsapparatur wurden nach umfangreichen Vorarbeiten verschiedene Perlschlauch-Prototypen hergestellt, die sich zum einen in der Materialzusammensetzung, zum anderen in der Wasserabgabemenge unterscheiden. Diese neuen Perlschläuche wurden größtenteils mit Hilfe der gleichen Untersuchungsmethoden wie die Vorgängerschläuche getestet.

In einem Praxisversuch in Marokko wurden unter trockenen Klimabedingungen der Einsatz der Perlschläuche unter sehr geringen Drücken erfolgreich getestet. Dieses Verfahren führt zu einer zusätzlichen Umweltentlastung, da die Bewässerungspumpen nur noch zum Füllen des Vorratsbehälters genutzt werden müssen und nicht dauerhaft beim Bewässerungsvorgang.

Anhand von Praxiserfahrungen und Ergebnissen aus Simulationsberechnungen wurden Anwendungsempfehlungen für den optimalen Einsatz des Perlschlauchs unter verschiedenen Bedingungen erstellt. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der Simulationsberechnungen den Praxisbedingungen sehr nahekommen. Gegen Ende der Projektlaufzeit ist ein Verfahren entwickelt worden, um den Perlschlauch mit mehr Altreifen-Anteil und weniger PE-Anteil strukturoptimiert zu produzieren. Dieser neue Perlschlauch zeigte bei ersten Untersuchungen nicht das bisher typische Schrumpfverhalten und gleichzeitig ein sehr homogenes Perlbild ohne Spritzer.

III Hauptteil

Maßgeblich für ein im professionellen Anbau nutzbares Bewässerungssystem ist die gleichbleibende Qualität der Bewässerungsschläuche, eine gleichmäßige Wasserverteilung im Boden und eine hohe Alterungsbeständigkeit.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse zur Variabilität der Wasserabgabe der Schläuche, zur Wasserverteilgenauigkeit und zu Unterschieden der Wasserabgabe bei in den Boden eingebauten und oberirdisch verlegten Schläuchen vorgestellt. Anschließend wird auf Untersuchungen zur Verstopfung und Alterung der Schläuche eingegangen und es werden Änderungen im Produktionsprozess vorgestellt, die eine Optimierung der Schlaucheigenschaften zur Folge haben sollten. Simulationen der hydraulischen Prozesse im Schlauch sowie Simulationen der Interaktion von Wasser in Schlauch und Boden wurden als Grundlage zur Optimierung der Schlaucheigenschaften sowie zur Erstellung von Anwendungsempfehlungen für den praktischen Einsatz der Schläuche verwendet.

1 Untersuchung und Simulation des Perlschlauchs

1.1 Permeabilität und Wasserabgabe der Perlschläuche

Zur Ermittlung der Variabilität der Materialeigenschaften der Perlschläuche wurde im Labor der Hochschule Osnabrück die Durchlässigkeit der Schläuche ermittelt. Dazu wurden Schläuche verschiedener Produktionschargen mit unterschiedlicher Wasserabgabe untersucht. Um die Erfolge der Optimierungen im Produktionsprozess beurteilen zu können wurden Ergebnisse der Voruntersuchungen mit den Ergebnissen zu Projektende verglichen. Als Maßzahlen ermittelt wurden die Permeabilität K (verwendet im Wesentlichen für die Simulation der hydraulischen Prozesse im Schlauch), die gesättigte Wasserleitfähigkeit K_f (verwendet zur Simulation der im Boden eingebauten Schläuche) sowie die spezifische Wasserabgabe W_s (als typische in der Bewässerungstechnik verwendete Praxismaßzahl).

1.1.1 Physikalische Grundlagen

Die **Permeabilität K** ist definiert als:

$$K = \frac{v \cdot \eta \cdot \Delta x}{\Delta P} = \frac{Q \cdot \eta \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta P}$$

mit

K = Permeabilität [m^2]

v = Fließgeschwindigkeit [$m \cdot s^{-1}$]

η = dynamische Viskosität des Fließmediums [$N \cdot s \cdot m^{-2} = Pa \cdot s$]

Δx = durchströmte Länge des porösen Körpers in m

ΔP = Druckdifferenz [$Pa = N \cdot m^{-2}$] (nach dem Strömen)

Q = Volumenstrom [$m^3 \cdot s^{-1}$]

A = durchströmte Querschnittsfläche des porösen Körpers [m^2]

Zur Bestimmung der Permeabilität wurden Q , Δx , A und ΔP gemessen, für die dynamische Viskosität η wurden Standardwerte verwendet.

Die **gesättigte Wasserleitfähigkeit** K_f errechnet sich aus der Permeabilität K als

$$K_f = \frac{K \cdot \rho \cdot g}{\eta} = \frac{Q \cdot \Delta x \cdot \rho \cdot g}{A \cdot \Delta P}$$

mit
 K_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit [m s^{-1}]
 ρ = Dichte des Fluids [kg m^{-3}], bei Wasser 1000 kg m^{-3}
 g = Erdbeschleunigung [m s^{-2}] ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)

Bei inkompressiblen Flüssigkeiten (wie Wasser) ist p konstant und der hydrostatische Druck $P = \rho \cdot g \cdot h$

$$K_f = \frac{Q \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta h}$$

mit
 K_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit [m s^{-1}]
 Δx = durchströmte Länge des porösen Körpers in m
 Q = Volumenstrom [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]
 A = durchströmte Querschnittsfläche des porösen Körpers [m^2]
 Δh = Höhendifferenz, über die die Strömung erfolgt [m]

Die **spezifische Wasserabgabe** W_s ist definiert als

$$W_s = \frac{Q}{\Delta x}$$

mit
 W_s = spezifische Wasserabgabe [$\text{L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$]
 Q = Volumenstrom [L h^{-1}]
 Δx = durchströmte Länge des porösen Körpers in m

Für alle Messungen wurde die spezifische Wasserabgabe auf die Zeit von einer Stunde und einen Schlauchabschnitt von 1 m bezogen. Aus den gemessenen spezifischen Wasserabgaben wurden die Permeabilitäten K sowie die gesättigten Wasserleitfähigkeiten K_f berechnet. Da diese Werte ausschließlich für die Simulationen Verwendung fanden, werden im Folgenden aus Gründen der Praxisnähe jeweils nur die Ergebnisse vorgestellt.

1.1.2 Versuchsaufbau

Für die Messung der Durchflussrate wurde folgender Versuchsaufbau verwendet (Abb.1): Am Anfang des Perlschlauches befindet sich eine Kopfstation mit einstellbarem Druckregler und digitalem Manometer. Mit einer Schlauchkupplung ist das Schlauch-Teststück angeschlossen. Ein PVC-Auffangrohr dient zum Auffangen und Weiterleiten des durch den Perlschlauch abgegebenen Wassers. Das Perlschlauchstück ist am Ende durch einen dichten Brausehandgriff (zur Belüftung vor Messbeginn) verschlossen.

Das in einem bestimmten Zeitraum austretende Wasser wird in einem Messbecher aufgefangen und die Was-

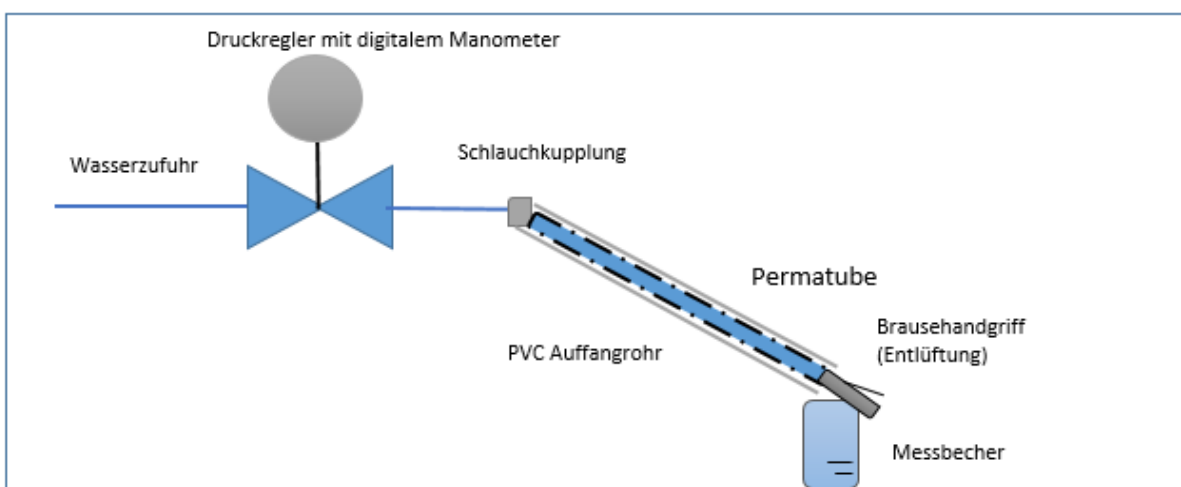


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Messung der Durchflussrate im Labor

sermenge gravimetrisch ermittelt. Mit diesem Versuchsaufbau wurden Schlauchstücke von jeweils 1 m Länge

bei verschiedenen Eingangsdrücken über einen Zeitraum von 1 min in jeweils fünffacher Wiederholung gemessen. Zur Messung der Variabilität der Durchflussraten innerhalb einer Perlschlauchrolle wurden von verschiedenen Rollen jeweils Meterstücke entnommen. Dabei wurden am Anfang und am Ende der Rolle jeweils 5 x 1 m entnommen. Dazwischen wurden jeweils im Abstand von 20 m Meterstücke beprobt.

1.1.3 Ergebnisse zur Variabilität der Perlschläuche

In den Projektjahren 2015 bis 2018 sind verschiedene Untersuchungen zur Ermittlung der Homogenität der Perlschläuche durchgeführt worden. Die Untersuchungen an 6 verschiedenen Schläuchen im Jahr 2015 ergaben folgende Ergebnisse (Tab. 1):

Tabelle 1: Variabilität der Durchflussraten an 6 verschiedenen Testschläuchen 2015

Nr	Minimale Durchflussrate [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Maximale Durchflussrate [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Mittlere Durchflussrate [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Standardabweichung [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Variationskoeffizient [%]
1	16,0	23,8	20,9	3,38	16,2
2	37,0	53,5	45,9	6,42	14,0
3	5,7	14,7	9,5	2,56	26,9
4	3,9	13,2	9,6	2,97	30,9
5	36,2	45,8	39,8	3,38	8,5
6	15,9	19,0	17,1	1,68	9,8

Die Ergebnisse der Messungen zeigten immer wieder signifikante Unterschiede in der spezifischen Wasserabgabe. Diese traten sowohl zwischen den Chargen als auch innerhalb einer Rolle Perlschlauch auf. Die Variationskoeffizienten schwankten zwischen 8,5 und 30,9 %. Der mittlere Variationskoeffizient lag bei 17,7 %. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde im Jahr 2017 eine neue Produktionsanlage aufgebaut (siehe Kapitel 2).

Die mit der neuen Extrudieranlage produzierten Perlschlauch-Prototypen wurden Anfang 2018 an der Hochschule Osnabrück nach gleicher Messmethode überprüft.

Untersucht wurden „normal dichte“ Schläuche ($W_s \approx 50 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$) und zwei neue Prototypen „Perlschlauch dicht 0,28“ und „Perlschlauch dicht 0,36“ ($W_s \approx 19 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$).

Abb. 2 zeigt die gemessene spezifische Wasserabgabe über eine Schlauchlänge von 100 m für die verschiedenen Schläuche. Innerhalb der 5 Messwiederholungen lassen sich nur sehr geringe Abweichungen in der abgegebenen Wassermenge feststellen. Betrachtet man die spezifische Wasserabgabe innerhalb der 5 nebeneinanderliegenden Messungen der ersten und letzten 5 m des Gesamtschlauches, so ist auffällig, dass die Unterschiede sehr kleinräumig sein können. Auch bei der Betrachtung der Abschnitte 20 m, 40 m, 60 m und 80 m ist eine Variabilität erkennbar, die in ähnlich ausgeprägt ist wie bei der kleinräumigen Analyse des Anfangs- und Endbereiches.

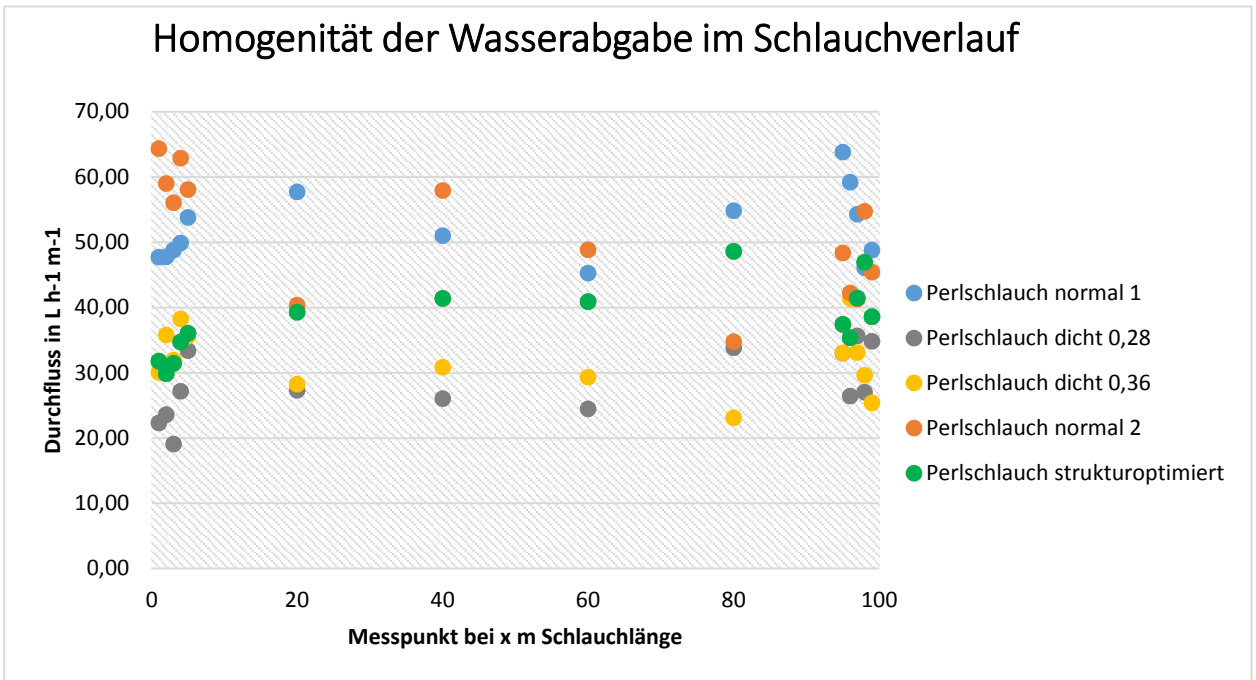


Abbildung 2: Homogenität der spezifischen Wasserabgabe von Perlschläuchen im Verlauf der 100m Rollen

Tabelle 2 zeigt zusammengefasst die Ergebnisse zur Variabilität der Durchflussraten der nach der Produktionsoptimierung produzierten Schläuche. Die Ergebnisse der Messungen zeigen auch bei diesen Messungen immer wieder signifikante Unterschiede in der spezifischen Wasserabgabemenge. Die Variationskoeffizienten schwankten zwischen 10,4 und 18,3 %. Der mittlere Variationskoeffizient liegt bei 15,2 %. Im Vergleich zu den Messungen aus dem Jahr 2015 ist die Variabilität der Schläuche zurückgegangen.

Tabelle 2: Variabilität der Durchflussraten an 6 verschiedenen Testschläuchen 2018

	Minimale Durchflussrate [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Maximale Durchflussrate [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Mittlere Durchflussrate [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Standardabweichung [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Variationskoeffizient [%]
normal 1	45,3	63,8	52,1	5,43	10,4
normal 2	34,8	64,4	51,0	9,25	18,1
dicht 1	19,1	35,7	28,2	5,16	18,3
dicht 2	23,1	41,4	31,9	4,90	15,4
strukturoptimiert	29,9	48,6	38,2	5,32	13,9

Einzelne Abschnitte desselben Perlschlauches unterscheiden sich somit auch nach der Produktionsoptimierung sowohl bei den „normal dichten“ als auch bei den „dichten“ Varianten signifikant voneinander. Bei dichteren Perlschlauchtypen fallen die Abweichungen deutlich höher ins Gewicht als bei offenporigen Varianten, was sich in höheren Variationskoeffizienten widerspiegelt. Die Homogenität im Schlauchverlauf konnte durch die neue Extrudieranlage in Teilen verbessert werden. Die Variationskoeffizienten liegen deutlich unter 20 %. Besonders der neue strukturoptimierte Perlschlauch-Prototyp sticht mit einem Variationskoeffizienten

in Höhe von 13,9 % heraus. Im Vergleich der Mittelwerte konnte nachgewiesen werden, dass sich die verschiedenen Rollen einer Dichte nicht voneinander unterscheiden. Das lässt grundsätzlich auf einen stabilen Produktionsprozess schließen. Die kleinräumige Variabilität ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass vereinzelt große Poren auftreten, aus denen punktuell größere Wassermengen (Spritzer) austreten (Abb. 3). Durch Optimierungen im Produktionsprozess wurde dieser Effekt beim „strukturopptimierten“ Perlschlauchtyp reduziert.



Abbildung 3: Punktuellcs Austreten größerer Wassermengen

1.2 Porenverteilung

Um die Homogenität der Schläuche im Detail zu untersuchen, wurde das Material im Januar 2016 an der HS Osnabrück-Westerberg in den Laboren der Kunststoffprüfung an Dünnschnitten hinsichtlich der prozentualen Porenverteilung überprüft. Es wurden Perlschläuche aus dem Jahr 2015 mikroskopisch untersucht. Dabei wurde deutlich, dass die Porenverteilung in Querschnitt und Längsschnitt vergleichbar ist. Für die Ermittlung der Porengrößen bzw. Porenanteile wurden dünne Teilstücke der Querschnitte („Halbkreise“) verwendet. Aufnahmen der Schnittflächen erfolgten mittels Stereoskop (Beispiel Abb. 4).

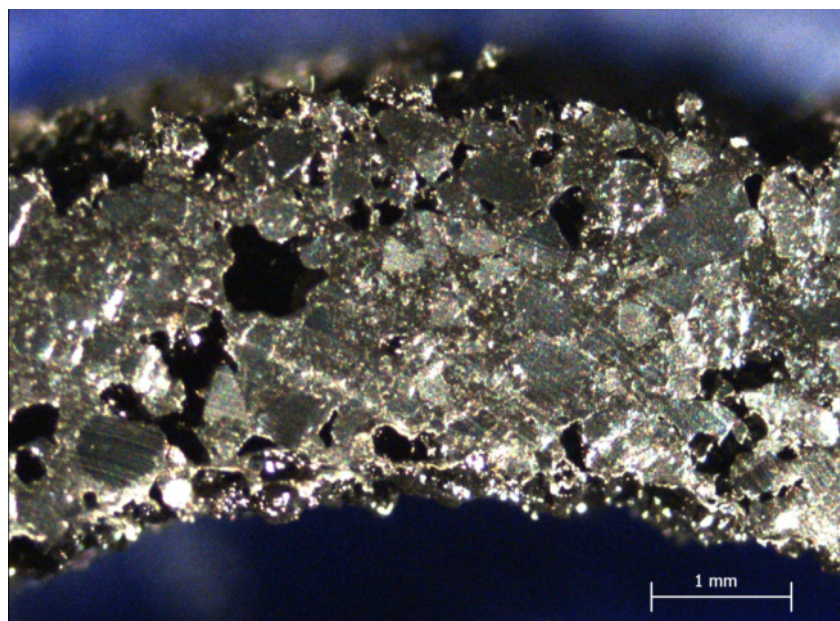


Abbildung 4: Porenverteilung - Darstellung mittels Stereomikroskop

Für jedes Foto wurden anschließend drei Quadrate á 2x2 mm untersucht und aus den Wiederholungen je Perlschlauch-Charge ein Mittelwert für den Porenanteil gebildet. Zur Auswertung der Fotos wurde das Programm AxioVision der Firma Zeiss verwendet. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 5 dargestellt.

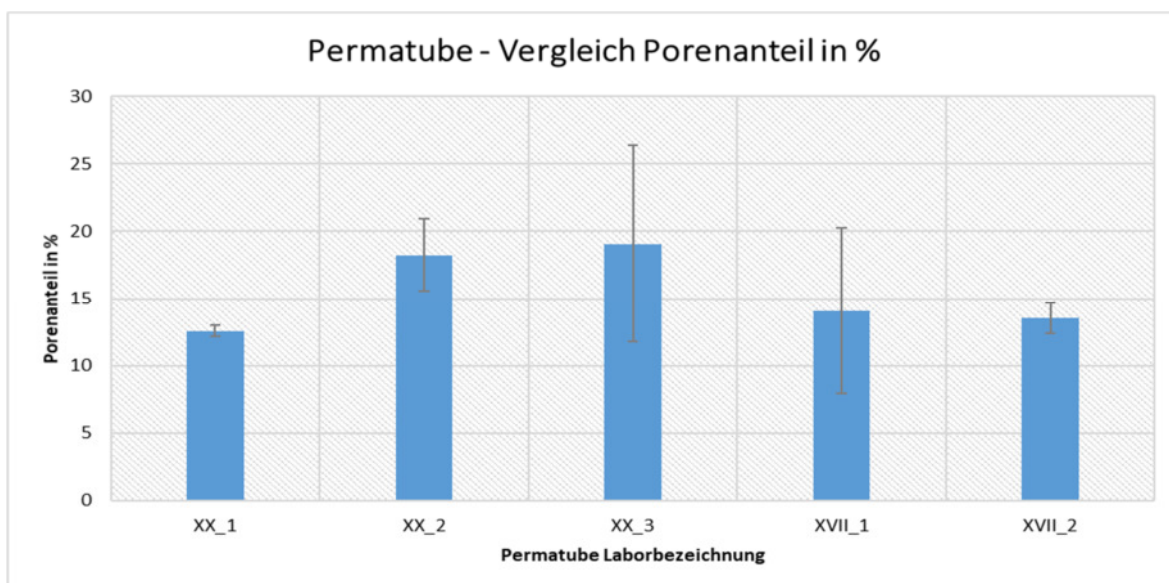


Abbildung 5: Porenanteil verschiedener Perlschlauchabschnitte

Die Analysen der 5 ausgewerteten Schnittflächen zeigen z. T. signifikante Unterschiede. Der Mittelwert des Porenanteils liegt bei 15,5 % mit einem Variationskoeffizienten von 19,1 %. Die Unterschiede in der Durchflussrate der Perlschläuche innerhalb eines Schlauches auf dessen gesamter Länge können also zum Teil durch diese ungleiche Porenverteilung begründet werden.

1.3 Druckverlust und Wasserauslass im nicht eingebauten Zustand

Der Perlschlauch ist aufgrund seiner Bauart nicht druckkompensiert. Zum „normalen“ Druckverlust durch Innenwandrauheit kommt beim Perlschlauch ein Druckverlust über die Schlauchlänge aufgrund der Porosität des Materials. Da Wasser gleichmäßig über die gesamte Schlauchlänge aus dem Perlschlauch austritt muss mit einem größeren Druckverlust gerechnet werden als bei geschlossenen Schläuchen. Ob dadurch am Ende eines Perlschlauches weniger Wasser austritt als am Anfang, sollte in nachfolgenden Untersuchungen ermittelt werden. Dazu werden zunächst die Durchflussraten aus dem Perlschlauch im nicht-eingebauten Zustand ermittelt. Im eingebauten Zustand sind wegen des Gegendrucks des Bodens und der geringeren Wasserleitfähigkeit im Boden durchaus andere Ergebnisse zu erwarten. Dies soll in anschließenden Untersuchungen geklärt werden.

Für die erste Messung im nicht-eingebauten Zustand wurde an eine Kopfstation mit einstellbarem Druckregler (0,2-2,0 bar) und Durchflusszähler ein 100 m langer Perlschlauch angeschlossen. Dieser wurde am Anfang und am Ende jeweils mit einem Manometer versehen. Der Perlschlauch wurde oberirdisch gleichmäßig auf Europaletten verlegt. Zwischen den Paletten wurden alle 5 m Kunststoffwannen von 50 cm Länge für das Auffangen des austretenden Wassers integriert.

Abbildung 6 zeigt, dass die abgegebenen Wassermengen erwartungsgemäß stark vom Eingangsdruck abhängen: Je höher der Einspeisedruck, desto höher ist die abgegebene Wassermenge.

Mit zunehmender Schlauchlänge nahm die abgegebene Wassermenge je Messpunkt stetig ab. Ab dem Messpunkt bei 57,5 m Schlauchlänge hatte der Einspeisedruck nahezu keinen Einfluss mehr auf die abgegebene Wassermenge in $\text{L h}^{-1} \text{m}^{-1}$. Die geringste spezifische Wasserabgabe wurde weiterhin beim geringsten Einspeisedruck von 0,2 bar abgegeben (zwischen 0,7 und $1,6 \text{ L h}^{-1} \text{m}^{-1}$). Die weiteren Messwerte der Versuchsvarian-

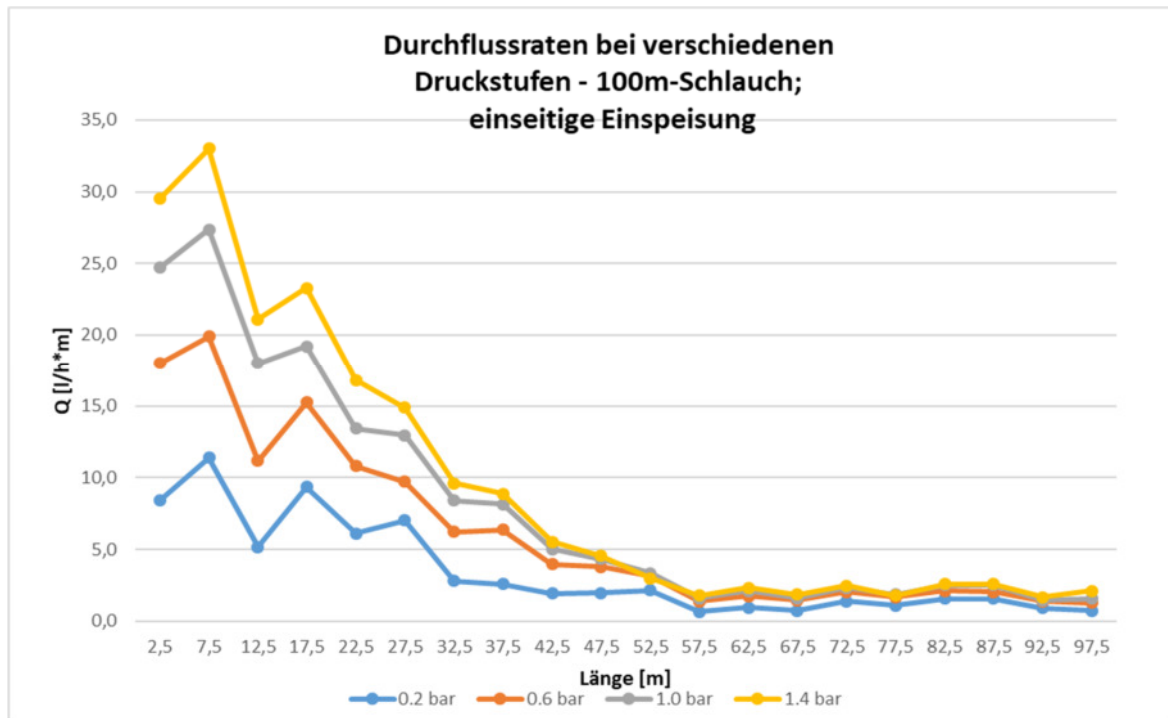


Abbildung 6: Spezifische Wasserabgabe (nicht eingebaut) an unterschiedlichen Messpunkten

ten mit 0,6 bar, 1 bar und 1,4 bar pendelten nach dem Messpunkt 57,5 m ebenso auf niedrigem Niveau zwischen $1,4$ und $2,6 \text{ L h}^{-1} \text{m}^{-1}$.

Nachfolgend sind mögliche Ursachen für dieses Ergebnis aufgeführt:

- Aufgrund des hohen Widerstandes in der Rohrleitung wird besonders bei großen Wassermengen in den ersten Metern mehr Wasser nach außen durch die Schlauchwand gedrückt, was zu einer hohen spezifischen Wasserabgabe mit entsprechend hohem Druckabfall führt (Venturi Effekt).
- Nach einer bestimmten Schlauchlänge ist nur noch ein geringer Restdruck vorhanden, so dass sich die Durchflussrate auf einen Minimalwert reduziert. Dieser Minimalwert gilt für den Druck bzw. die Wassermenge, welche aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit keinen Widerstand hervorruft.

Allgemein ist bei niedrigem Eingangsdruck eine gleichmäßigere spezifische Wasserabgabe zu verzeichnen. Da sich bei allen Druckstufen die spezifische Wasserabgabe nach etwa 57,5 m auf $1 - 2 \text{ L h}^{-1} \text{m}^{-1}$ reduziert und dann konstant bleibt, kann dieser Wert als Optimal-Wert für eine konstante Wasserabgabe auf der gesamten Schlauchlänge gedeutet werden.

In einem weiteren Versuch wurden in einem grundsätzlich identischen Versuchsaufbau Durchflussraten und Druckabfall bei unterschiedlichen Druckstufen und Schlauchlängen (5-50 m) in nicht eingebautem Zustand

gemessen. Abb. 7 zeigt die gemessene Abhängigkeit des Enddruckes vom Eingangsdruck. Die spezifische Wasserabgabe sinkt ab einer Schlauchlänge von ca. 15-20 m deutlich. Bei höheren Eingangsdrücken ist der relative und absolute Druckverlust größer als bei niedrigen Eingangsdrücken. Bei einem geringen Eingangsdruck von 0,2 bar ist der Druckverlust und somit die Abweichung der spezifischen Wasserabgabe vernachlässigbar.

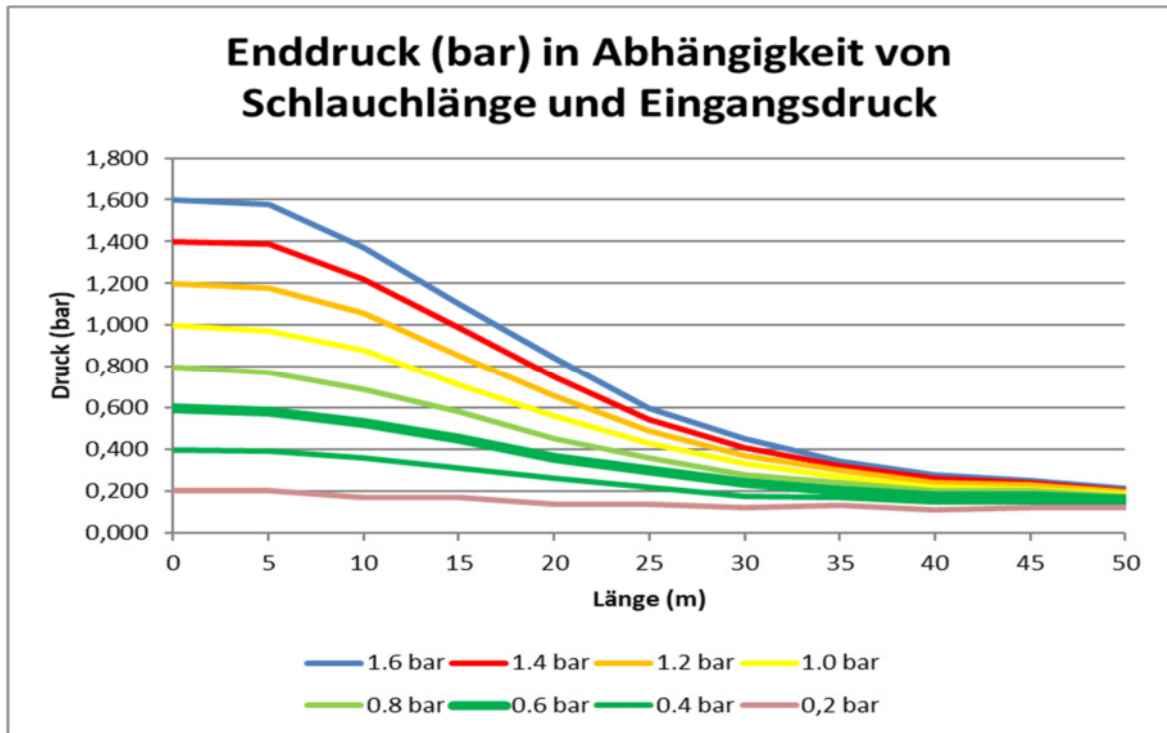


Abbildung 7: Druckverlust in Abhängigkeit vom Eingangsdruck

1.4 Homogenität der spezifischen Wasserabgabe im eingebautem Zustand

1.4.1 Kurze Schlauchlängen (15 m, Folienhaus Osnabrück)

Praxiserfahrungen zeigen, dass im eingebauten Zustand aufgrund des Boden-Gegendrucks und der geringeren Wasserleitfähigkeit im Boden möglicherweise ein geringerer Druckabfall über die Schlauchlänge und damit eine bessere Homogenität der Wasserverteilung besteht, als der beschriebene Druckabfall im nicht-eingebauten Zustand erwarten lässt. Zur Klärung wurde die Homogenität der Wasserverteilung im Boden zunächst bei relativ kurzen Schlauchstücken ermittelt. Anschließend wurde in einem Feldversuch unter trockenen Klimabedingungen untersucht, ob die Ergebnisse auch auf große Schlauchlängen (bis 100 m) übertragbar sind.

Um die Variabilität der Bodenwassergehalte im eingebauten Zustand zu ermitteln, wurden je 2 normale und 2 dichte Perlschläuche in den Folienhäusern des Gartenbauversuchsbetriebes an der Hochschule Osnabrück verlegt. Die Wasserverteilung entlang des Schlauches wurde durch Bodenprobennahmen vor und nach einem je dreistündigen Bewässerungszeitraum dokumentiert. Es erfolgte eine gravimetrische Bestimmung des Bodenwassergehaltes.

Abb. 8 zeigt den Wassergehalt des Bodens vor und nach der Bewässerung. Die Kurve nach der Bewässerung stellt jeweils den Mittelwert aus 2 gleich dichten Perlschläuchen dar (2 x normal, 2 x dicht). Für die Abbildung wurden die Ergebnisse der Bodenprobenahme in jeweils 3 Tiefen (0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm) gemittelt und als ein Wert je Probenahmepunkt dargestellt.

Bei den normalen Perlschläuchen lagen die Wassergehalte des Bodens vor der Bewässerung zwischen 7 und 9 %. Die Bodenfeuchte entlang des 15 m-Schlauches war relativ gleichmäßig verteilt.

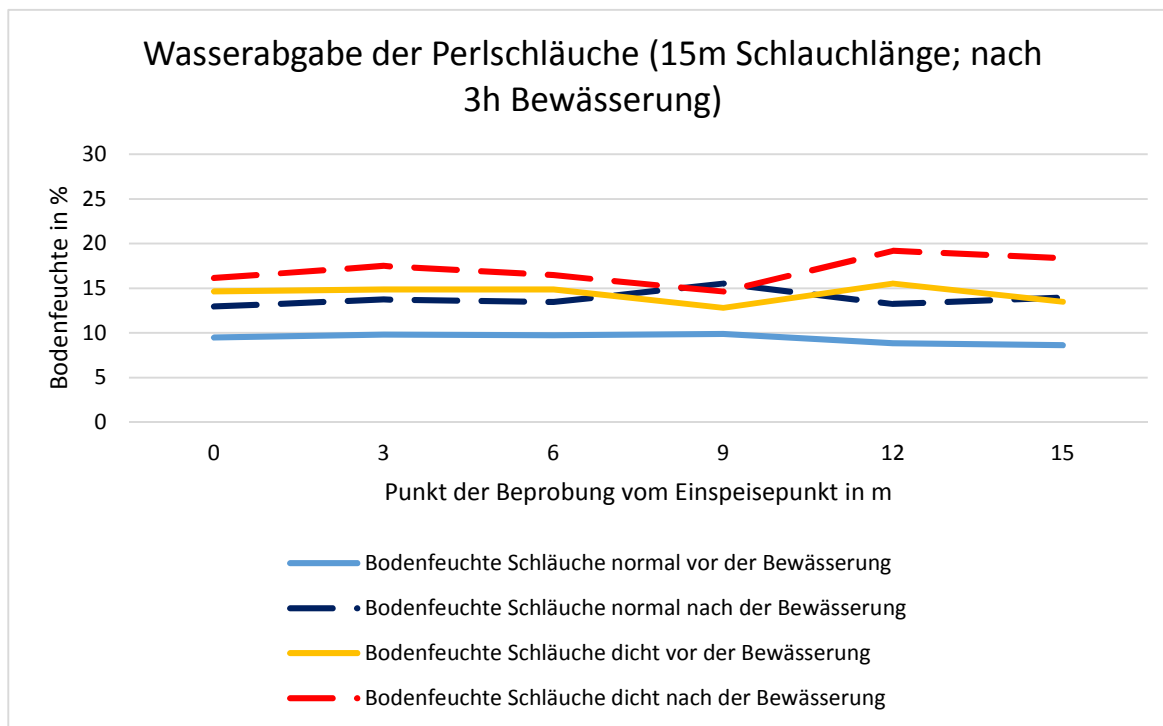


Abbildung 8: Spezifische Wasserabgabe bei 15 m langen Perlschläuchen (im Boden) anhand der Bodenfeuchte

Nach der Bewässerung schwankten die Bodenfeuchten zwischen 13 und 16 %. Nach der dreistündigen Bewässerung hatten die Bodenwassergehalte um ca. 3-4 % zugenommen. Damit gestaltete sich die spezifische Wasserabgabe im Schlauchverlauf (bis auf den Messpunkt bei 9 m) relativ gleichmäßig.

Die Versuche mit den dichten Schläuchen fanden in einem anderen Folienhaus statt. Hier war die Bodenfeuchte zu Versuchsbeginn gegenüber dem ersten Folienhaus (normal dichte Schläuche) um 2-4 % höher. In diesem Fall gibt es bereits vor Bewässerungsbeginn größere Unterschiede im Wassergehalt (zwischen 13 und 16 %). Nach der Bewässerung liegen die Wassergehalte zwischen 14 und 19 % und hatten um zwischen 2 und 4 % zugenommen. Die Inhomogenität der Wassergehalte kann zum Teil durch die heterogenen Ausgangsbedingungen zu Versuchsbeginn erklärt werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es einen messbaren Druckabfall und damit eine Reduzierung des Wasserauslasses im Verlauf der Schlauchlänge gibt. Bis etwa 15 m Schlauchlänge ist der Druckabfall allerdings relativ gering. Im eingebauten Zustand gibt es bei 15 m Schlauchlänge keine Auswirkungen des Druckabfalls auf die gemessenen Wassergehalte im Boden.

1.4.2 Lange Schläuche (100 m, Feldversuch Marokko)

Die Firma Water Future Systems (WFS) unterhält langjährige Kontakte nach Marokko. Hier wurden schon mehrere Projekte geplant und durchgeführt. Marokko sowie die weiteren nordafrikanischen Länder werden aufgrund der ariden Klimaverhältnisse und der sehr Export-lastigen Obst- und Gemüseproduktion als Zielländer für wassersparende und effiziente Bewässerungssysteme angesehen.

Für einen praxisnahen Versuch unter trockenen Klimabedingungen wurden Perlschläuche mit einer Länge von 100 m auf einer Versuchsfläche in der Nähe von Marrakesch in 10 cm Tiefe in den Boden eingebaut. Dafür wurde der Boden mit einem Grubber 10 cm tief gelockert und anschließend 4 Gräben mit einer Länge von 100 m und einer Tiefe von 10 cm ausgehoben. Jeweils 2 normale und 2 dichte Schläuche wurden in die Gräben verlegt, mit Bodenmaterial verfüllt und anschließend rückverfestigt. Dem System wurde ein Wasserfilter vorgeschaltet. Eine einheitliche Beschickung mit Wasser erfolgte für alle 4 Schläuche über eine Kopfstation.

Abweichend zur ursprünglichen Versuchsplanung konnten die Schläuche nicht durch eine Pumpe mit Wasser versorgt werden. Die von WFS empfohlenen Wasserdrücke von 0,6 bar zum Betreiben des Bewässerungssystems konnten deshalb nicht eingesetzt werden. Bewässert wurde stattdessen aus einem Wasservorratsbehälter mit einer Größe von ca. 20 m³. Der Behälter wurde bis zu einer Höhe von knapp 2 m durch einen 160 m tiefen Brunnen gespeist. Für die Versuche stand durch die Wasserhöhe im Becken entsprechend ein Druck von knapp 0,2 bar zur Verfügung.

Die Bewässerung erfolgte über Nacht für insgesamt 16 Stunden. Die abgegebene Wassermenge wurde durch Wasseruhren bestimmt. Anschließend wurde an jeweils 8 Schlauchpositionen (5 m, 10 m, 35 m, 50 m, 65 m, 75 m, 85 m, 95 m) ein Bodenprofil quer zum Schlauch aufgedigelt und die Durchfeuchtung per Kamera dokumentiert. Die Fotos wurden anhand der abgebildeten Durchfeuchtungsfläche visuell ausgewertet (Beispiel in Abb. 9).



Abbildung 9: Durchfeuchtete Fläche nach 16h Bewässerung im Querschnitt zur Verlegerichtung

An den Schlauchpositionen wurden ebenfalls Bodenproben entnommen und durch anschließende Trocknung der Wassergehalt bestimmt. Aus diesen Daten wurde die in den Boden eingetragene Wassermenge berechnet. Ziel war es, die Gleichmäßigkeit der abgegebenen Wassermenge im Verlauf des 100 m langen Perlschlauchs zu bestimmen.

Die beiden Schläuche mit normaler Dichte zeigten nahezu identische Durchflusswerte in Höhe von ca. 120 L h⁻¹ bzw. 1,20 L h⁻¹ m⁻¹. Die beiden dichten Schläuche unterschieden sich herstellungsbedingt leicht in ihrer spezifischen Wasserabgabe. Der Schlauch „dicht 1“ zeigte bei der Qualitätskontrolle direkt nach der Herstellung etwas geringere spezifische Wasserabgaben als der Schlauch „dicht 2“. Entsprechend lagen die Durchflusswerte bei 48 und 62 L h⁻¹ bzw. 0,48 und 0,62 L h⁻¹ m⁻¹ (Tab. 3).

Tabelle 3: Versuch 4 Schläuche a 100m eingebaut - Ergebnisse

	Schlauch A	Schlauch B	Schlauch C	Schlauch D
	normal 0,83	normal 0,83	dicht 0,28	dicht 0,34
abgegebene Wassermenge (L)	1922	1913	769	990
Dauer Bewässerung (h)	16	16	16	16
Durchfluss (L h ⁻¹)	120,1	119,6	48,1	61,9
Durchfluss (L h ⁻¹ m ⁻¹)	1,20	1,20	0,48	0,62
Durchfluss bei 16h Bewässerung (L m ⁻¹)	19,22	19,13	7,69	9,9

Abb. 10 zeigt die spezifische Wasserabgabe der „normalen“ Schläuche A und B auf den untersuchten Teilstücken. Die Schläuche verhalten sich nahezu identisch.

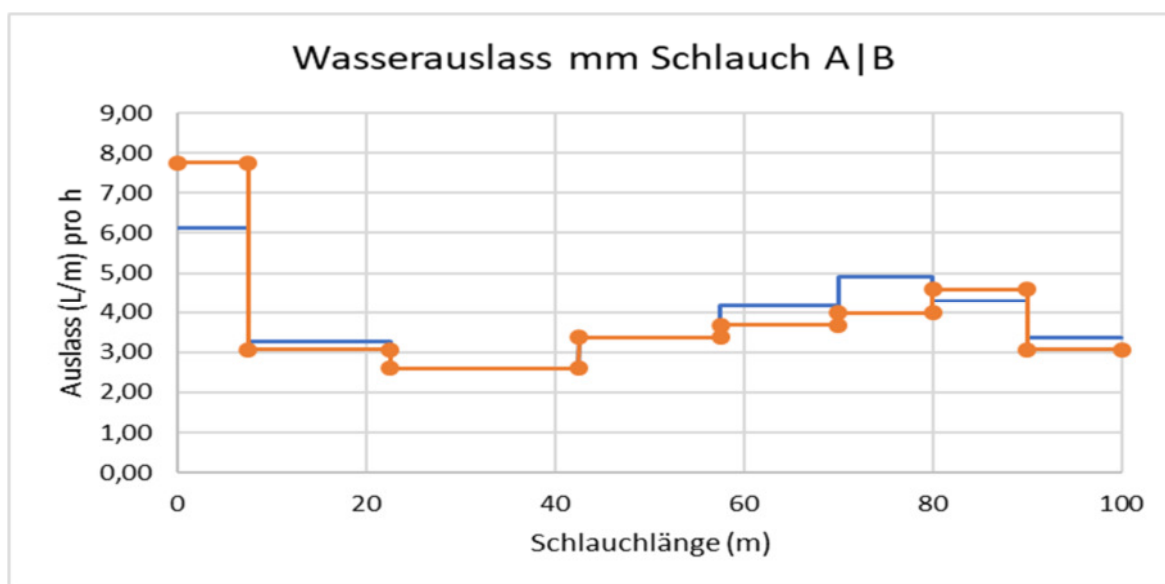


Abbildung 10: normale Schläuche – Verteilung der Wassermenge entlang des 100 m-Perlschlauches

Innerhalb der ersten 7,5 m konnte aus den Durchfeuchtungswerten ein erhöhter Wasseraustritt in Höhe von 6,1 bis 7,8 L h⁻¹ m⁻¹ berechnet werden. Dieser fiel auf dem Teilstück von 7,5-22,5 m auf ca. 3 L h⁻¹ m⁻¹ ab. Ein weiterer geringerer Abfall der spezifischen Wasserabgabemenge war auf dem Teilstück zwischen 22,5 und 42,5 m zu verzeichnen. Auf den folgenden Metern des Schlauches incl. des Teilstückes zwischen 80 und 90 m stieg die abgegebene Wassermenge wieder bis auf 4,6 L h⁻¹ m⁻¹ an. Auf dem letzten Stück hingegen konnte

nochmals ein Abfall der abgegebenen Wassermenge verzeichnet werden. Die abgegebene Wassermenge ist auf den ersten Metern deutlich gegenüber dem Rest des Schlauches erhöht. Im weiteren Verlauf des Schlauches schwankt die abgegebene Wassermenge von minimal $2,5 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ bis etwa $5,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Abb. 11 zeigt die abgegebenen Wassermengen der beiden „dichten“ Schläuche C und D. Schlauch „dicht 1“ zeigt berechnete spezifische Wasserabgaben von $2,5$ bis $3,4 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Die Wasserabgaben von Schlauch „dicht 2“ liegen bei $2,6$ bis $4,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Im Vergleich zu den „normalen“ Schläuchen ist die abgegebene Wassermenge der dichten Schläuche geringer, bei gleichzeitig höherer Homogenität.

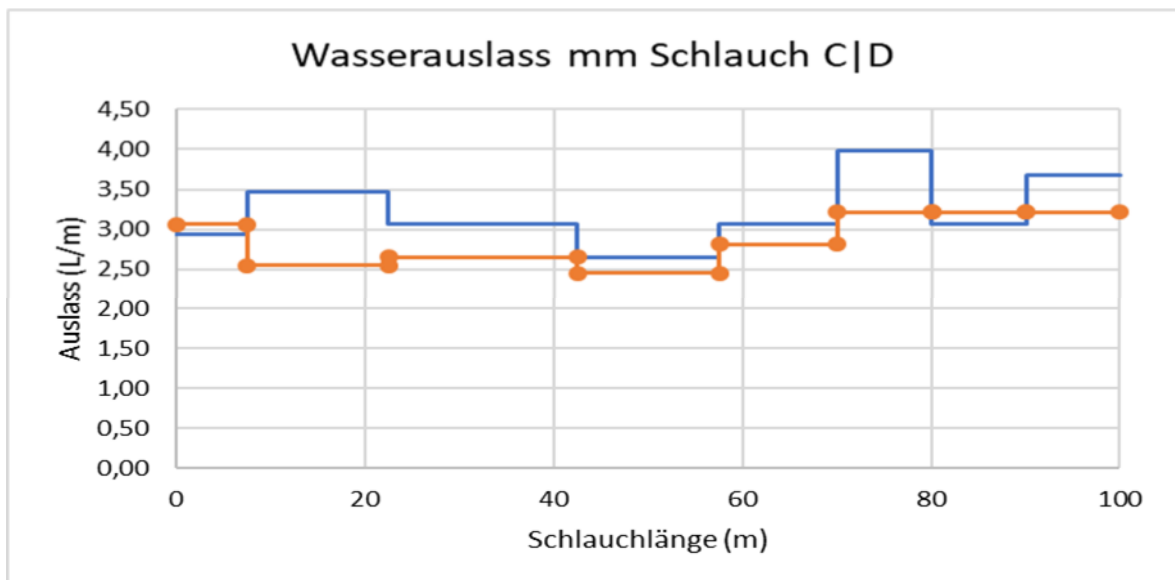


Abbildung 11: dichte Schläuche - Verteilung der Wassermenge entlang des 100m-Perlschlauches

Es lässt sich ebenso wie beim Versuch mit den nur 15 m langen Schläuchen keine verminderte spezifische Wasserabgabe im Schlauchverlauf feststellen, wie es aufgrund des Druckverlustes zu erwarten wäre. Die Durchfeuchtung war im hinteren Teil des Schlauches sehr ähnlich zu der Durchfeuchtung im vorderen Teil des Schlauches. Die Variabilität der Durchfeuchtung ist nicht auf den Druckverlust über die Schlauchlänge zurückzuführen, sondern vermutlich auf die vorne bereits beschriebene Heterogenität der Schläuche und der ungleichmäßigen Rahmenbedingungen im Boden.

Die „dichten“ Schläuche zeigen eine etwas bessere Homogenität der Wasserverteilung als die „normalen“ Schläuche. Je langsamer das Wasser aus dem Schlauch austritt (also bei geringeren Arbeitsdrücken und Schläuchen mit einer geringeren spezifischen Wasserabgabe), desto gleichmäßiger ist eine Durchfeuchtung zu erwarten. Dies wird auch durch die Simulationsrechnungen (Kapitel 1.10) bestätigt. Allerdings wird bei geringeren Drücken und geringerer Durchlässigkeit auch höhere Ansprüche an die Sauberkeit des Bewässerungswassers gestellt um ein Zusetzen der Schläuche zu verhindern (siehe Kapitel 1.7).

1.5 Vergleich der spez. Wasserabgabe zwischen eingebauten und nicht-eingebauten Schläuchen

Die Perlschläuche können kurzzeitig oberirdisch genutzt werden, z.B. zur Oberflächenbewässerung bei Neuaussaaten. Sie sollten aber bei längerer Nutzung im Boden eingebaut werden, um eine Schädigung des Materials durch UV-Strahlung zu vermeiden. Viele Vorteile des Perlschlauches, wie z.B. die Tiefendurchwurzelung und eine weitgehende Reduzierung der Verdunstung, werden aber nur bei unterirdischer Verlegung erreicht. Wie bereits dargestellt wirkt sich der Druckabfall im Schlauch im eingebauten Zustand weit weniger aus als bei der oberirdischen Verlegung. Ursache sind der Gegendruck des Bodens sowie die geringe Wasserleitfähigkeit des Bodens im Vergleich zum freien Ausfluss bei oberirdischer Verlegung.

In den folgenden Versuchen wird untersucht, ob und wie sich die spezifische Wasserabgabe der Schläuche bei oberirdischer Nutzung im Vergleich zum eingebauten Zustand unterscheidet.

1.5.1 Messungen unter Praxisbedingungen an der Hochschule Osnabrück

Für den ersten Teilversuch wurden jeweils zwei 15 m lange unbenutzte Teilstücke von 2 verschiedenen Schlauchqualitäten entnommen („normal“ und „dicht“). Alle 4 Schläuche wurden zunächst auf dem Boden aufliegend auf ihr spezifisches Wasserabgabevermögen untersucht. Zur Bewässerung wurde Brunnenwasser der Hochschule Osnabrück genutzt. Der Einspeisedruck wurde auf 0,6 bar eingeregelt. Jeder Perlschlauch wurde am Ende verschlossen und am Anfang mit einem Wasserzähler versehen. Die Messungen erfolgten zu Beginn alle 5 min. Die gesamte Messdauer betrug 3 h. Nach den ersten 50 min wurde die Durchflussmenge halbstündig erfasst.



Abbildung 12: im Folientunnel verlegter Perlschlauch

Anschließend wurden die Schläuche in den Boden eingegraben. Dieser Versuchsteil fand in den Folienhäusern auf den Versuchsflächen der Hochschule Osnabrück statt. Für die Bewässerung wurde das gleiche Brunnenwasser eingesetzt. Für die Messung wurden jeweils Gräben mit den Maßen 0,2 m x 0,1 m (Breite x Tiefe) und 15 m Länge ausgehoben (Bodenart leicht schluffiger Sand Su2). Anschließend wurden zwei normale Perlschläuche verlegt (Abb. 12) und die die Gräben mit dem Aushub verfüllt und rückverfestigt.

Zusätzlich zur Bestimmung der spezifischen Wasserabgabe per Wasserzähler wurde auch die abgegebene Wassermenge an den umgebenden Boden mittels Bodenproben bestimmt. Hierfür wurden nach dem Verlegen der Schläuche im Abstand von jeweils 10 cm neben einem Schlauch Bodenproben in 3 Tiefen (0 - 10 cm, 10 - 20 cm, 20 - 30 cm) entnommen. Die Bodenprobenahme erfolgte alle 3 m entlang des Schlauches mit jeweils 4 Wiederholungen, die zu einer Mischprobe vereinigt wurden. Nach Entnahme der Proben wurden die Perlschläuche analog zum Versuch mit oberirdischer Verlegung 3 Stunden lang mit Wasser beschickt. Dabei wurden anfänglich ebenfalls alle 5 min Messwerte erhoben und nach 50 min auf einen Messwert alle 30 min umgestellt. Nach erfolgter Bewässerung wurde eine Stunde gewartet, bis sich das Wasser gleichmäßig im umgebenden Boden verteilt hatte. Anschließend wurden wiederum neben jedem einzelnen Perlschlauch Bodenproben entnommen.

Im direkten Vergleich der oberirdisch verlegten Schläuche zu den eingebauten Schläuchen konnten bei 0,6 bar Eingangsdruck, 15 m Schlauchlänge und der Bodenart schwach schluffiger Sand keine bzw. nur minimale Unterschiede in der spezifischen Wasserabgabe festgestellt werden (Abb. 13).

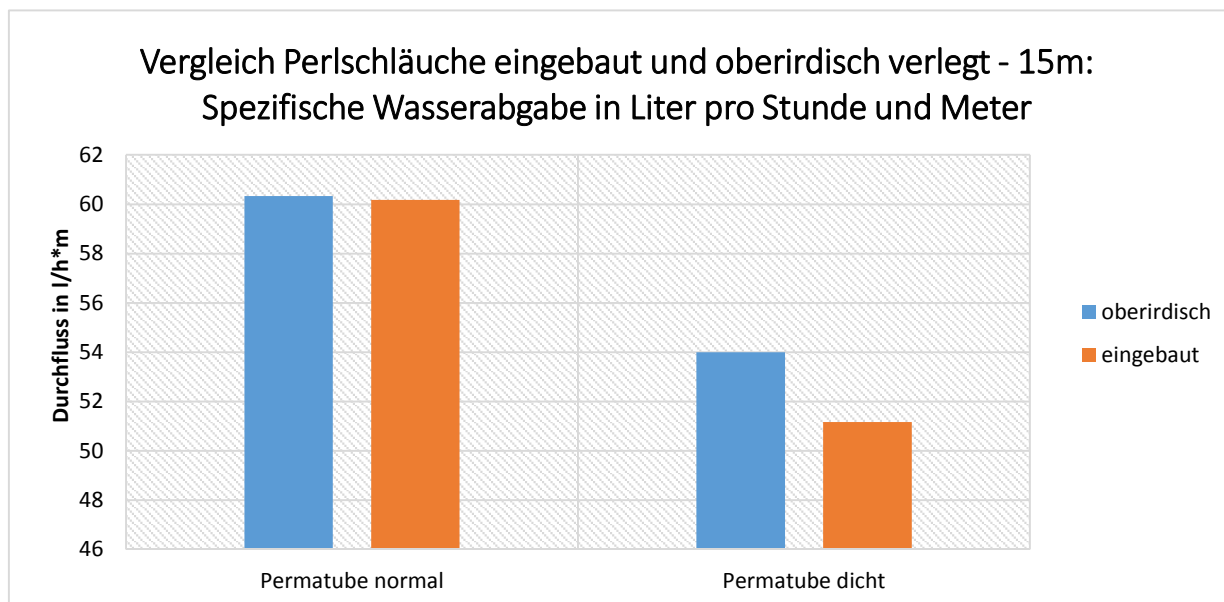


Abbildung 13: Vergleich spezifische Wasserabgabe der Perlschläuche – oberirdische Verlegung + eingebaut

1.5.2 Messungen unter Praxisbedingungen – Feldversuch Marokko

Die Ergebnisse der Feldversuche mit 100 m langen unterirdisch verlegten Perlschläuchen auf der Versuchsfläche in Marokko (Kapitel 1.5.2) wurden ebenfalls mit Messungen außerhalb des Bodens verglichen. Im Gegensatz zum Versuch an der HS Osnabrück wurde hier ein geringerer Eingangsdruck von 0,2 bar (Standarddruck 0,6 bar bei den Messungen in Osnabrück) verwendet. Die Bodenart der Versuchsfläche in Marokko war Lehm im Vergleich zu leicht schluffigen Sand in Osnabrück.

Alle eingebauten Schläuche gaben weniger Wasser ab als die oberirdisch verlegten Schläuche. Die spezifische Wasserabgabemenge der normalen Schläuche war im eingebauten Zustand (ca. 120 L h⁻¹) um etwa 17 % niedriger als außerhalb des Bodens (ca. 145 L h⁻¹). Bei den dichten Schläuchen war der Unterschied sehr viel ausgeprägter: Die Wasserabgabe war im eingebauten Zustand (45 und 62 L h⁻¹) um 76 bzw. 64 % niedriger als außerhalb des Bodens (190 und 175 L h⁻¹) (Abb. 14). Im Vergleich zu den oberirdisch verlegten Schläuchen

betrug die spezifische Wasserabgabe den dichten Schläuchen somit nur ca. 1/3 der oberirdisch verlegten Schläuche während die normalen Schläuche mit einer knapp 20 % geringeren spezifischen Wasserabgabe beim Einbau eine deutlich geringere Differenz aufwiesen.

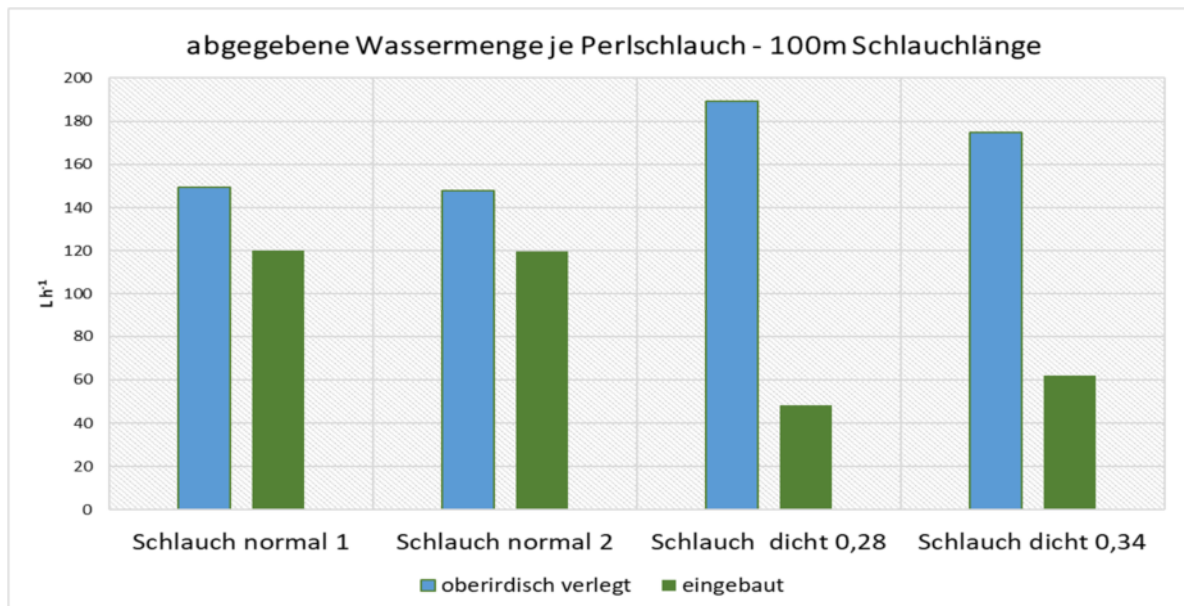


Abbildung 14: Vergleich oberirdische Verlegung und eingebaut – 100m Schlauchlänge

Fazit: Im Vergleich der Durchflussraten der Schläuche unter verschiedenen Betriebsbedingungen wird deutlich, dass der Eingangsdruck, die Dichte der Schläuche und die Bodenart wesentliche Einflussfaktoren sind. Bei leichten Böden gibt es tendenziell keinen oder nur einen sehr geringen Unterschied zwischen eingebauten und nicht-eingebauten Perlschläuchen. Dies ist auch plausibel, da ein leichter Sandboden mit seiner hohen Wasserleitfähigkeit dem Wasserauslass aus dem Schlauch nur einen sehr geringen Widerstand entgegengesetzt. Je schwerer der Boden ist, also bei Bodenarten mit höherem Tonanteil, d.h. Lehmen und Tonen, desto geringer ist auch die Wasserleitfähigkeit dieser Böden und umso höher ist der Widerstand, den der Boden dem aus dem Schlauch austretenden Wasser entgegengesetzt. Je geringer der Eingangsdruck in den Schlauch und umso dichter der Schlauch aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften ist desto größer ist der Unterschied zwischen dem Druck des Wassers, das aus dem Schlauch austritt, und dem Gegendruck, der durch die Wasserleitfähigkeit des Bodens bedingt ist. Dichtere Schläuche und Schläuche, die mit geringerem Eingangsdruck betrieben werden, werden also größere Unterschiede zwischen dem Wasserauslass bei der oberirdischen und eingebauten Verlegung aufweisen.

1.6 Bewässerungstechnik: Geringer Druck und unterschiedliche Schlauchlängen

1.6.1 Bewässerung mit einem geringen Druck von 0,2 bar

Bei dem Feldversuch in Marokko stand aufgrund der Zisternenbewässerung nur ein Druck von 0,2 bar zur Verfügung. Im Regelfall sollte der Standarddruck von 0,6 bar verwendet werden. Wegen der unsicheren und teuren Energieversorgung in Marokko sind allerdings viele Landwirte auf eine Zisternenbewässerung bei entsprechend niedrigen Drücken angewiesen. Da dies auf viele Situationen in Marokko (und vermutlich auch in den anderen nordafrikanischen Staaten) zutrifft, und diese zu den geplanten Hauptabsatzländern für den WFS-Perlschlauch gehören, ist eine wichtige Fragestellung, ob der Perlschlauch bei diesem geringen Druck sinnvoll eingesetzt werden kann. Es sollte also die Frage beantwortet werden, ob der vorhandene Wasserdruk von nur 0,2 bar ausreicht, um die 100 m langen Schläuche auf die gesamte Schlauchlänge ausreichend mit Wasser zu versorgen und eine gleichmäßige spezifische Wasserabgabe sicherzustellen.



Abbildung 15: Versuchsaufbau

Zu diesem Zweck wurden jeweils zwei 100 m lange Schläuche über eine Kopfstation miteinander verbunden. Genutzt wurden 2 Perlschläuche mit normaler Dichte und 2 Schläuche mit geringerem Durchlass. Jedem Perlschlauch wurde ein Wasserzähler vorgeschaltet, um die abgegebenen Wassermengen zu ermitteln.



Abbildung 16: Wasseraustritt am Ende der 100m Schläuche

Das System wurde durch einen PVC-Flachschlauch mit Wasser versorgt (Abb. 15). Der Kopfstation wurde ein Wasserfilter vorgeschaltet. Die Schläuche wurden für diesen Versuch oberirdisch parallel auf einem Weg verlegt. Die Versuchsdauer betrug 45 min.

Die 4 untersuchten Schläuche gaben auf der gesamten Länge von 100 m Wasser ab (Abb. 16). Die in einzelnen Schlauchabschnitten abgegebenen spezifischen Wassermengen wurden in diesem Versuch nicht ermittelt. Der Druck von 0,2 bar war ausreichend, um das gesamte Schlauchsystem mit Wasser zu versorgen. Die Ergebnisse zeigen, dass 100 m lange Perlschläuche auch mit sehr geringen Drücken betrieben werden können. Um den Boden ausreichend zu bewässern, müssen bei diesen Bedingungen allerdings sehr viel längere Bewässerungszeiten berücksichtigt werden.

1.6.2 Schläuche unterschiedlicher Längen an einer Verteilung

Im Garten- und Landschaftsbau werden häufig unterschiedlich lange Bewässerungsschläuche an einer Verteilerleitung zusammengeschlossen. Dabei ist zu erwarten, dass aufgrund des Druckverlustes über die Schlauchlänge längere Schläuche pro m Schlauchlänge geringere Wassermengen abgeben als kürzere. Dies müsste ggf. für ein angemessenes Bewässerungsergebnis berücksichtigt werden. Für eine Klärung wurden 3 verschiedene Messreihen durchgeführt (ein Versuch in Marokko mit langen Schlauchstücken bis 50 m und zwei Messungen mit kurzen Schläuchen bis 20 m Länge in Osnabrück).

Für die erste Untersuchung wurden oberirdisch 4 Perlschläuche mit Längen von 50, 25, 12,5 und 6,25 m mit einer Kopfstation und vorgeschaltetem Wasserfilter verbunden und mit einem niedrigen Wasserdruck von ca. 0,2 bar betrieben. Die Ergebnisse (Abb. 17) zeigen deutliche Unterschiede in der abgegebenen spezifischen Wassermenge bei unterschiedlich langen Schläuchen. Mit steigender Schlauchlänge ist die spezifische Wasserabgabemenge wie erwartet geringer als bei kurzen Schläuchen. Davon abweichend war die spezifische Wasserabgabe des 6,25 m langen Schlauches sehr viel kleiner, was nicht plausibel ist. Die Ursache für dieses nicht plausible Ergebnis konnte nicht endgültig ermittelt werden.

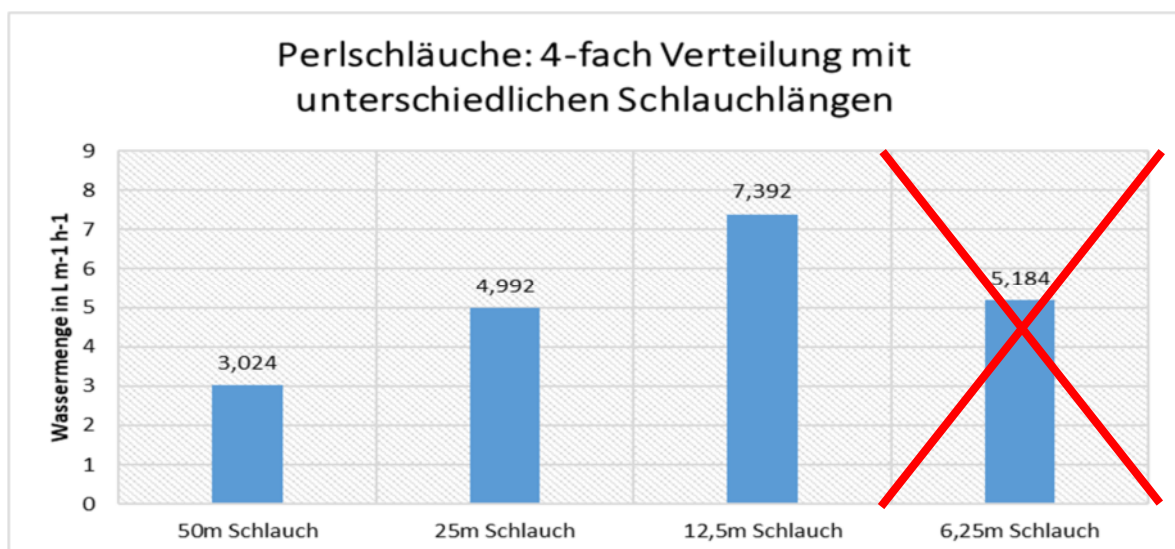


Abbildung 17: Ergebnisse 4 Perlschläuche unterschiedlicher Länge an einer Kopfstation/Verteilung

In einem zweiten Versuch wurden 4 Schläuche mit Längen von 5, 10, 15 und 20 m zu einer Bewässerungseinheit gekoppelt. Genutzt wurden Perlschläuche mit normaler Dichte. Die Schläuche wurden über eine Kopfstation (4-fach-Verteilung) miteinander verbunden. Vor jedem einzelnen Perlschlauch wurde ein Wasserzähler zum Erfassen der jeweiligen Durchflussmengen installiert. Bewässert wurde mit einem Standard-Druck von ca. 0,6 bar.

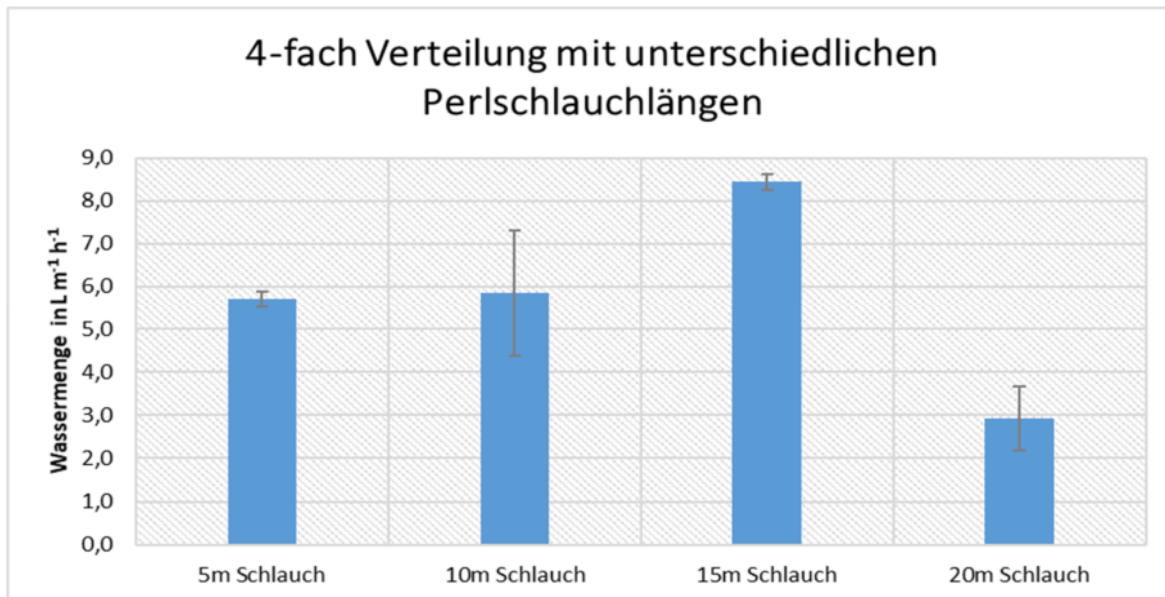


Abbildung 18: Bewässerung über eine 4-fach-Verteilung mit unterschiedlichen Schlauchlängen

Die Ergebnisse (Abb. 18) zeigten nahezu gleiche Abgabemengen bei den 5 und 10 m langen Schläuchen und sogar eine höhere spezifische Wasserabgabe beim 15 m langen Schlauch. Erst der 20 m-Schlauch zeigte die erwartete reduzierte spezifische Wasserabgabe.

Ein weiterer Versuch wurde durchgeführt mit 2 Schläuchen normaler Dichte an einer Verteilung. Auch hier wurde wieder mit dem Standarddruck von ca. 0,6 bar bewässert. Die Ergebnisse (Abb. 19) zeigen, dass auch in diesem Fall die spezifische Wasserabgabe sich mit steigender Schlauchlänge verringert.

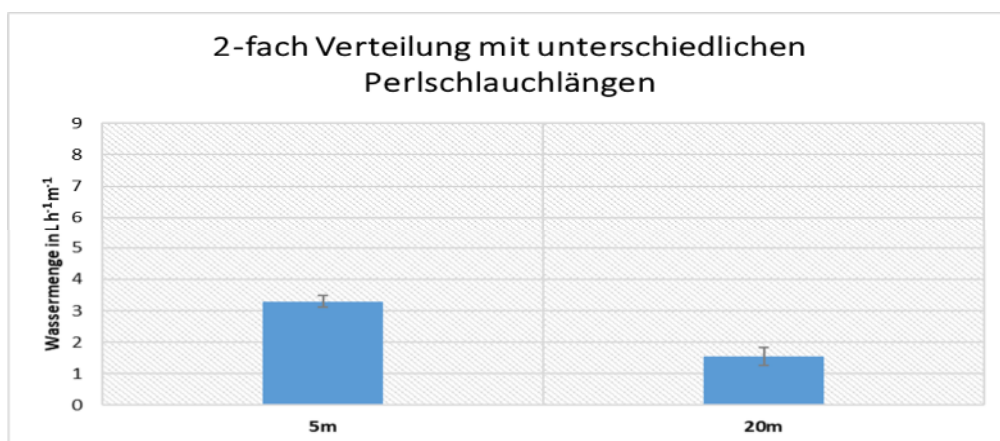


Abbildung 19: Bewässerung über eine 2-fach-Verteilung mit unterschiedlichen Perlschlauchlängen

Fazit: Sollen mehrere Schläuche zu einer Bewässerungseinheit gekoppelt werden, so ist auf möglichst gleiche Perlschlauchlängen zu achten, damit die spezifische Wasserabgabe überall möglichst gleich ist. Eine Bewässerung mit unterschiedlich langen Perlschlauchstücken an einer Verteilung kann nicht empfohlen werden. Genutzt werden können diese Eigenschaften jedoch, wenn Kulturen mit unterschiedlichen Wasserbedürfnissen mittels einer Verteilung bewässert werden sollen.

1.7 Versuche in Praxisbetrieben

1.7.1 Praxistest im Tropenhaus Tettau

Das Tropenhaus Tettau dient dem Versuchsanbau von tropischen Nutzpflanzen und der Erforschung des Wachstums- und Nährstoffbedarfs unter mitteleuropäischen Einstrahlungsbedingungen im Anbau unter Glas. Beispielhaft werden hier Papaya, Bananen, Maracuja und weitere exotische Nutzpflanzen angebaut. Untersuchungen zum Perlschlauch wurden im Tropenhaus Tettau im Rahmen eines studentischen Projektes der Hochschule Osnabrück durchgeführt.

Der Anbau im Tropenhaus erfolgt auf dem vor Ort anstehenden natürlichen Boden. Dieser weist einen sehr hohen Tonanteil auf und neigt bei Abtrocknung zu Verhärtung. Im Rahmen einer Papaya-Neuanpflanzung wurde ein Bewässerungsversuch mit Perlschläuchen angelegt.

Ziele der Untersuchungen waren Fragestellungen zur Nutzung des Perlschlauches auf schweren Tonböden sowie die Nutzung der Schläuche mit verschiedenen Wasserqualitäten: ungereinigtes Fischabwasser, gereinigtes Fischabwasser und unbelastetes Frischwasser. Abb. 20 zeigt eine Skizze der Versuchsanlage. Da es sich um einen Praxisversuch handelte, konnten keine genauen Daten erhoben werden. Stattdessen wurden die Beobachtungen des Betriebsleiters im Hinblick auf den praktischen Einsatz der Schläuche ausgewertet.

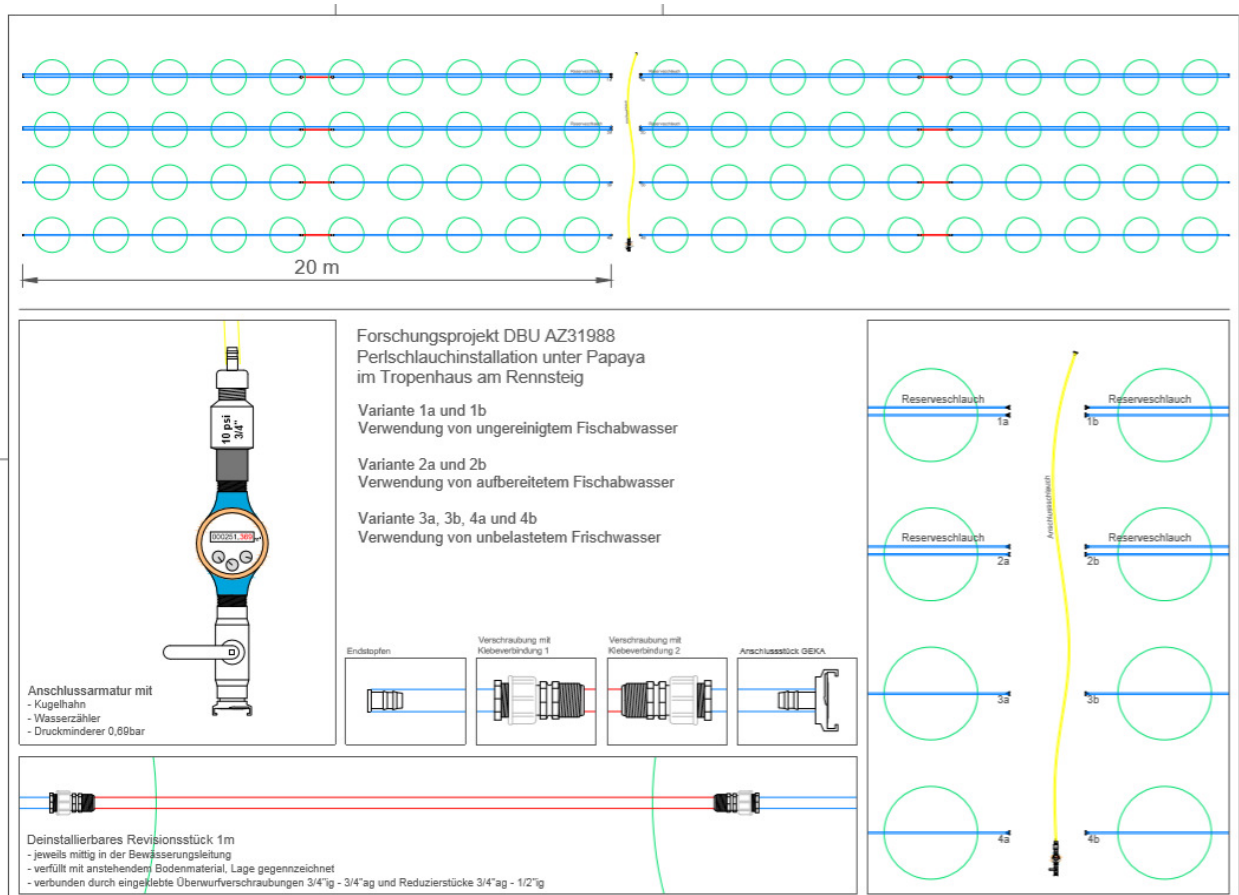


Abbildung 20: Tropenhaus Tettau – Versuchsplanung Papaya-Neuanpflanzung

Wesentliche Ergebnisse waren:

- An verschiedenen Stellen trat bei den eingebauten Schläuchen auf dem schweren Boden nach kurzer Bewässerungszeit Staunässe auf. Die spezifische Wasserabgabe der Schläuche war bei dieser Installation bei 0.6 bar Eingangsdruck höher als die Wasseraufnahmekapazität des Bodens.
- Auch bei oberirdischer Verlegung der Schläuche zeigte sich, dass der Boden nur sehr wenig Wasser aufnehmen kann. Daher sollten nur sehr kurze Bewässerungsereignisse mit geringen Wassermengen eingesetzt werden.
- Der Betriebsleiter hat abschließend die Schläuche oberirdisch direkt an der Basis der Papaya-Pflanzen verlegt. Bei entsprechend sehr geringen Bewässerungsintensitäten, die an das Wasseraufnahmevermögen des Bodens und der Pflanzen angepasst war, konnte so ein befriedigendes Wachstum der Pflanzen erreicht werden.
- Die Beschickung der Schläuche mit ungereinigtem Fischabwasser, das relativ viele Schwebstoffe enthielt, führt zu einer Verstopfung der Perlschläuche nach kurzer Zeit. Die gereinigten Fischabwässer enthielten geringere Schwebstoffanteile, aber auch hier nahm die spezifische Wasserabgabe der Schläuche nach kurzer Zeit stark ab.

Aus dem Praxisversuch kann folgendes Fazit gezogen werden: Der Einsatz des Perlschlauchs auf sehr schweren Böden führt aufgrund der geringen Wasserleitfähigkeit zu einer sehr inhomogenen Wasserverteilung mit Staunässegefahr. Eine Bewässerung auf derart schweren Tonböden ist unabhängig vom Bewässerungssystem generell schwierig und kann nur unter Reduzierung der Wassermengen zu guten Ergebnissen führen. Gegenüber Schwebstoffen im Wasser sind die Perlschläuche sehr empfindlich. Der Einsatz eines Filters und dessen regelmäßige Wartung muss deshalb bei der Verwendung der Perlschläuche obligatorisch sein.

1.7.2 Praxisversuch in einer Rhododendron-Baumschule

Um die Eignung und Eigenschaften der permatube[®]-Perlschläuche im professionellen Anbau zu testen, wurde in einer Baumschule in der Nähe von Dülmen/NRW ein umfangreicher Feldversuch in einem Rhododendronquartier angelegt. Die Untersuchung erfolgte wiederum im Rahmen eines studentischen Projekts der HS Osnabrück. In einem sandigen Boden wurden Perlschläuche in einer Länge von 45 und 20 m eingebaut und oberirdisch verlegt und über einen Zeitraum von 3 Monaten regelmäßig zur Bewässerung der Rhododendren verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 21 dargestellt.

Wesentliche Ergebnisse des Praxistests waren:

- Der Wasserauslass nahm wie erwartet geringfügig über die Schlauchlänge ab; dies hatte aber einen relativ geringen Einfluss auf das Bewässerungsergebnis.
- Die spezifische Wasserabgabe der Perlschläuche (und damit die Bewässerungsmenge und Durchfeuchtung des umgebenden Bodens) war sehr heterogen über die gesamte Schlauchlänge verteilt. Zum Teil wurden Bereiche eher in der Mitte des Schlauchs erheblich weniger mit Wasser versorgt als am Ende.

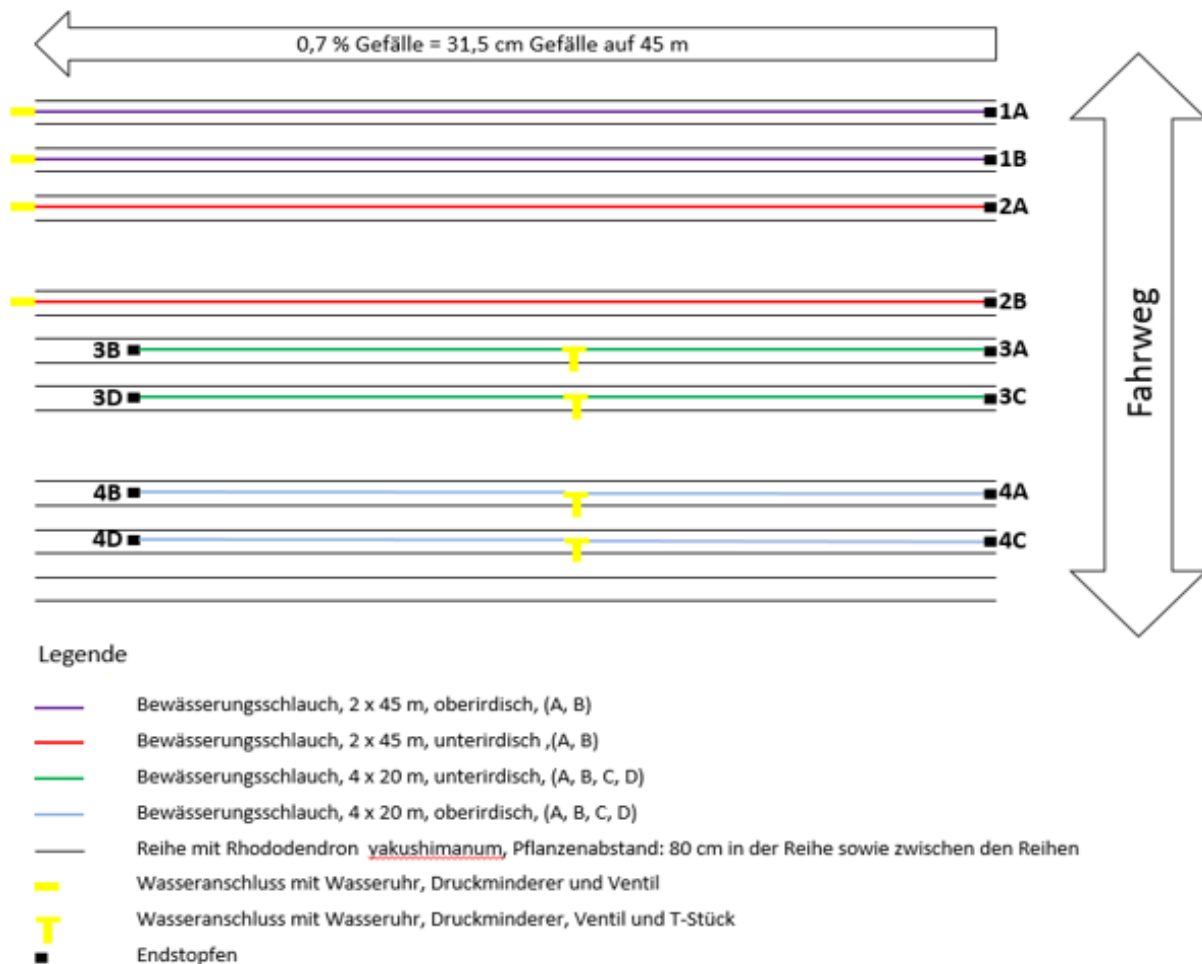


Abbildung 21: Versuchsaufbau Rhododendronquartier

1.8 Langzeiterfahrungen

Für die Vermarktung des Perlschlauches ist eine lange Nutzungsdauer von entscheidender Bedeutung. Andere oberirdisch verlegte eher dünne Tropfbewässerungsschläuche haben üblicherweise Nutzungszeiten von einer Saison bis zu wenigen Jahren. Der unterirdisch verlegte relativ stabile Perlschlauch sollte demgegenüber eine erhebliche längere Nutzungszeit aufweisen. Eine langjährige Nutzung kann bei einer einjährigen Projektlaufzeit naturgemäß nicht überprüft werden. Stattdessen wurde eine ca. 25 Jahre alte Perlschlauch-Bewässerungsanlage aufgegraben und die Funktionsfähigkeit der Schläuche überprüft. Da es nahezu keine Informationen mehr zu dem verwendeten Schlauch gibt (z.B. Durchlässigkeit, Herstellungsverfahren) können die Ergebnisse nur sehr allgemein auf heutige Perlschläuche übertragen werden.

Die Versuchsfläche wurde im Jahr 1993 als Sportplatz in der Gemeinde Merdingen (Breisgau-Hochschwarzwald) unter Verwendung von Perlschläuchen in Betrieb genommenen. Nach einer Nutzungszeit von 24 Jahren wurde der Platz außer Betrieb genommen und konnte nun hinsichtlich Bewässerungsfunktionalität und Durchwurzelung beprobt werden.

Der Sportplatzbetreiber gab nachstehende **Rückmeldung** zur Funktionalität des Bewässerungssystems:

- Einige Schläuche erlitten Schäden durch Wühlmausverbiss und mussten gelegentlich durch gerade Schlauchverbinder repariert werden.
- In den Bereichen ohne Beschädigung konnten die Perlschläuche bis zum Schluss genutzt werden und funktionierten auf gesamter Schlauchlänge einwandfrei.
- Aufgrund der weiten Verlegeabstände von 45 cm bei relativ sandigen Bodenverhältnissen zeigte sich besonders in Hitzeperioden eine leichte Streifenbildung.

Der Platzbetreiber ist hinsichtlich der Bewässerungsleistung sehr zufrieden. Allerdings würde er bei einer Neuinstallation einen engeren Verlegeabstand wählen, um eine flächige Bewässerung ohne Streifenbildung zu erreichen.

Die **Probenahme** erfolgte an 3 repräsentativen Stellen etwa 10 m von der Torlinie entfernt (Abb. 22):

1. Am Schlauchanfang, ca. 5 m vom Feldrand entfernt,
2. an der Schlauchmitte, mittig im Feld und
3. am Schlauchende, ca. 5 m vom Feldrand entfernt.

Auf einer Fläche von ca. 110 x 30 cm wurde die Vegetationsschicht abgetragen und der Perlschlauch in einer Tiefe von 15 cm freigelegt. An jeder der drei Probenahmestellen wurde ein Schlauchstück von 1 m Länge entnommen. Ob die freigelegten Perlschlauchstücke von einer Rolle oder möglicherweise auch von verschiedenen Produktionschargen stammen konnte nicht geklärt werden.



*Abbildung 22: Rasennarbe nach 24 Jahren Unterflurbe-
wässerung mit Perlschläuchen*

Zum Zeitpunkt der Probenahme am 14. April 2018 war die frisch gemähte Rasendeckschicht einheitlich grün und sehr dicht. Eine Streifenbildung war nicht zu erkennen. An allen drei Probenahmestellen war der Boden intensiv über die gesamte Aushubtiefe von 15 cm durchwurzelt. An der Probenahmestelle in der Schlauchmitte wurde der Aushub zur Begutachtung der Durchwurzlung auf über 20 cm Tiefe fortgeführt.

Hier zeigte sich eine kräftige Durchwurzelung auch unterhalb des Perlschlauchs (Abb. 23). Die entnommenen Perlschlauchstücke wurden anschließend auf ihre spezifische Wasserabgabe in der Laborapparatur untersucht (Abb. 24). Die Ergebnisse zeigten spezifische Wasserabgaben von 18 bis 36 L h⁻¹ m⁻¹.



Abbildung 23: Durchwurzelter Bereich nach 24 Jahren Unterflurbewässerung mit Perlschläuchen

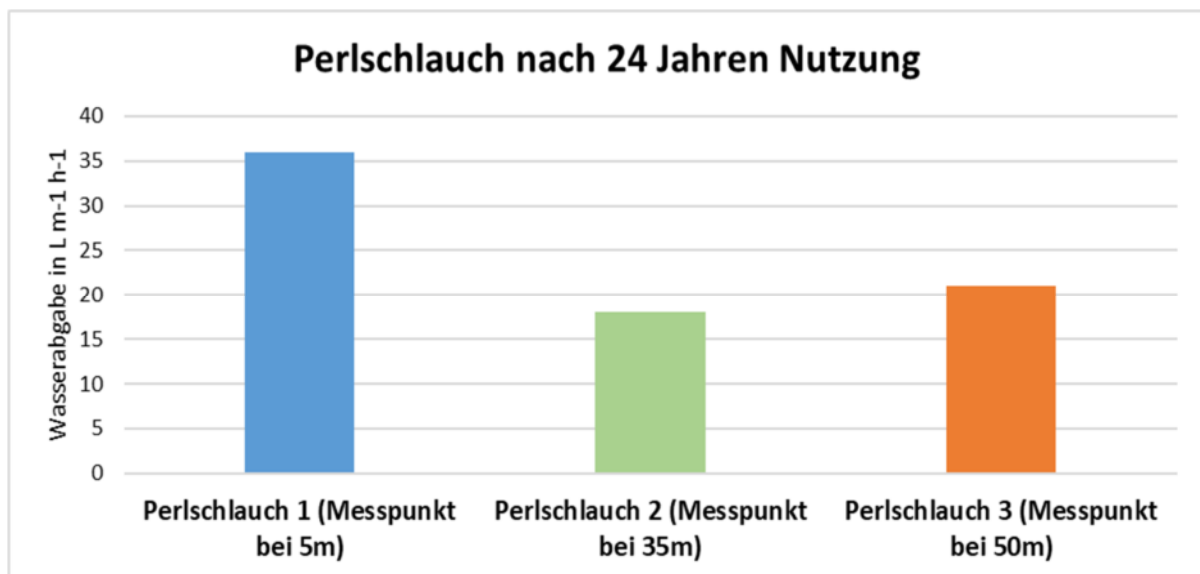


Abbildung 24: Perlschläuche Sportplatz Merdingen – spezifische Wasserabgabe nach 24 Jahren Nutzungsdauer

Die Durchflussraten zeigen eine hohe Variabilität (wie auch bei den aktuellen Untersuchungen). Die Wasserabgabefähigkeit ist nach 24 Jahren Nutzung immer noch ausreichend und von der Größenordnung her sehr ähnlich zu aktuellen Perlschläuchen.

1.9 Alterung

1.9.1 Auswirkung von Austrocknung, Hitze und Frosteinwirkung

Im Jahr 2016 wurden verschiedene Versuche zu Alterungserscheinungen der Perlschläuche durchgeführt. Die Teststücke wurden zu Beginn der Messreihe auf ihr Wasserabgabevermögen untersucht. Anschließend wurden die Teststücke jeweils für 5 und 10 Testzyklen verschiedenen Alterungsbedingungen ausgesetzt. Untersucht wurden Frosteinwirkung, Hitzeinwirkung und Austrocknung der Perlschläuche. Abbildung 25 zeigt die Auswirkungen der Testzyklen auf das Wasserabgabeverhalten.

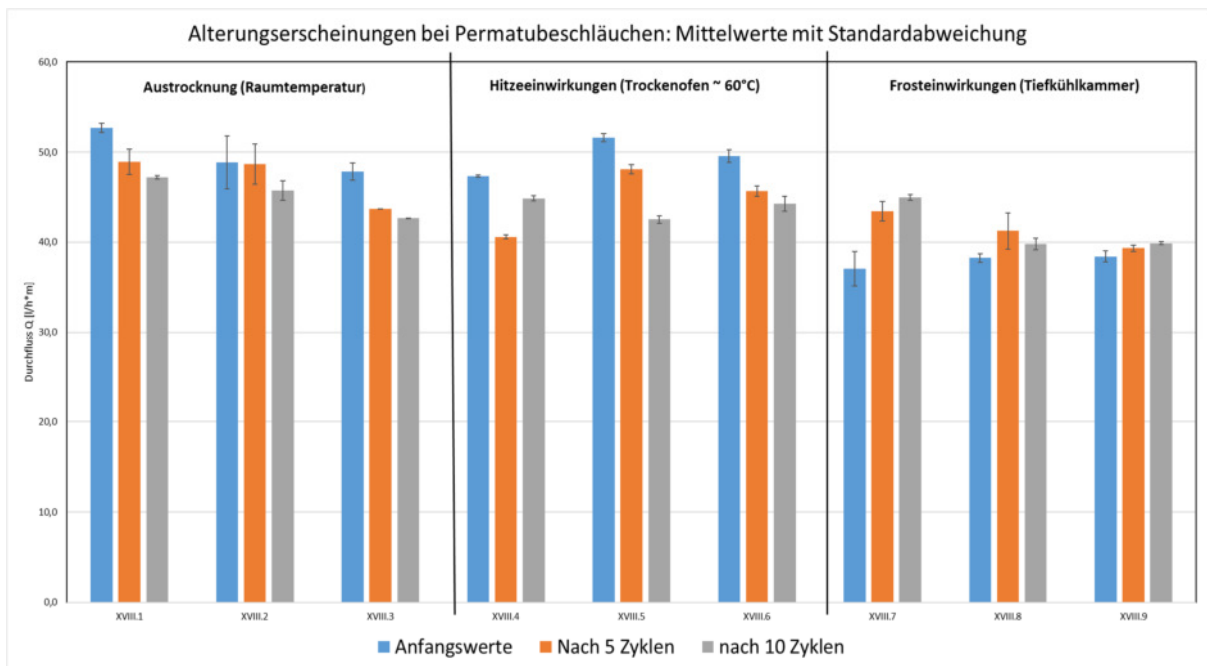


Abbildung 25: Alterungsverhalten von Perlschläuchen nach Umwelteinwirkungen (spezifische Wasserabgabe ($L h^{-1} m^{-1}$))

Bei den Versuchen zur Austrocknung und Wiederbefeuchtung nahm die spezifische Wasserabgabe der Schläuche in allen 3 Wiederholungen nach 10 Austrocknungszyklen um etwa 5-10% ab.

Die Hitzeinwirkung (je 12 h über Nacht im Trockenofen bei 60°C) führte ebenfalls zu einer Reduzierung der spezifischen Wasserabgabe um 11-15 %. Eine mögliche Ursache könnte die Aushärtung des Schlauchmaterials infolge von Austrocknung und Hitze sein.

Gegenteilig verhielten sich die Schläuche nach Frosteinwirkung. Hier stieg die spezifische Wasserabgabe der gemessenen Teilstücke nach 10 Zyklen um etwa 5-20 % an. Dieser Effekt kann auf eine Aufweitung der Poren durch gefrierendes Wasser zurückzuführen sein.

Die mittlere Abnahme der Durchflussrate bei Austrocknung und Hitzeinwirkung betrug jeweils nach 10 Zyklen 9,2 % und 11,2 % im Vergleich zum Anfangswert. Die mittlere Zunahme der Durchflussrate betrug nach 10 Zyklen 9,8 %.

Die Größenordnung der Veränderungen nach 10 Zyklen liegt unterhalb der Variabilität des Ausgangsmaterials und kann deshalb vernachlässigt werden. Eine genauere Untersuchung mit Ursachenforschung sollte zukünftig im Rahmen einer weiteren Produktoptimierung erfolgen.

1.9.2 Auswirkung der Quellung im feuchten Zustand

In einem weiteren Versuch wurden die mit der neuen Extrusionsanlage produzierten Schläuche einem Quellversuch unterzogen. Eingesetzt wurden normal dichte Schläuche und dichte Schläuche. Für den Versuch wurden jeweils 4 Schläuche pro Variante (normal, dicht) auf ihre spezifische Wasserabgabe untersucht. Anschließend wurden die Schläuche in ein Wasserbecken getaucht, bis keine Luft mehr aus den Grobporen austrat. Die Schläuche wurden 8 Tage im Wasser belassen um einen „Quellvorgang“ zu simulieren. Anschließend wurden die Schläuche erneut in der Laborapparatur auf ihre spezifische Wasserabgabe untersucht.

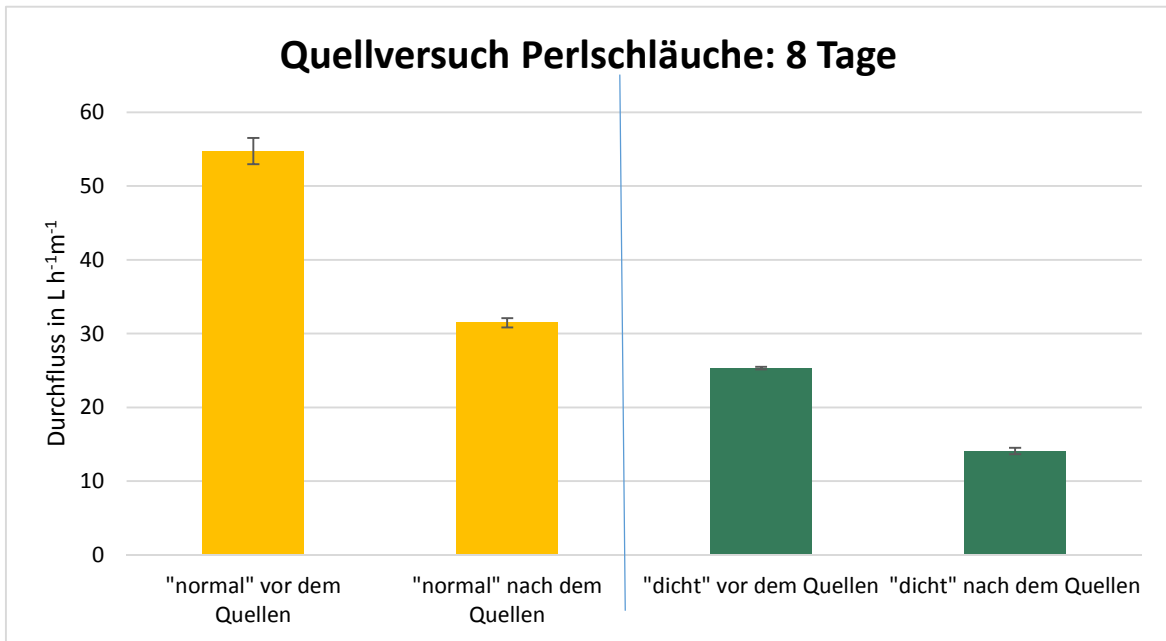


Abbildung 26: Quellversuch Perlschläuche - spezifische Wasserabgabe ($L h^{-1} m^{-1}$)

Im Diagramm (Abbildung 26) zeigen die jeweils ersten Säulen den Startwert der Messreihe. Die „normalen“ Schläuche haben eine spezifische Wasserabgabe von ca. $55 L h^{-1} m^{-1}$. Die „dichten“ Schläuche haben eine spezifische Wasserabgabe von etwa $27 L h^{-1} m^{-1}$.

Nach dem 8-tägigem Quellvorgang wurde bei allen Schläuchen eine starke Verringerung der spezifischen Wasserabgabe festgestellt („normal“ Abnahme um 42 %, „dicht“ Abnahme um 44 %). Analog zum Austrocknungsversuch (Kapitel 1.9.1) regeneriert sich der Schlauch nach dem Austrocknen wieder und die spezifische Wasserabgabe von etwa 5-10 % unterhalb des Ausgangswertes wird erreicht.

Fazit: Die Perlschläuche verringerten ihre spezifische Wasserabgabe durch eine Lagerung in Wasser. Dieses Phänomen ist vergleichbar mit den Bedingungen in wassergesättigtem Boden. Durch Austrocknung erhöht sich die spezifische Wasserabgabe wieder stark. Dies könnte bedeuten, dass sich die Wasserabgabe in der Praxis durch Wassersättigung des Bodens selbstregulierend verringert.

1.10 Simulationen

Ziel der Simulationen war die theoretische Beschreibung der Fließprozesse im Perlschlauch und angrenzendem Boden als Grundlage zur Entwicklung von Handlungsempfehlungen für den praktischen Einsatz der Schläuche. Ein notwendiger erster Schritt dazu war die Simulation der hydraulischen Prozesse im Schlauch, um vor allem den Druckabfall in Abhängigkeit von Schlauchlänge und Durchlässigkeit der Schlauchwand auch theoretisch beschreiben zu können. Kenntnisse über die physikalische Beschreibung der hydraulischen Situation in Schläuchen und Rohrleitungen als Grundlage für Simulationen sind bekannt und an vielen Stellen beschrieben. Über die spezielle hydraulische Situation in Perlschläuchen gibt es jedoch nur sehr wenige Untersuchungen und ein Modellansatz musste basierend auf einem in der Strömungsmechanik eingesetzten Modell neu entwickelt werden. Für die weitere Simulation des Wasserflusses im Boden wurde ein vorhandenes 2-dimensionales Modell zur Beschreibung von Wasser- und Stoffflüssen in Böden eingesetzt. Dieses Modell (HYDRUS-2D) wurde an der HS Osnabrück schon für viele verschiedene Fragestellungen eingesetzt, u.a. zur Beschreibung von Wasserflüssen bei verschiedenen Bewässerungsverfahren.

1.10.1 Simulation der Schlauchhydraulik (Modell ANSYS)

ANSYS ist ein weltweit sehr häufig eingesetztes Programm Finite-Elemente-Programm zur Beschreibung des Verhaltens von mechanischen und elektrischen Bauteilen. ANSYS-Fluent als integrierter Bestandteil von ANSYS ist ein Unterprogramm zur Modellierung und Berechnung von Strömungsproblemen aller Art [Ans13]. Es können u.a. laminare und turbulente Strömungen von inkompressiblen (z.B. Wasser) und kompressiblen Fluiden (z.B. Gase) beschrieben werden.

1.10.2 Modellaufbau ANSYS

Die **Modellgeometrie** wurde wie folgt definiert (Achsensymmetrie entlang der Mittelachse, Simulation des halben permatube®-Schlauchs, 2D) (Abb. 27):

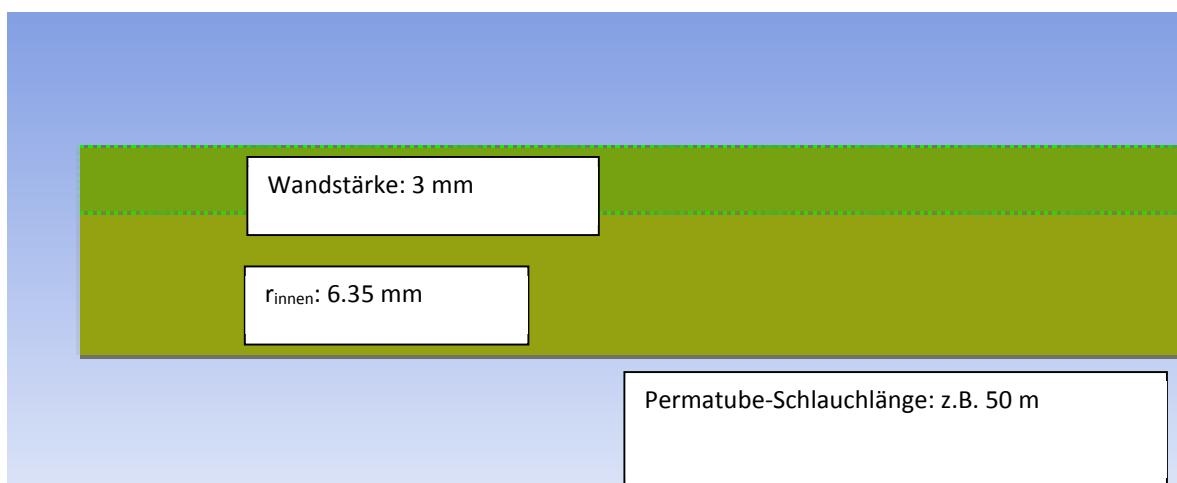


Abbildung 27: Modellgeometrie, ANSYS-Fluent-Modell

Abb. 28 zeigt das Finite-Elemente-Modell-(FEM)-Netz und die Randbedingungen im Modell: Im Perlschlauchinneren (rot dargestellt) gibt es am Schlaucheingang einen konstanten Druck; das Schlauchende ist geschlossen. Die Schlauchwand ist als poröses Medium mit einer vorgegebenen Permeabilität definiert. Die permeable®-Schlauchwand ist am Anfang und am Ende geschlossen. Der Außendruck beträgt 0 bar.

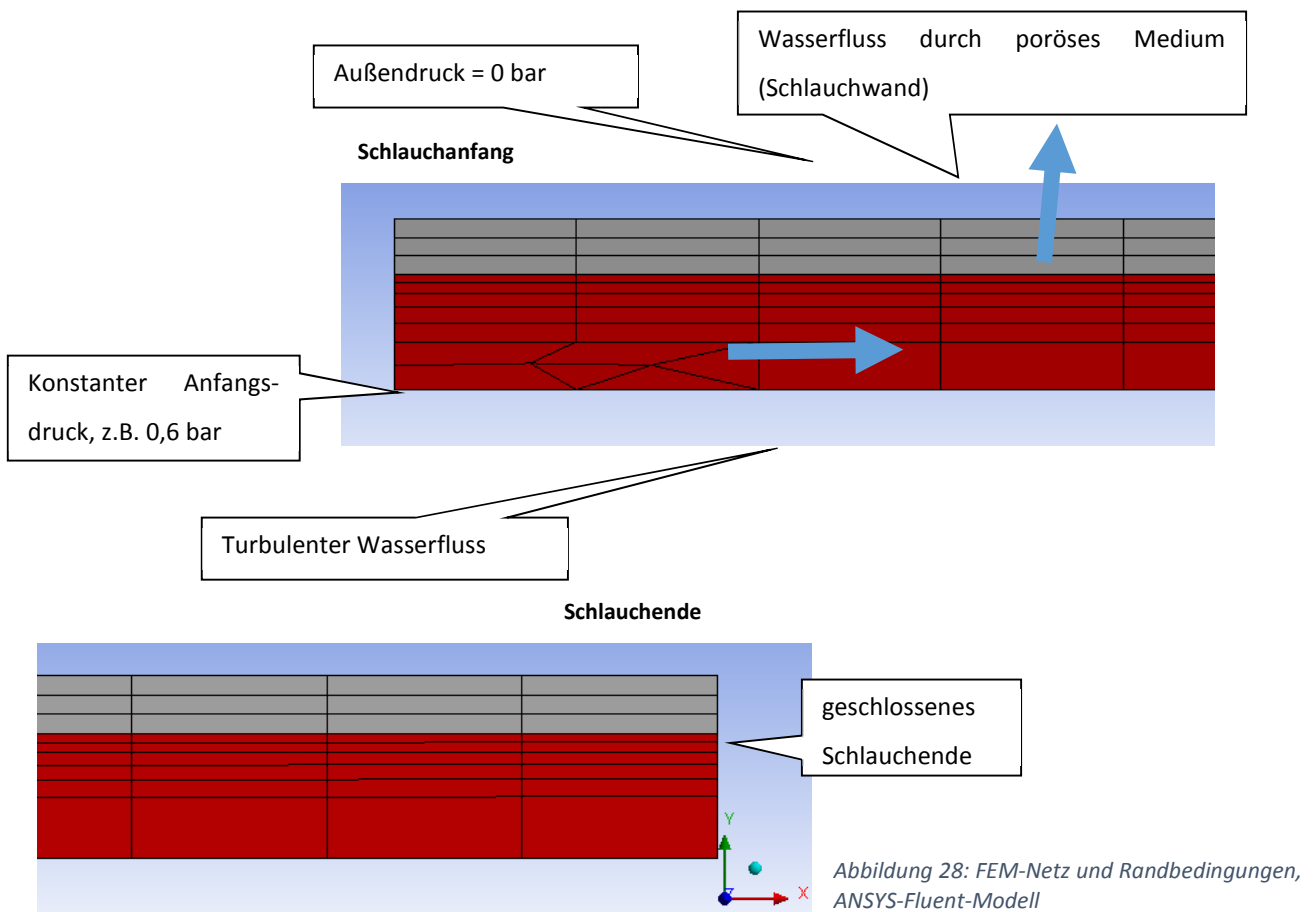


Abbildung 28: FEM-Netz und Randbedingungen, ANSYS-Fluent-Modell

Bei der Simulation fließt das Wasser durch den Schlauch hindurch. Über die Druckdifferenz innen/außen wird über die Darcy-Gleichung zusammen mit der Permeabilität der jeweilige Wasserfluss durch die Schlauchwand berechnet. Der Wasserfluss ist im Modell als turbulenter Fluss definiert (typische Standardwerte für einen Perlschlauch).

1.10.3 Simulation von Druckabfall und Wasserauslass

Der Druckabfall als „Druck am Schlauchende“ wurde für die Eingangsdrücke 1,4, 1,0, 0,6 und 0,2 bar simuliert und mit den gemessenen Drücken am Schlauchende bei Schläuchen von 5 bis 50 m Länge verglichen. Abb. 29 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Enddrücken, wobei es eine geringe Überschätzung des gemessenen Enddrucks durch das Modell gibt insbesondere bei höheren Eingangsdrücken.

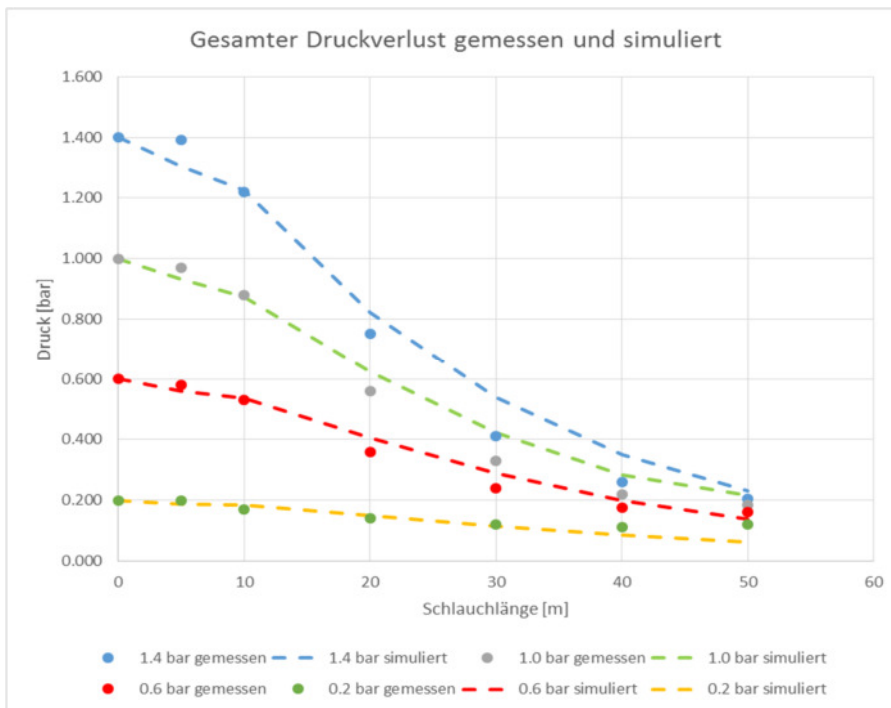


Abbildung 29: Enddrücke bei verschiedenen Eingangsdrücken und Perlschlauchlängen

Abb. 30 zeigt die Gegenüberstellung von gemessenen Wasserdurchflüssen von zwei 50 m langen Schläuchen mit den simulierten Werten. Die spezifische Wasserabgabe W_s [$L h^{-1} m^{-1}$] für den Anfangsdruck von 0,6 bar stimmen gut mit den gemessenen Durchflussraten überein. Auch die gemessenen Gesamtwassermengen in Höhe von 12,6 und 14,4 $L h^{-1} m^{-1}$ stimmen gut mit den simulierten ($12,8 L h^{-1} m^{-1}$) überein.

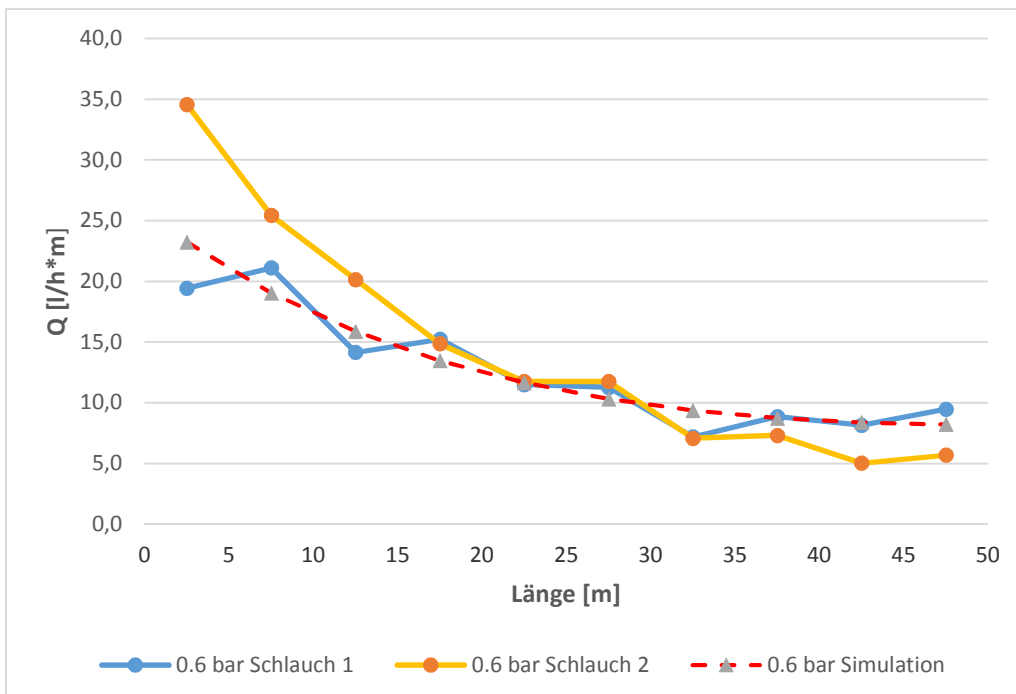


Abbildung 30: Spez. Wasserabgabe, 50-m-Perlschlauch, gemessen und simuliert

Genauso wie bei den 50 m-Schläuchen wurden Wasserauslässe und Wassermengen bei den 100 m-Schläuchen simuliert. Die Werte wurden verglichen mit den bei allen 4 Druckstufen im Abstand von 5 m gemessenen Wasserabgaben (Abb. 31).

Die spezifische Wasserabgabe W_s [$L h^{-1} m^{-1}$] stimmt gut mit der gemessenen Wasserabgabe überein wobei diese tendenziell bei hohen Drücken etwas überschätzt und die bei niedrigen Drücken etwas unterschätzt wird.

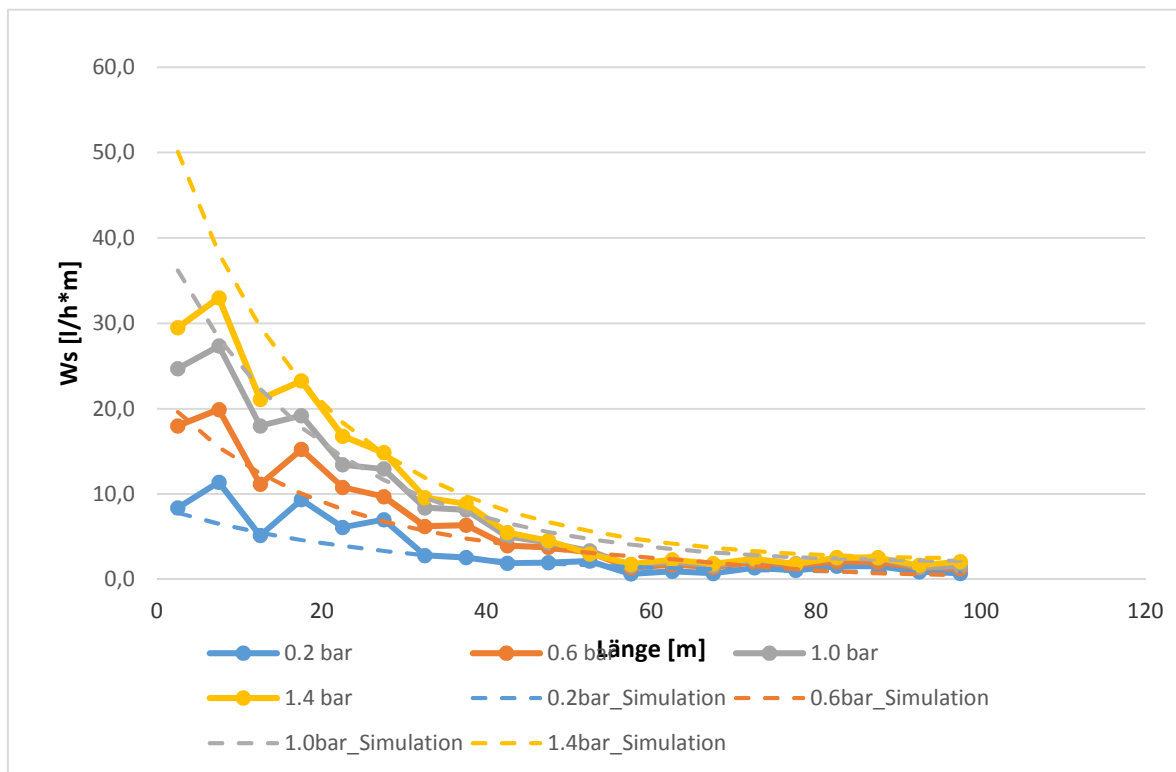


Abbildung 31: Durchflussraten, 100-m-Perlschlauch, gemessen und simuliert

Die Ergebnisse zeigen, dass sich Wasserauslässe und Druckabfall gut durch das Modell ANSYS-Fluent beschreiben lassen. Somit lässt sich ANSYS-Fluent als Grundlage für eine Optimierung des Systems Schlauch-Schlauchwand-Wasser nutzen.

1.10.4 Simulationsszenario: Veränderung der Permeabilität

Für ein optimales Pflanzenwachstum ist eine möglichst gleichmäßige Wasserverteilung über die gesamte Schlauchlänge notwendig. Der vorliegende permatube®-Schlauch weist zumindest bei größeren Längen einen Druckabfall auf, der die Anwendung größerer Längen zumindest fraglich erscheinen lassen. Für eine Optimierung des Systems sollen verschiedene Ansätze untersucht werden. Neben der Verwendung von geschlossenen „Zubringerleitungen“ kann der Wasserdurchlass bzw. der Druckabfall durch Veränderungen der Permeabilität und des Schlauchdurchmessers verändert werden. Die Auswirkungen können mit dem überprüften Strömungsmodell abgeschätzt werden.

Die gemessene Permeabilität eines Standardschlauches liegt bei ca. $10^{-14} m^2$. Um die Auswirkungen veränderter Permeabilität zu prüfen wurde im Vergleich zum 50 m langen „Standardperlschlauch“ ($K=10^{-14} m^2$) ein Schlauch mit einer 10-fach niedrigeren Permeabilität ($10^{-15} m^2$) und einer mit einer 10-fach höheren Permeabilität ($10^{-13} m^2$) simuliert. Abb. 32 zeigt den Druckabfall über die 50 m Perlschlauchlänge für die 3 verschiedenen Schläuche und Abb. 34 den Wasserauslass für die 3 Schläuche.

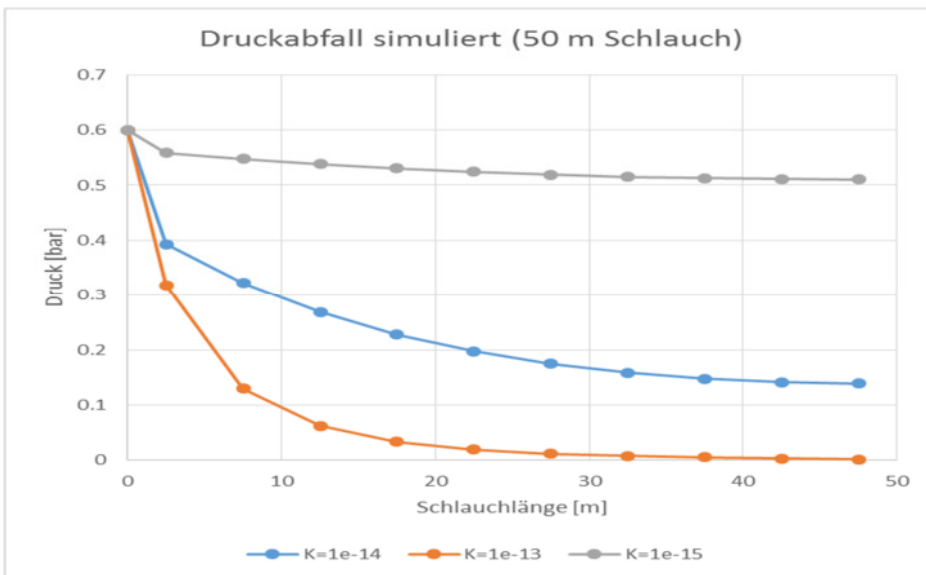


Abbildung 32: Druckabfall über die Schlauchlänge, simuliert, unterschiedliche Permeabilität

Es wird deutlich, dass bei der sehr hohen Permeabilität der Druck am Schlauchende auf 0,002 bar abfällt, während er bei der mittleren Variante auf 0,139 bar und bei Variante mit der geringen Permeabilität nur auf 0,510 bar abfällt (Abb. 33). Dies entspricht einem Druckabfall auf 0,3 %, 23,1 % und 85 % bei der „durchlässigen“, „mittleren“ und „dichten“ Variante. Die dichte Variante hat also eine sehr viel bessere Gleichmäßigkeit der Wasserabgabe, allerdings ist auch entsprechend die gesamte mittlere spezifische Wasserabgabe sehr viel niedriger ($30,35 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$, $11,10 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ und $2,69 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ für den „durchlässigen“, „mittleren“ und „dichten“ Schlauch. Eine sehr viel bessere Gleichmäßigkeit der Wasserabgabe über die Schlauchlänge wird also mit einer sehr viel geringeren Wasserabgabe „erkaufte“.

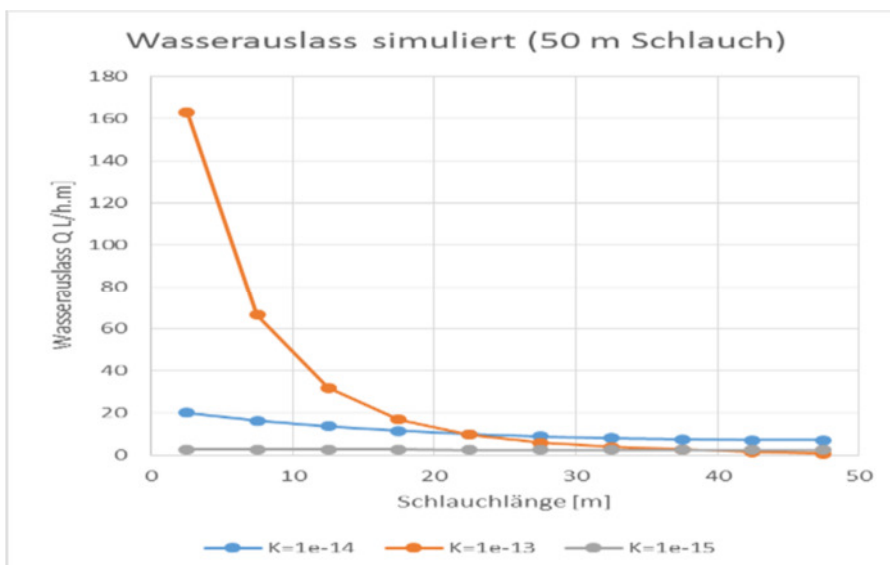


Abbildung 33: Spez. Wasserabgabe über die Schlauchlänge, simuliert, unterschiedliche Permeabilitäten

Eine Veränderung der Schlauchpermeabilität um den Faktor 10 kleiner oder größer erscheint technisch eher unrealistisch. Um realistische Auswirkungen verschiedener Schlauchpermeabilitäten zu testen wurden Permeabilitäten von bereits produzierten Schläuchen abgeschätzt. Vorhandene Testschläuche hatten eine spezifische Wasserabgabe von $60 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ und ca. $30 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ (jeweils bei 0,6 bar Eingangsdruck); die Produktion von Perlschläuchen mit einer spezifischen Wasserabgabe von $15 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ist von der Produktion her möglich.

Die entsprechenden simulierten Wasserdurchflüsse sind in Abb. 34 (links) dargestellt. Es wird deutlich, dass der 60 L Perlschlauch eine sehr viel höhere Ungleichheit zwischen den Wasserauslässen entlang der Schlauchlänge aufweist als der 15 L Schlauch. Das Gleiche gilt für den Druckabfall über die Schlauchlänge, der bei dem 60 l Perlschlauch größer ist als bei dem 15 L Schlauch (Abb. 34, rechts): Auch hier ist die Ungleichheit beim 60 L Schlauch sehr viel größer als beim 15 L Schlauch. Der Druck fällt ab auf 10 %, 24 % und 45 % des Eingangsdrucks beim 60 L-, 30 L- und 15 L-Schlauch.

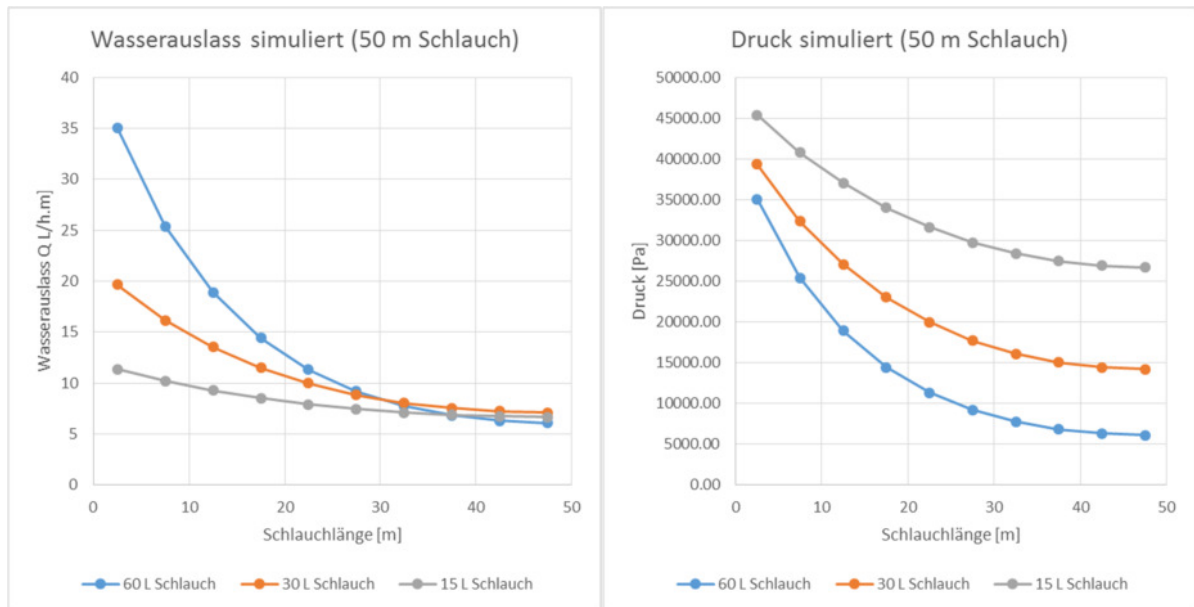


Abbildung 34: Spez. Wasserabgabe (links) und Druck (rechts), simuliert, verschiedene Permeabilität, (60000 Pa = 0,6 bar)

1.10.5 Simulationsszenario: Veränderung des Schlauchdurchmessers

Der Schlauchdurchmesser hat einen großen Einfluss auf den Druckabfall in Schläuchen, da kleinere Schläuche einen viel größeren Reibungsverlust aufweisen als größere Schläuche. Dementsprechend kann die Gleichmäßigkeit der Wasserabgabe durch einen größeren Schlauchdurchmesser verbessert werden.

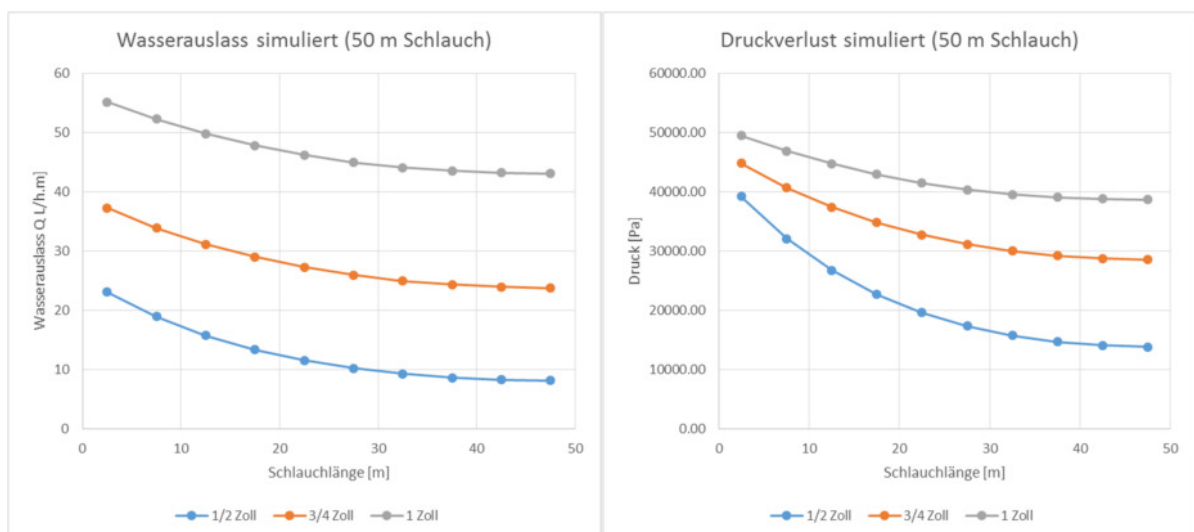


Abbildung 35: Spez. Wasserabgabe (links) und Druck (rechts), simuliert, versch. Schlauchdurchmesser, (60000 Pa = 0,6 bar)

In der Simulation wurde der Standardperlschlauch (1/2 Zoll = 12,7 mm Innendurchmesser) den beiden größeren Schläuchen 3/4 Zoll (= 19 mm Innendurchmesser) und 1 Zoll (= 25,4 mm Innendurchmesser) gegenübergestellt.

Die entsprechenden simulierten Wasserdurchflüsse sind in Abb. 35 (links) dargestellt. Es wird deutlich, dass der 1/2 Zoll Schlauch eine etwas höhere Ungleichheit zwischen den Wasserauslässen entlang der Schlauchlänge aufweist als der 1 Zoll-Schlauch. Das Gleiche gilt für den Druckabfall über die Schlauchlänge, der bei dem 1/2-Zoll Schlauch größer ist als bei dem 1-Zoll- Schlauch (Abb. 35, rechts): Auch hier ist die Ungleichheit beim 1/2 Zoll Schlauch sehr viel größer als beim 1 Zoll-Schlauch. Der Druck fällt ab auf 23 %, 48 % und 65 % des Eingangsdrucks beim 1/2-Zoll-, 3/4-Zoll- und 1-Zoll-Schlauch.

1.10.6 Schlussfolgerungen aus den Simulationen mit ANSYS

Es wird deutlich, dass die ANSYS-Simulationen die gemessenen Werte im Wesentlichen richtig wiedergeben. Die Simulationen sind somit ein wichtiges Werkzeug zur Beschreibung des Systems Schlauch/Schlauchmaterial/Wasser. Auswirkungen von Materialeigenschaften (Permeabilität), Schlauchlänge und Schlauchdurchmesser auf Wasserdurchfluss und Druckabfall können für beliebige Kombinationen berechnet werden; damit kann das Gesamtsystem gemäß Anforderungen von Nutzern optimiert werden.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine geringere Permeabilität des Perlschlauchmaterials und ein größerer Schlauchdurchmesser wichtige Steuergrößen zur Optimierung des Systems sind.

1.10.7 Nomogramme für die Auslegung von Bewässerungssystemen

Die gesamte Wassermenge, die in einen Perlschlauch hineinfließt, ist stark abhängig von der Schlauchdurchlässigkeit und der Schlauchlänge. Für die Planung der Auslegung eines perlschlauchbasierten Bewässerungssystems ist es von großer Bedeutung, den maximal benötigten Wasserbedarf zu kennen. Als Hilfestellung hierzu wurden Nomogramme basierend auf ANSYS-Simulationen entwickelt. Für Schlauchlängen bis zu 100 m, Eingangsdrücken von 0,2, 0,4 und 0,6 bar und spezifischen Wasserabgaben von 20, 30, 40, 50 und 60 L h⁻¹ m⁻¹ wurden jeweils ANSYS-Simulationen durchgeführt. Bei Kenntnis der Schlauchqualität, des geplanten Eingangsdrucks und der geplanten Schlauchlänge kann mit diesen Nomogrammen die maximal benötigte Wassermenge ermittelt werden (Abb. 36). Da aufgrund der beschriebenen Alterungsprozesse die Durchflussrate mit der Zeit tendenziell abnimmt werden hier maximale Werte für die Auslegung eines Bewässerungssystems ermittelt. Zukünftige Praxistest müssen zeigen, inwieweit hier aus Gründen der Kosteneinsparung gerechtfertigte Abschläge nach unten vorgenommen werden können.

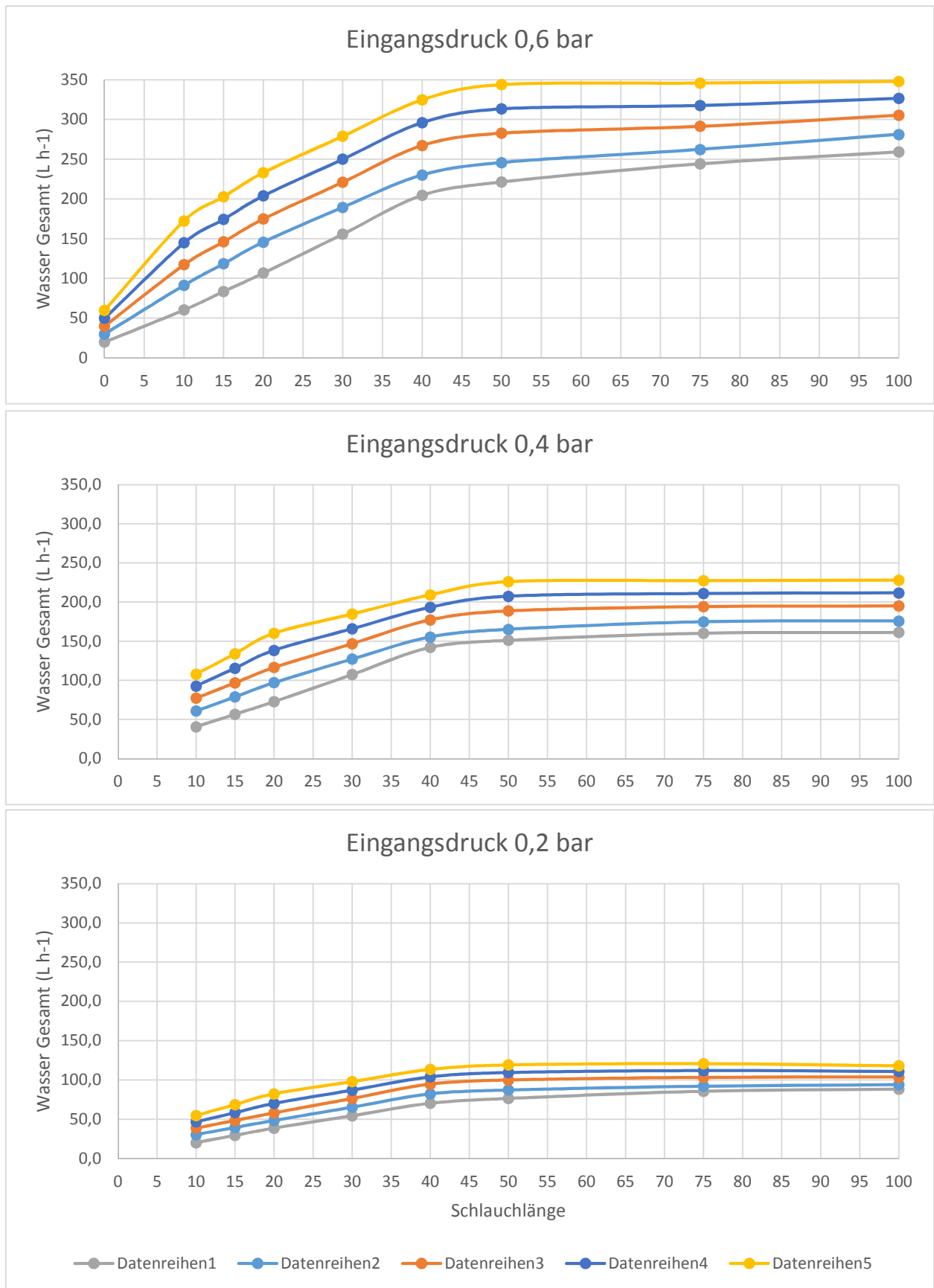


Abbildung 36: Wassermenge (L h⁻¹) in Abhängigkeit von Eingangsdruck und Schlauchlänge

1.10.8 Simulation der Bodenwassergehalte mit HYDRUS-2D

Wesentliches Ziel der Simulationen zum Bodenwasser war es, Hinweise auf den Verlegeabstand, die Verlegetiefe der Perlschläuche und optimale Bewässerungsmengen in Abhängigkeit von der Bodenart zu erhalten. Benutzt wurde das Simulationsprogramm HYDRUS-2D, ein Programm, das weltweit zur Beschreibung von Wasserbewegungen im Boden genutzt wird [Sej14].

Wesentliche Eingangsdaten für das Modell sind die Bodenart, aus der wiederum wichtige hydraulische Funktionen des Bodens abgeleitet werden, wie z.B. die Wasserspannungskurve und die Funktion der Wasserleitfähigkeit, Verlegetiefe und -abstand, und die Wassermenge, die pro Zeiteinheit aus dem Perlschlauch austritt.

Vorherige Messungen mit dem Perlschlauch haben ergeben, dass zumindest bei größeren Verlegelängen (20 bis 50 m) die spezifische Wasserabgabe ungefähr 1 bis 3 L m⁻¹ h⁻¹ beträgt. Typische Bewässerungsgaben in Trockengebieten liegen zwischen 30 und 60 mm pro Bewässerungsgabe. Auf Basis dieser Angaben wurden spezifische Wasserabgaben zwischen 1,0 und 2,5 L h⁻¹ m⁻¹ simuliert bei Bewässerungsdauern von 10 Stunden. Dies ergibt Bewässerungsgaben zwischen 62,5 und 25 mm (unter der Annahme, dass bei einem Verlegeabstand von 40 cm die gesamte Verlegebreite befeuchtet wird) (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Spezifische Wasserabgabe und Bewässerungsgabe für die Simulationen mit HYDRUS-2D

Wasserauslass [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Wassermenge nach 10 Stunden Bewässerung [L m ⁻¹]	Wassermenge bei 40 cm Verlegeabstand (0,4 m ⁻²) [mm] ≙ [L m ⁻²]
2,5	25	62,5
2,0	20	50,0
1,5	15	37,5
1,0	10	25,0

Simulationen wurden durchgeführt für die FAO-Gruppen der Sande (Sand und lehmiger Sand [sand; loamy sand]), der grobkörnigen Lehme (sandiger Lehm [sandy loam]), der mittleren Lehme (schluffiger Lehm [silty loam]), der feinkörnigen Lehme (toniger Lehm [clay loam]) und der Tone (sandiger Ton [sandy clay]). Die Anfangsfeuchte in den Simulationen betrug jeweils -500 hPa (pF 2,7), was einem relativ trockenen Boden entspricht. Bei dieser Bodenfeuchte sollten die meisten Kulturpflanzen spätestens bewässert werden. Die Verlegetiefe in den Simulationen beträgt 20 cm.

In den Abbildungen 37 und 38 sind jeweils dargestellt die simulierte Wasserverteilung nach 5 Stunden und 10 Stunden (während der Bewässerung) und nach 24 und 48 Stunden (Umverteilung des Wassers, Sickerung) bei einer Verdunstung an der Bodenoberfläche von 5 mm/Tag.

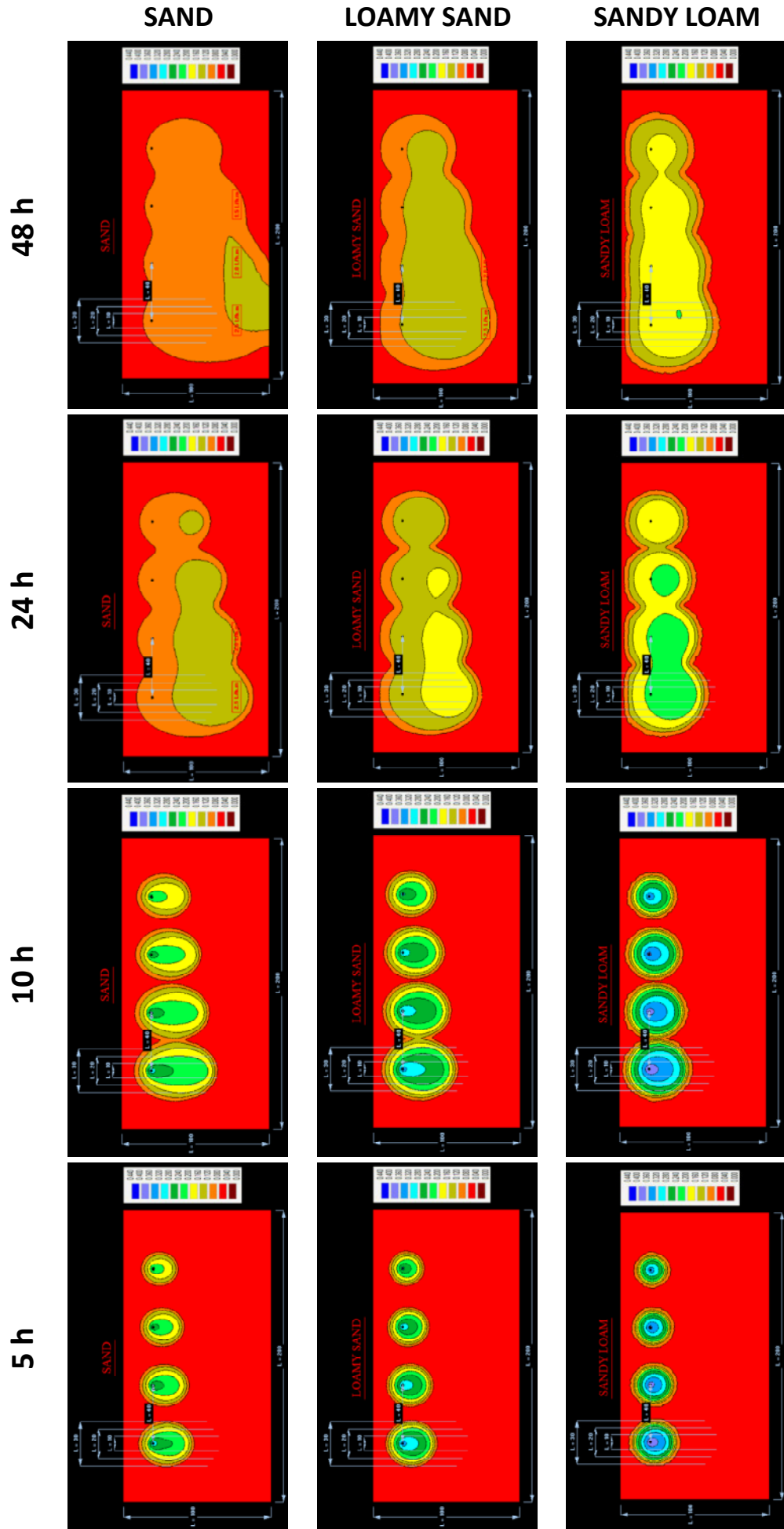


Abbildung 37: Wassergehaltsverteilung ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) nach 5, 10, 24 und 48 Stunden bei Bewässerung über 10 Stunden mit 2,5, 2,0, 1,5 und $1,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ für die Bodenarten Sand, lehmiger Sand und sandiger Lehm

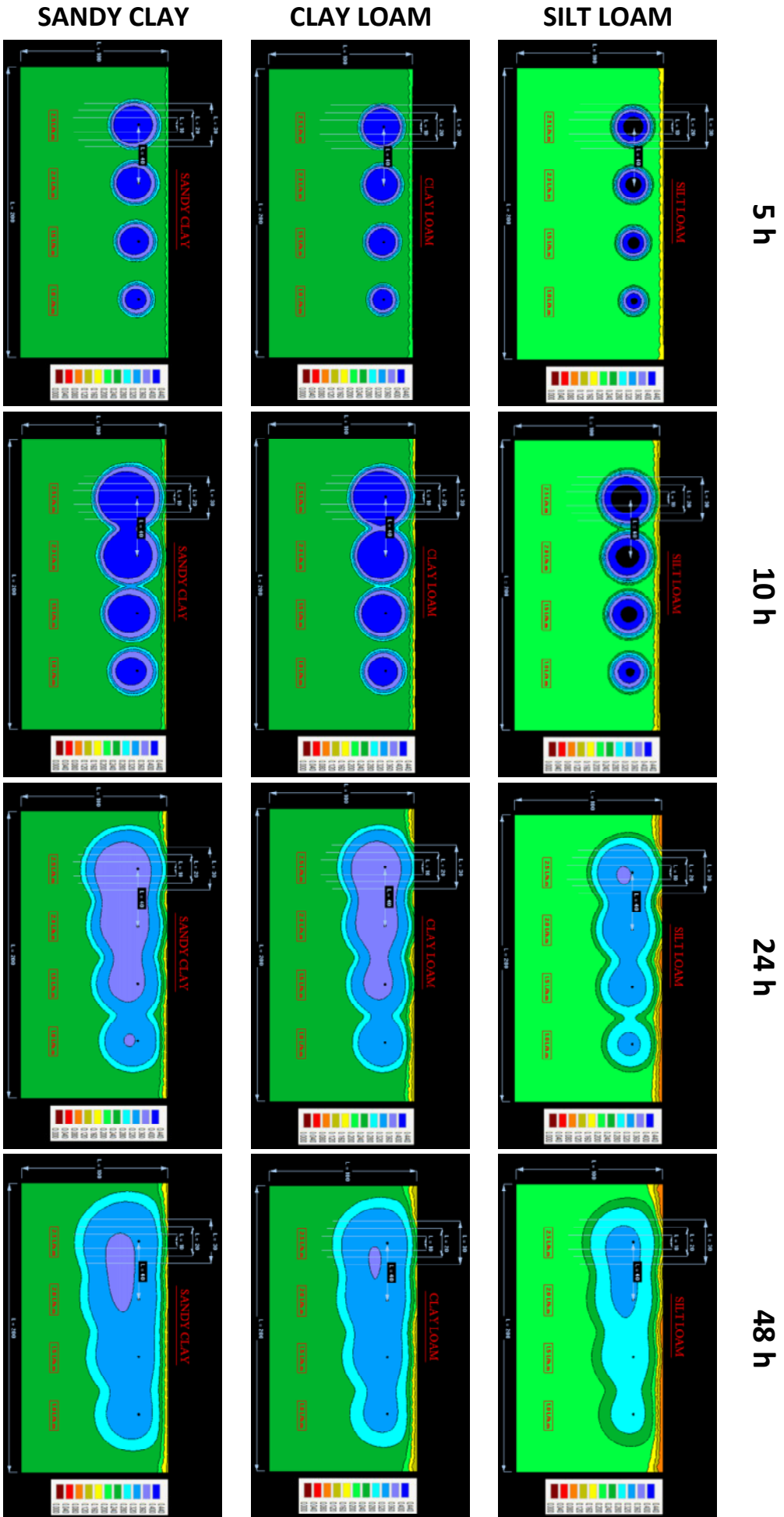


Abbildung 38: Wassergehaltsverteilung ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) nach 5, 10, 24 und 48 Stunden bei Bewässerung über 10 Stunden mit 2,5, 2,0, 1,5 und $1,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ für die Bodenarten schluffiger Lehm, toniger Lehm und sandiger Ton

1.10.9 Optimierung von Verlegeabstand, Verlegetiefe und Bewässerungsintensität (HYDRUS-2D)

Aus den Simulationen wird deutlich, dass aufgrund der geringeren Wasserhaltefähigkeit die Wasserbewegung bei den leichten Böden (Sand, Lehmiger Sand, nicht ganz so ausgeprägt auch beim sandigen Lehm) ausgeprägt nach unten gerichtet ist, während die seitliche Wasserbewegung wegen der geringeren Kapillarität dieser Böden sehr viel geringer ist. Bei den schwereren Böden (schluffiger Lehm, toniger Lehm und sandiger Ton) hingegen sind die Verteilungsmuster nahezu kreisrund bedingt durch eine stärkere Kapillarität in Verbindung mit einer durch geringe Wasserleitfähigkeiten bedingten geringeren Sickerung. Nach 24 Stunden allerdings haben sich alle Feuchtezonen verbunden, so dass der Einfluss des Verlegeabstandes eher gering einzuschätzen ist. In Verbindung mit einer notwendigen geringeren Wassergabe bei den Sanden zur Verhinderung der Auswaschung sind allerdings bei den leichteren Böden etwas geringere **Verlegeabstände** angebracht (Sand 30 cm, lehmiger Sand und sandiger Lehm: 35 cm), bei den schwereren Böden etwas Größere (schluffiger Lehm und toniger Lehm 40 cm, sandiger Ton: 45 cm).

Die Durchfeuchtung des Bodens sollte bis ungefähr an die Bodenoberfläche reichen, da sich in diesem Bereich üblicherweise die meisten Wurzeln der Kulturpflanzen befinden. Eine trockene Bodenschicht an der Bodenoberfläche reduziert die Verdunstung erheblich und hilft somit, Wasser einzusparen und wegen der geringeren Verdunstung mögliche Versalzungsprobleme zu minimieren. Das untere Ende der Befeuchtung des Bodens sollte bei etwa 60 cm liegen. Die Durchwurzelung des Bodens nimmt ab dieser Tiefe erheblich ab und damit mögliche Sickerwasserverluste (und damit potentiell auch Verluste an Nährstoffen) erheblich zu.

Beim Sand und lehmigem Sand ist die Durchfeuchtungsfront bei den höheren spezifischen Wasserabgaben ($2,5$ und $2,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$) nach 24 h bis in 90 cm Tiefe vorgedrungen und nach 48 h in mehr als 100 cm Tiefe. Parallel dazu sind bei Sand und beim lehmigen Sand die obersten 10 bzw. 5 cm gar nicht befeuchtet. Bei den schwereren Bodenarten reicht die Befeuchtungsfront bis nahezu an die Bodenoberfläche.

Daraus folgt, dass eine **optimale Verlegetiefe** bei leichteren Böden eher etwas flacher und bei schwereren Böden etwas tiefer zu erfolgen hat (Sand [10 cm], lehmiger Sand [10 - 15 cm], alle anderen Bodenarten [15 - 20 cm]).

Aufgrund der stärkeren Versickerung ist die **Bewässerungsintensität** (Bewässerungsmenge pro Gabe) insbesondere bei den leichten Böden zu reduzieren um eine Versickerung auf größere Tiefen als 50 cm zu vermeiden. Beim Sand und lehmigen Sand ist bei 10 Stunden Bewässerungsdauer eine Intensität von $1,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ bzw. $1,0$ bis $1,5 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ optimal. Beim sandigen Lehm ist eine Bewässerungsintensität von $1,5$ bis $2,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ bei 10 Stunden Bewässerung angemessen. Bei den schweren Böden können zwischen $1,5$ und $2,5 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ für 10 Stunden gegeben werden.

Tab. 5 gibt eine Übersicht über die Empfehlungen zu Verlegeabständen, Bewässerungstiefen und Bewässerungsintensitäten.

Bei höheren Bewässerungsintensitäten aufgrund von leichter durchlässigen Schläuchen oder höheren Wasserdrücken müssen die Bewässerungszeiten entsprechend angepasst werden (Tab. 6).

Tabelle 5: Übersicht über optimale Verlegeabstände, Verlegetiefen und Bewässerungsintensitäten bei verschiedenen Bodenarten

Bodenart	Verlegeabstand [cm]	Verlegetiefe [cm]	Maximale Bewässerungsintensität bei 10 h Bewässerungsdauer [L h ⁻¹ m ⁻¹]	Max. Bewässerungsmenge [L m ⁻¹]	Bewässerte Fläche pro m bei 30, 35, 40 bzw. 45 cm Verlegeabstand [m ² m ⁻¹]	Max. Bewässerungsgabe [mm] ≙ [L m ⁻²]
Sand	30	10	1,0	10	0,30	33
Lehmiger Sand	35	12	1,5	15	0,35	42
Sandiger Lehm	35	15	2,0	20	0,35	57
Schluffiger Lehm	40	20	2,5	25	0,40	63
toniger Lehm	40	20	2,5	25	0,40	63
Sandiger Ton	45	20	2,5	25	0,45	56

Tabelle 6: Maximale Bewässerungsdauer bei verschiedenen Bewässerungsintensitäten

Bodenart	Max. Bewässerungsmenge [L m ⁻¹]	Max. Bewässerungsdauer bei gegebener Bewässerungsintensität [h]					
		1,0 [L h ⁻¹ m ⁻¹]	2,0 [L h ⁻¹ m ⁻¹]	3,0 [L h ⁻¹ m ⁻¹]	5,0 [L h ⁻¹ m ⁻¹]	7,5 [L h ⁻¹ m ⁻¹]	10,0 [L h ⁻¹ m ⁻¹]
Sand	10	10,0	5,0	3,3	2,0	1,3	1,0
Lehmiger Sand	15	15,0	7,5	5,0	3,0	2,0	1,5
Sandiger Lehm	20	20,0	10,0	6,7	4,0	2,7	2,0
Schluffiger Lehm	25	25,0	12,5	8,3	5,0	3,3	2,5
toniger Lehm	25	25,0	12,5	8,3	5,0	3,3	2,5
Sandiger Ton	25	25,0	12,5	8,3	5,0	3,3	2,5

Abb. 39 zeigt die simulierte Wasserverteilung bei optimaler Verlegetiefe, optimalem Verlegeabstand und optimaler Bewässerungsmenge (Daten gemäß Tab. 5 und 6). Es wird deutlich, dass so ein optimiertes Durchfeuchtungsergebnis erzielt werden kann: Nach Ende der Bewässerung, wenn die maximale Bewässerungsmenge gegeben worden ist (in diesem Fall nach 10 Stunden) berühren sich die Durchfeuchtungsbereiche. Somit sind alle Bereiche mit Wasser versorgt. In der folgenden Umverteilungsphase erfolgt durch kapillaren Wassertransport ein seitlicher Ausgleich der Wassermengen, aber auch eine weitere Sickerung und potentielle Auswaschung. Nach 24 Stunden zeigt die Verteilung des Wassers, dass sich in allen Fällen eine relativ homogene Wasserverteilung eingestellt hat und in keinem Fall eine Sickerung in Tiefen größer als 50-60 cm stattgefunden hat. Gleichzeitig reicht die Durchfeuchtung nicht ganz bis an die Bodenoberfläche. Somit hat eine für das Pflanzenwachstum optimale Verteilung des Wassers stattgefunden bei gleichzeitiger Verhinderung von Auswaschungsverlusten und weitgehender Reduzierung von Evaporationsverlusten.

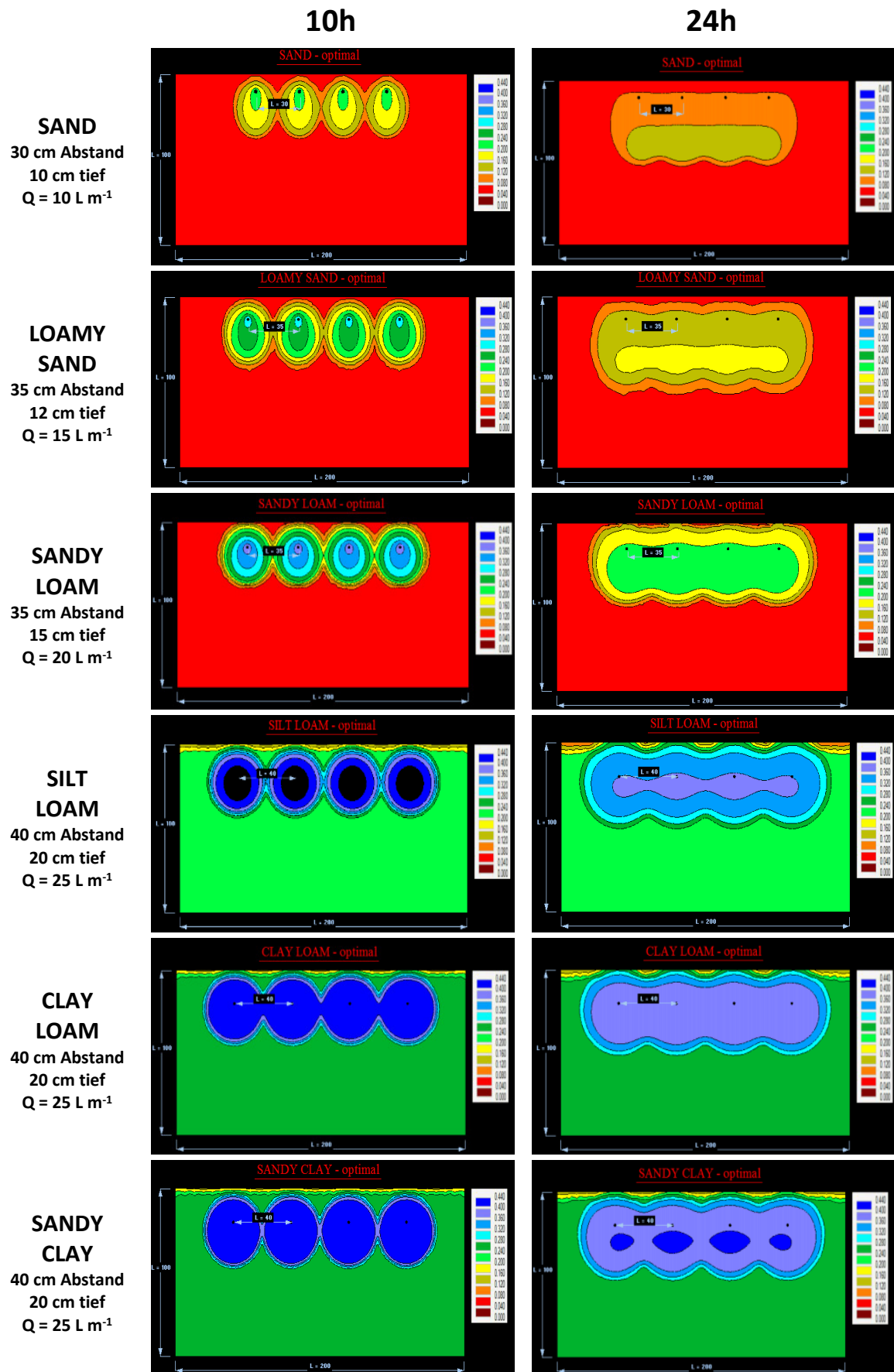


Abbildung 39: Wassergehaltsverteilung nach 10 und 24 Stunden bei Bewässerung unter optimalen Bedingungen (Verlegetiefe, Verlegeabstand und max. Bewässerungsmenge) gem. Tab. 5

2 Änderungen am Produktionsprozess

2.1 Optimierung des Dosier- und Mischkonzeptes

Der permatube®-Bewässerungsperlschlauch besteht zu einem Anteil von etwa 2/3 aus Altreifenrecycling-Granulat. Da Recyclingmaterialien zum Teil schwer zu bearbeiten sind und in ihrer Qualität teilweise stark schwanken, stellt die Dosierung und Mischung der Ausgangsmaterialien eine besondere Herausforderung dar, um eine gleichbleibende Endproduktqualität zu gewährleisten. Um dieser Problematik entgegen zu wirken, wurden spezifische Modifikationen an der bestehenden Dosier- und Mischtechnik vorgenommen. Dadurch konnten die Ausfall- und Ausschussraten auf ein Minimum reduziert werden. Parallel wurden in Kooperation mit verschiedenen Dosieranlagen-Herstellern neue Dosier- und Mischkonzepte erstellt und realitätsnah an der Extrusionsanlage getestet. In diesem Rahmen konnten wertvolle Informationen unter anderem im Hinblick auf Produktstabilität und zukünftiger Kapazitäts-Erhöhung unter Verwendung höherer Recyclinganteile gesammelt werden.

2.2 Entwicklung an der Extrusion sowie Schneckengeometrie

Ungleichmäßige Materialerwärmung im Extruder sowie schneckengeometriebedingte Druckschwankungen bei der Materialförderung können Abweichungen in der Produktqualität verursachen. Aus diesem Grund wurden die Düsen-Geometrien sowie das Staudruckverhalten optimiert, was eine kompaktere Materialverbindung und somit eine oberflächen- und längenbezogen gleichmäßigere Verteilung der Wasserabgabe im Endprodukt zur Folge hat. Basierend auf Daten aus Vorversuchen mit einer Standard-Extrusionsschnecke wurde eine auf die Anlagenbaugröße skalierte und verbesserte Schneckengeometrie definiert und angefertigt. Aufgrund von Modifikationen im Wärmeübergang sowie Dispersions- und Druckverhalten konnte somit eine Anlagenkapazitätserweiterung von ca. 60 - 70 % realisiert werden. Der Anteil des Recycling-Materials konnte verglichen zur Ausgangssituation auf diese Weise ebenfalls um ca. 5 % erhöht werden.

2.3 Energieeffizienz der Perlschlauchproduktion

Im Zuge dieser Produktionsoptimierung wurden Maßnahmen ergriffen, um die Energieeffizienz zu erhöhen. Durch die Abstimmung von Antriebsmotorleistung und Extrudergetriebe sowie die Verbesserung der Heizenergieausnutzung, konnte der Energieeintrag pro produzierten Meter permatube® von 79 Wh auf 28 Wh um 65 % reduziert werden.

2.4 Zukünftige Weiterentwicklungen des permatube®-Schlauchs

Schwerpunkt der zukünftigen Optimierung des Produktionsverfahren muss die Verbesserung der Wasserabgabehomogenität sein. Zusätzlich wird die weitere Steigerung der Energienutzungseffizienz sowie des Recyclingmaterialeinsatzes angestrebt.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der permatube®-Perlschlauch in vielen Aspekten sehr unterschiedliche Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Mikrobewässerungsschläuchen wie Tropf- oder Kapillarschläuche aufweist.

Die spezifische Wasserabgabe von 1 m langen Perlschlauchstücken außerhalb des Bodens im Labor ist mit durchschnittlich $31,3 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ im Vergleich zu herkömmlichen Schläuchen mit Tropfern vergleichsweise hoch. Dabei liegt der Variabilitätskoeffizient mit ca. 15 % im oberen Bereich der in der Mikrobewässerung üblichen Toleranz.

Die nicht-eingebauten Perlschläuche weisen eine im Verlauf der Schlauchlänge aufgrund des Druckverlustes abnehmende Wasserabgabe auf.

Praxisnahe Untersuchungen mit dem im Boden verlegten Perlschlauch haben gezeigt, dass die Wasserabgabe sowie die Variabilität der Wasserabgabe sich im eingebauten Zustand erheblich reduziert. Die Unterschiede im Wasserauslass im eingebauten im Vergleich zum nicht-eingebauten Zustand waren umso größer, (i) je niedriger der Eingangs-Wasserdruck war, (ii) je geringer die spezifische Wasserabgabe des Schlauches war, (iii) bei lehmigen Böden größer als bei sandigen Böden. Eine Reduktion des Wasserauslasses im eingebauten Zustand (bei gleichem Eingangsdruck) führt notwendigerweise zu einer sehr viel gleichmäßigeren Wasserabgabe über die Schlauchlänge. Dies konnte sowohl mit Modellrechnungen als auch durch Feldversuche in Osnabrück und Marokko belegt werden. Sowohl Feldversuche in einem Sand in Osnabrück mit 15 m langen eingebauten Perlschläuchen als auch Feldversuche in Marokko in einem Lehm mit 100 Meter langen eingebauten Perlschläuchen zeigten eine über die Schlauchlänge weitestgehend homogene Wasserabgabe. Somit erhöht sich die Gleichmäßigkeit der Wasserabgabe an einem Standort deutlich bei weniger durchlässigen Schläuchen bzw. einem geringeren Eingangsdruck (bzw. eine von vornherein reduzierte Wassermenge).

Der Praxisversuch im Tropenhaus Tettau hat unter anderem gezeigt, dass bei sehr schweren tonreichen Böden eine Bewässerung generell, also auch mit permatube®, sehr schwierig ist, da schwere Böden eine stark reduzierte Wasseraufnahmekapazität haben. Hier muss mit einer sehr reduzierten Wasserabgabe bewässert werden.

Versuche zur künstlichen Alterung der permatube®-Schläuche, d.h. Austrocknung/Wiederbefeuchtung, Hitzeeinwirkung, Frosteinwirkung und Quellen im Wasser haben gezeigt, dass sich die Eigenschaften des permatube®-Schlauchs verändert. Da sich die veränderte Wasserabgabe aber in einem Bereich um 10 % bewegt, und somit in ähnlicher Größenordnung wie die Schlauchvariabilität an sich, erscheint der Einfluss dieser Alterungsprozesse eher vernachlässigbar.

Die Entnahme und anschließende Überprüfung eines mehr als zwei Jahrzehnte genutzten Perlschlauchs hat gezeigt, dass der Perlschlauch auch nach 24 Jahren Einsatz im Boden immer noch zur Bewässerung genutzt werden kann.

Mithilfe von Simulationen der Schlauchhydraulik (ANSYS Fluent) und der Wasserbewegung im Boden (HYDRUS-2D) konnten Anwendungsempfehlungen im Hinblick auf Verlegeabstand, Verlegetiefe und Bewässerungsintensität in Abhängigkeit von spezifischer Wasserabgabe und Bodenart erarbeitet werden.

4 Diskussion der Ergebnisse und Empfehlungen für die Praxis

Die Variabilität der spezifischen Wasserabgabe nach der Optimierung des Produktionsprozesses ist weiterhin vorhanden, allerdings in einem Ausmaß, welches vermutlich im Bewässerungsbetrieb vernachlässigbar ist. Hervorzuheben ist, dass sich die Abweichung der spezifischen Wasserabgabe im eingebauten Zustand im Boden auf einen deutlich niedrigeren Wert verringert im Vergleich zum nicht-eingebauten Zustand. Dies ist vor allem auf den Gegendruck bzw. die Wassersättigung des Bodens zurückzuführen.

Dieser Einflussfaktor muss bei der herkömmlichen oberirdischen Bewässerung nicht berücksichtigt werden, da die spezifische Wasserabgabe der einzelnen Emitter von oberirdischen Bewässerungsmitteln während einer Bewässerungsphase in der Regel konstant bleibt. Bei Perlschläuchen, die im Boden verlegt sind, ändert sich die Wasserabgabe je nach Bodenart und kann sich im Bewässerungsvorgang sogar mit der zunehmenden Sättigung des Bodens verändern. Deshalb ist eine konventionelle zeitbasierte Bewässerungssteuerung bei Perlschläuchen nur eingeschränkt sinnvoll. Zur Kontrolle der Wasserabgabe unter den jeweiligen Bedingungen sollte die abgegebene Wassermenge mittels Wasserzähler überwacht und gegebenenfalls anhand von Armaturen justiert werden. Alternativ kann die Bewässerung auch über eine volumenbasierte Steuerungsautomatik erfolgen.

Bei niedrigem Wasserdruck und bei zusätzlicher Wassersättigung des Bodens passt sich die Homogenität der Wasserabgabe auf einer Schlauchlänge bis zu 100 m Verlegelänge an, so dass, wie im Feldversuch in Marokko ermittelt, eine professionelle Verwendung bei einer Beetlänge bis zu 100 m möglich ist.

Bei Einzelpflanzenbewässerung von z.B. Stauden oder Obstgehölzen sind sogar größere Flächen möglich, da in diesem Fall die Perlschläuche mit maximalen Verlegelängen von 15 m an der einzelnen Pflanze verlegt werden können.

Wenn diese technischen Eigenschaften des Perlschlauches berücksichtigt werden, kann das System zur professionellen Bewässerung von Grünflächen, Sportstätten und landwirtschaftlichen Nutzflächen, mitsamt allen Vorteilen genutzt werden. Die wesentlichen Vorteile, die eine Bewässerung im Boden mit sich bringt, sind die Reduzierung des Krankheitsdrucks durch trockene Oberflächen, die geringere Ablagerung von Kalk und Salzen an den Oberflächen, ein geringerer Wasserverbrauch durch zielgenaue Bewässerung im Wurzelballenbereich und Vermeidung von Verdunstungsverlusten sowie die Abwesenheit von Störelementen an der Oberfläche.

Allerdings muss bedacht werden, dass eine unterirdische Bewässerung keine Frostschutzberegnung zulässt. Im Einzelfall sollte auch berücksichtigt werden, dass unterirdisch verlegte Schläuche im Falle der Bodenbearbeitung je nach Verlegetiefe entfernt werden sollten. Dies stellt gegebenenfalls einen Mehraufwand in der Feldbewirtschaftung dar.

5 Ausblick

Im Laufe des Projektes wurden einige technische Verbesserungen am Perlschlauch vorgenommen. Nachuntersuchungen an den strukturoptimierten Prototypen haben, in Bezug auf die spezifische Wasserabgabe, zu verbesserten, homogeneren Ergebnissen geführt. Es bleiben dennoch Anforderungen zur technischen Verbesserung in Bezug auf die Perlschlauchstruktur, die im Rahmen der technischen Durchführbarkeit und der Wirtschaftlichkeit umgesetzt werden könnten.

Im Projekt wurde die Möglichkeit mit den Perlschläuchen zu düngen (Fertigation) nicht bearbeitet. Durch die Düngelösung können in anderen Bewässerungssystemen vor allem bei zwischenzeitlicher Austrocknung schnell verstopfte Tropfer und Ablagerungen in den Schläuchen entstehen. Eine Überprüfung der Reaktion des Perlschlauches auf die Bestandteile der Düngelösung und damit einhergehende Verstopfungsneigung oder die mögliche Abgabe von Schadstoffen durch die chemische Reaktion des Materials mit den Bestandteilen des Düngers stehen noch aus.

Aus umweltanalytischer Sicht sind einige Punkte bisher nur angedacht worden und konnten nicht bearbeitet werden. Dazu gehört die Abgabe von Schadstoffen aus den Schläuchen an das ausdringende Wasser. Wann und unter welchen Bedingungen bei der langjährigen Nutzung von permatube®-Schläuchen z.B. PAKs, Schwermetalle, Rußpartikel oder Mikroplastik abgegeben werden, ist daher eine wichtige Fragestellung. Der permatube® wird zwar in regelmäßigen Abständen vom SGS Institut Fresenius auf Schadstoffe und Schadstoffabgabe im Rahmen der REACH Verordnung geprüft und als unbedenklich zur Bewässerung im Boden eingestuft. Dennoch sollte zukünftig ein Langzeittest zur Untersuchung zur Anreicherung im Boden, Verlagerung ins Grundwasser und eine eventuelle Aufnahme durch die angebauten Kulturpflanzen durchgeführt werden.

Die Versuche haben allesamt gezeigt, dass Prüfverfahren, die für herkömmliche Mikrobewässerung entwickelt worden, für Perlschläuche nur eingeschränkt Anwendung finden können. Da die Bewässerung im Boden mit Perlschläuchen einige wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt, ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Anbieter von Perlschläuchen, die dem permatube® ähnlich sind, zunehmen wird. Um für den Verbraucher eine Produktsicherheit gewährleisten zu können, wäre es sinnvoll aus den Versuchsergebnissen ein standardisiertes Prüfverfahren für Perlschläuche zu entwickeln.

6 Veröffentlichungen und Präsentationen im Rahmen des Forschungsprojektes

Während der Projektlaufzeit entstanden folgende Veröffentlichungen und Präsentationen:

- Hülsmann, S. (2016): Bewertung von Wasserverteilung und Messverfahren auf einer mit porösen Schläuchen bewässerten Fläche. Bachelorarbeit, HS Osnabrück.
- Hülsmann, S., T. Rath & R. Anlauf (2016): Bewertung des Auslassverhaltens poröser Perlschläuche. 45. Osnabrücker Kontaktstudententage, Tagungsband, 25, HS Osnabrück.
- Hölscher, K., Tenti, M. (2016): Einsatz eines Bewässerungsperschlauches in der Praxis – Erfahrungen und Optimierungsansätze. Bachelorarbeit, HS Osnabrück.
- Anlauf, R. (2017): Application of a porous pipe irrigation system to save water. Presentation at Faculty of Engineering, Naresuan University, Thailand.
- Anlauf, R. (2018): Erfahrungen mit einem Bewässerungsperschlauch. Projektvorstellung vor Praktikern im Rahmen des Praxisbeirats des Studiengangs Gartenbau, HS Osnabrück.

Die Perlschläuche wurden zu verschiedenen Gelegenheiten öffentlich präsentiert, z.B.

- Internationale Landwirtschaftsmesse SIAM 04/2018 in Meknès, Marokko
- Produktschulungen für Landwirte, Marokko (11/2017 und 01/2018)
- Offizielle technische Zulassung des permatube®-Schlauchs für die Subventionierung in der Landwirtschaft, Marokko (05/2017)
- Diverse Zeitungsartikel:
 - „Im Reich der Schwitzenden Schläuche“ erschienen am 28. August 2015 in Weinheimer Nachrichten von Jürgen Drawitsch
 - „Schläuche helfen beim Sparen“ erschienen am 13.04.2017 im Darmstädter Echo von Constantin Lummitsch
 - „Fußballer stehen auf dem Schlauch“ erschienen am 09.06.2017 auf www.onetz.de von Martin Maier
 - „Vom Überwald fließt Wasser in die Welt“ erschienen am 21.10.2017 in der Odenwälder Zeitung von Fritz Kopetzky
 - „Irriguer souterrain pour manger sain“ erschienen am 04.01.2018 in l’opinion (marokkanische Tageszeitung) von Mostafa Bouhaidous

IV Fazit

Während der Projektlaufzeit wurden viele einzelne Fragestellungen rund um den Bewässerungsperlschlauch bearbeitet. Dazu gehörten Untersuchungen zur Qualität der Schläuche, Homogenität der Wasserabgabe, Homogenität der Produktion verschiedener Chargen, Alterungsverhalten, Unterschiede zwischen dem eingebauten und nicht-eingebauten Zustand, und weitere.

Die spezifische Wasserabgabe der Perlschläuche ist auch nach der Produktionsoptimierung unter Verwendung einer neuen Extrusionsanlage weiterhin nicht vollständig homogen. In welchem Ausmaß diese Abweichungen bei z.B. trockenstresssensiblen Kulturen tolerierbar sind und wie sich dieses im Vergleich zu herkömmlichen Mikrobewässerungssystemen darstellt konnte im Rahmen dieses Projektes nicht bearbeitet werden.

Grundsätzlich sind die permatube®-Bewässerungsperlschläuche bis zu einer Länge von 100 m (mit Einschränkungen) zur Bewässerung geeignet. Durch physikalische Eigenschaften des Perlschlauhes kommt es bei der Abgabe des Wassers durch die poröse Schlauchwand zu einem Druckverlust, der bei großen Durchflussmengen und relativ hohem Eingangsdruck eine Reduktion der Wasserabgabe im Schlauchverlauf verursacht. Gute Bewässerungsergebnisse werden bei geringem Eingangsdruck und gleichzeitig reduzierter Durchflussmenge erreicht. Bei sehr niedrigem Druck sind Einsparpotentiale hinsichtlich des Energieverbrauchs bei der Bewässerung möglich. Allerdings sollte bei dieser Betriebsart der Einfluss von Höhenunterschieden im Relief besondere Beachtung finden.

Im nicht eingebauten Zustand zeigt der Perlschlauch eine eher ungleichmäßige Wasserabgabe mit starker Abnahme über die Schlauchlänge. Beim Einbau in den Boden wird dagegen eine relativ gleichmäßige Wasserabgabe beobachtet. Durch den Gegendruck und die Wassersättigung des Bodens wird die Wasserabgabe reduziert, was zu sehr viel gleichmäßigeren Bewässerungsergebnissen führt. Detaillierte Zusammenhänge müssen aber noch weiter untersucht werden.

Die Kenntnis der Bodenart ist wichtig für die Wahl des richtigen Verlegeabstandes und der Verlegetiefe. In leichten Sandböden ist aufgrund der geringen horizontalen Wasserbewegung eine relativ enge und hohe (oberflächennahe) Verlegung erforderlich. Schwerere Böden mit höheren Ton- und Schluffanteil ermöglichen aufgrund der besseren Wasserleitfähigkeit eine tiefere Verlegung im Boden mit größeren Abständen.

Ein sachgemäßer Einsatz der Perlschläuche erfordert also vor Allem die Kenntnis der hydraulischen und bodenphysikalischen Rahmenbedingungen.

Im Allgemeinen wird bei Mikrobewässerung der Einsatz von vorgeschalteten Wasserfiltern empfohlen. Für Perlschläuche wird ebenfalls eine Filterung unabhängig von der Wasserqualität empfohlen, um ein Verstopfen der Poren zu verhindern.

Die zu Projektende produzierten strukturoptimierten permatube®-Prototypen sind vielversprechend hinsichtlich Reduktion von Reibungs- und Druckverlusten im Inneren des Perlschlauhes. Diese Schlauchtypen könnten das Potential zu einer weiteren Optimierung der Homogenität der Wasserabgabe bieten.

V Literaturverzeichnis

[Ans13] ANSYS Fluent 15.0: User's Guide, ANSYS, Inc., Canonsburg, USA, 2013

[Fel13] Feller, C.: Feldbewässerung unter dem Aspekt von Klimawandel und Wirtschaftlichkeit; Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt, 2013

[Mon11] Monney, P., Bravin, E.: Bewässerung von Obstbäumen, Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil, 2011

[Pas10] Paschold, P.-J.: Bewässerung im Gartenbau. Eugen Ulmer KG, 2010

[Sej14] Šejna, M., Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th.: The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media, User Manual, Version 2.04, PC Progress, Prague, Czech Republic, 305 pp., 2014

[Ten16] Tenti, M. und Hölscher, K.: Bachelorarbeit im Studiengang B. Sc. Produktionsgartenbau - Bewertung eines Bewässerungsperlschlauches in der Praxis, 2016

VI Anhänge

A1 Zwischenbericht 1

1. Kurzbericht zum Projektfortschritt

(Beantwortung in Stichworten genügt, falls erforderlich bitte Zusatzblätter verwenden)

Aktenzeichen AZ 31988/01	Bewilligungsempfänger Water Future Systems AG	
Projekttitel Weiterentwicklung eines hydraulisch und energetisch effizienten Unterflurbewässerungssystems mit voll-automatischer Regelung für die direkte Wurzeldüngung von Pflanzen		
Projektbeginn 05.05.2015	Projektlaufzeit 04.05.2016	Berichtszeitraum 05.05.2015-31.07.2015

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

- Einarbeitung in projektrelevante Themenfelder zur strukturierten Projektdurchführung
- Erstellung einer Projektdatenbank
- Gemeinsame Erstellung des Pflichtenheftes durch die Projektpartner
- Abgestimmte Konzeptionierung der Laborversuche
(Aufbau und Durchführung erfolgen nach Arbeitsbeginn des Projektmitarbeiters HSOS)
- Durchführung von Vorversuchen im Freiland an der HSOS zur weiteren Versuchsplanung

Vorläufige Ergebnisse:

- kurze Schläuche haben eine höhere Wasserabgabe je Meter als lange Schläuche
 - der Druckabfall bei langen Schläuchen ist sehr groß
 - die Wasserabgabe nimmt mit der Länger des Schlauches ab
 - bei niedrigem Druck erscheint die Wasserabgabe gleichmäßiger
- Konzeptionierung der Feldversuche und Findung geeigneter Versuchsflächen
(Aufbau und Durchführung erfolgen nach Arbeitsbeginn des Projektmitarbeiters HSOS)
- Umfangreiche Recherchen zu Wasserverteilung, Druckverhalten und Bodenabhängigkeiten
 - Erste Ansätze zur Eichung computergestützter Simulationsmodelle anhand vorläufiger Ergebnisse

Erkenntnisse:

Die simulierten Ergebnisse kommen denen der Vorversuche mit kleinen Abweichungen sehr nahe und eignen sich als Basis für nachfolgende Simulationsreihen.

2. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der geltenden Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung sowie der Finanzierungsplanung.

2.1 Arbeitsplanung

Der aktuelle technische Projektstand entspricht dem geplanten Ablauf der Arbeiten.

Einige Arbeitspakete mussten zeitlich verschoben werden, da das Arbeitsverhältnis des Projektmitarbeiters HSOS (Frau Farida Degner) außerhalb dieses Berichtszeitraums, d.h. zum 1.8.2015 realisiert wurde. Die entstandenen Projektkosten der Hochschule Osnabrück können also erst im nächsten Berichtszeitraum (01.08. – 31.10.) nachgewiesen werden.

2.2 Zeitplanung

Der Meilenstein 1 zur Erfolgskontrolle gemäß Projektantrag wurde nach der geplanten Projektlaufzeit von 1 Monat erreicht.

2.3 Kostenplanung

Die Kosten im Berichtszeitraum liegen aufgrund der Erläuterungen in Punkt 2.1 geringer als die geplanten Ausgaben.

2.4 Finanzierungsplanung

Die Finanzierungsplanung wurde eingehalten und wird weiterverfolgt.

3. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraumes gegenüber dem geltenden Antrag verändert (bitte begründen)?

Die Aussichten für die Erreichung der Projektziele im Berichtszeitraum bleiben im Vergleich zum geltenden Antrag unverändert.

4. Sind von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?

Dem Antragsteller sind im Berichtszeitraum keine Ereignisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

5. Sind oder werden Änderungen der Zielsetzung notwendig?

Ausgehend vom aktuellen Standpunkt ist eine Notwendigkeit für eine Änderung der Zielsetzung nicht erkennbar.

Datum	Stempel und Unterschrift des Bewilligungsempfängers
-------	-----------------------------------------------------

A2 Zwischenbericht 2

2. Kurzbericht zum Projektfortschritt

(Beantwortung in Stichworten genügt, falls erforderlich bitte Zusatzblätter verwenden)

Aktenzeichen AZ 31988/01	Bewilligungsempfänger Water Future Systems AG	
Projekttitle Weiterentwicklung eines hydraulisch und energetisch effizienten Unterflurbewässerungssystems mit voll-automatischer Regelung für die direkte Wurzeldüngung von Pflanzen		
Projektbeginn 05.05.2015	Projektlaufzeit 04.05.2016	Berichtszeitraum 01.08.2015-31.10.2015

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

- Entwicklung eines optimalen Messaufbaus für repräsentative Messungen im Labor (Verzögerungen aufgrund von einem Gerätedefekt)
- Messung der Wasserdruck-Wasserauslass-Kennlinie:
 - Ermittlung der Permeabilität, Messung bei verschiedenen Drücken
 - Variabilität innerhalb einer Produktions-Charge
 - Variabilität innerhalb unterschiedlicher Produktions-Chargen
- Vorläufige Ergebnisse:
 - Berechnung der Permeabilität und des kf-Wertes ist für eine Charge erfolgt (eine weitere Charge wird momentan untersucht)
 - Variabilität innerhalb einer Charge ist signifikant unterschiedlich (Varianzanalyse); eine weitere Charge wird untersucht
 - Messung von 0,5 und 1,0 m Stücken zeigt keinen Druckabfall in 1,0 m langen Schläuchen
- Planung der Versuchsaufbauten und Messreihen für die Versuche zur Bestimmung von Einfluss-Faktoren (Alterung, Wärme/Kälte, Verstopfung)
- Durchführung von Versuchen im Folienhaus an der HSOS. Die Auswertung und Eichung der Bodenfeuchte-Sensoren für die Wassergehaltbestimmung ist in Bearbeitung
- Die Planung und Konzeptionierung des Versuchsaufbaus im Tropenhaus „Klein Eden“ in Tettau (Flächeninstallation zur Bewässerung von Papaya unter Verwendung verschiedener Wasserqualitäten) ist erfolgt. Installation und Versuchsbeginn folgen im November.
- Verwertung der ersten Labormessergebnisse zur Konzeptionierung neuer Perlschlauchtypen. Erste Überlegungen zur Anpassung des Produktionsverfahrens (Reduktion der Variabilität)

2. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der geltenden Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung sowie der Finanzierungsplanung.

2.1 Arbeitsplanung

Der aktuelle technische Projektstand entspricht dem geplanten Ablauf der Arbeiten.

Einige Arbeitspakete mussten zeitlich angepasst werden, da das Arbeitsverhältnis des Projektmitarbeiters HSOS (Frau Farida Degner) erst zum 1.8.2015 realisiert werden konnte. Die entstandenen Projektkosten der Hochschule Osnabrück können also erst in diesem Berichtszeitraum (01.08. – 31.10.) nachgewiesen werden.

2.2 Zeitplanung

Der Projektzeitraum wird sich daher voraussichtlich um 1 Quartal auf Ende Juli 2016 verlängern.

2.3 Kostenplanung

Die Kosten im Berichtszeitraum entsprechen den Kosten der abgegebenen Planung.

2.4 Finanzierungsplanung

Die Finanzierungsplanung wurde eingehalten und wird weiterverfolgt.

3. *Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraumes gegenüber dem geltenden Antrag verändert (bitte begründen)?*

Die Aussichten für die Erreichung der Projektziele im Berichtszeitraum bleiben im Vergleich zum geltenden Antrag unverändert.

4. *Sind von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?*

Dem Antragsteller sind im Berichtszeitraum keine Ereignisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

5. *Sind oder werden Änderungen der Zielsetzung notwendig?*

Ausgehend vom aktuellen Standpunkt ist eine Notwendigkeit für eine Änderung der Zielsetzung nicht erkennbar.

Datum	Stempel und Unterschrift des Bewilligungsempfängers
-------	-----------------------------------------------------

A3 Zwischenbericht 3

3. Kurzbericht zum Projektfortschritt

(Beantwortung in Stichworten genügt, falls erforderlich bitte Zusatzblätter verwenden)

Aktenzeichen AZ 31988/01	Bewilligungsempfänger Water Future Systems AG	
Projekttitel Weiterentwicklung eines hydraulisch und energetisch effizienten Unterflurbewässerungssystems mit voll-automatischer Regelung für die direkte Wurzeldüngung von Pflanzen		
Projektbeginn 05.05.2015	Projektlaufzeit 04.05.2016	Berichtszeitraum 01.11.2015-31.01.2016

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

- Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 ist eine erhebliche Variabilität innerhalb der einzelnen Produktions-Chargen festgestellt worden. Diese Variabilität ist auf die Beschaffenheit der derzeit verwendeten Extrusionsapparatur zurück zu führen. Abweichungen in diesem Ausmaß schließen die Anpassung des Produktionsprozesses (Arbeitspakete 5 u. 6) im derzeitigen Maschinendesign aus und bedürfen zunächst der Entwicklung einer neuen Extrusionsapparatur, welche eine chargenübergreifend gleichmäßigere Produktion des Perlschlauches gewährleistet. Sobald diese Anforderung erfüllt ist, kann der Produktionsprozess bei gleichbleibender Qualität über entsprechende Parameter angepasst und so die Schlauchproduktion optimiert werden.

Aus diesem Grund ist eine kostenneutrale Projektlaufzeit-Verlängerung um 9 Monate beantragt worden. Die projektexterne Entwicklung der Extrusionsapparatur hat bereits begonnen. Wir rechnen mit einer Fertigstellung zum Oktober 2016, so dass die Forschungsarbeit zur Optimierung der Schlauchproduktion im November 2016 wieder aufgenommen werden kann.

Weitere Ergebnisse:

- Die computerbasierte Simulation der Wasserverteilung im Schlauch und der Wasserabgabe im Boden zeigt nachvollziehbare Ergebnisse. Der Einsatz des Verfahrens für weitere Szenarien Berechnungen ist vielversprechend.

- Freilandversuche zur Wasserverteilung an der Hochschule Osnabrück sind durchgeführt worden und werden derzeit ausgewertet.

- Die Installation zum Versuchsaufbau im Tropenhaus „Klein Eden“ in Tettau (Flächeninstallation zur Bewässerung von Papaya unter Verwendung verschiedener Wasserqualitäten) ist erfolgt. Eine regelmäßige Überprüfung des Wasserdurchlasses anhand von Revisionsstücken erfolgt durch die Projektteilnehmer.

- Es sind Versuche und Messreihen zur Ermittlung der Alterung des Schlauchmaterials anhand der Einfluss-Faktoren Wärme und Kälte sowie Befeuchtung/Austrocknung durchgeführt worden.

Erste Ergebnisse:

- Die Frosteinwirkung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Wasserabgabe des Perlschlauchs.
- Die Hitzeeinwirkung scheint den Durchfluss zu vermindern.
- Abwechselnde Befeuchtung und Austrocknung des Schlauches zeigt ebenfalls eine Tendenz zur Verminderung des Durchflusses.

Die Versuche werden weiter fortgeführt, um die Ergebnisse zu verdeutlichen und auf Signifikanz zu prüfen. Ein weiterer Versuch zur Materialalterung durch permanenten Wasserdurchfluss wird derzeit durchgeführt.

2. *Vergleich des Standes des Vorhabens mit der geltenden Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung sowie der Finanzierungsplanung.*

2.1 Arbeitsplanung

Der aktuelle technische Projektstand entspricht dem geplanten Ablauf der Arbeiten. Aufgrund der Ergebnisse (siehe 1.) bedarf es einer Unterbrechung des Projektes und Wiederaufnahme im November 2016 nach Fertigstellung einer verbesserten Extrusionsapparatur.

2.2 Zeitplanung

Der Projektzeitraum wird sich daher voraussichtlich um 9 Monate auf Ende Februar 2017 verlängern.

2.3 Kostenplanung

Die Kosten im Berichtszeitraum entsprechen den Kosten der abgegebenen Planung.

2.4 Finanzierungsplanung

Die Finanzierungsplanung wurde eingehalten und wird weiterverfolgt.

3. *Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraumes gegenüber dem geltenden Antrag verändert (bitte begründen)?*

Die Aussichten für die Erreichung der Projektziele im Berichtszeitraum bleiben unter Berücksichtigung der Laufzeitverlängerung im Vergleich zum geltenden Antrag unverändert.

4. *Sind von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?*

Dem Antragsteller sind im Berichtszeitraum keine Ereignisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

5. *Sind oder werden Änderungen der Zielsetzung notwendig?*

Ausgehend vom aktuellen Standpunkt ist eine Notwendigkeit für eine Änderung der Zielsetzung nicht erkennbar.

Datum	Stempel und Unterschrift des Bewilligungsempfängers
-------	-----------------------------------------------------

A4 Zwischenbericht 4

4. Kurzbericht zum Projektfortschritt

(Beantwortung in Stichworten genügt, falls erforderlich bitte Zusatzblätter verwenden)

Aktenzeichen AZ 31988/01	Bewilligungsempfänger Water Future Systems GmbH	
Projekttitle Weiterentwicklung eines hydraulisch und energetisch effizienten Unterflur-Bewässerungssystems mit vollautomatischer Regelung für die direkte Wurzeldüngung von Pflanzen		
Projektbeginn 05.05.2015	Projektlaufzeit 31.05.2018	Berichtszeitraum 01.12.2017 – 28.02.2018

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 ist eine erhebliche Variabilität innerhalb der einzelnen Produktions-Chargen festgestellt worden. Diese Variabilität war auf die Beschaffenheit der ursprünglich verwendeten Extrusionsapparatur zurück zu führen. Anpassung des Produktionsprozesses (Arbeitspakete 5 u. 6) in dem erforderlichen Ausmaß waren im derzeitigen Maschinendesign nicht möglich und bedurften zunächst der Entwicklung einer neuen Extrusionsapparatur, welche umfangreiche Anpassungsmöglichkeiten der einzelnen Parameter bietet und so eine chargenübergreifend gleichmäßigere Produktion des Permatube-Schlauches ermöglicht.

Die wichtigsten technischen Änderungen im Produktionsverfahren sind:

- Die Auswahl der Rohstoffe und Rohstofflieferanten wurde hinsichtlich der Materialqualität und -homogenität überprüft und optimiert. In Kombination mit einer verbesserten Mischtechnik werden zusätzliche Sieb- und Filtertechniken sowie eine Ionisierungsvorrichtung eingesetzt. Dies führt zu einer gleichbleibend homogeneren Zusammensetzung des Ausgangsmaterials.
- Eine gleichmäßigere Abkühltemperatur wird durch den Einsatz eines indirekten Kühlkreislaufs erreicht. So wird eine gleichmäßige Porenstruktur erzielt.
- Im Extruder wurden verschiedene Schneckengeometrien getestet. Eine optimale Schnecke mit den Zonen Aufschmelzung, Vermischung und Kompression wurde entworfen und eingebaut.
- Zudem sichert eine bestmögliche Produktionstransparenz und -dokumentation die Einhaltung von Qualitätsstandards und die Nachvollziehbarkeit von eventuellen Produktionsmängeln.

Es sind bereits verschiedene Perl-Schlauch-Prototypen hergestellt worden, die sich zum einen in der Materialzusammensetzung, zum anderen in der Wasserabgabemenge unterscheiden. Aus den bisherigen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass ein „dichterer“ Permatube-Schlauch durch die höhere Drucktoleranz zu einer homogeneren Wasserverteilung führt und gleichzeitig größere Permatube-Schlauchlängen in der Anwendung ermöglichen kann.

Die Prototypen werden derzeit in Laborversuchen an der Hochschule Osnabrück auf ihre Eigenschaften überprüft. Ab März 2018 sind Gewächshausversuche an der Hochschule sowie Freilandtests unter ariden Klimabedingungen in Marokko geplant. Diese sollen vor allem auch Aufschluss über die Auswirkungen des Bodens auf die Wasserabgabe geben.

2. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der geltenden Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung sowie der Finanzierungsplanung.

Für die Entwicklung der neuen Extrusionsapparatur ist eine kostenneutrale Projektlaufzeit-Verlängerung um 9 Monate beantragt worden.

Zwischenzeitlich kam es zu betrieblichen Veränderungen, so dass die Fördermittelzuwendung umgewidmet wurde und das Forschungsprojekt von der Nachfolgefirma Water Future Systems GmbH mit gleichbleibenden Beteiligten weitergeführt wird.

Nachdem die projektexterne Entwicklungsphase und der Umwidmungsvorgang abgeschlossen werden konnte, ist die Forschungsarbeit zur Optimierung der Permatube-Schlauch-Produktion (Arbeitspaket 5) im Dezember 2017 wiederaufgenommen worden.

2.1 Arbeitsplanung

Aufgrund der Unterbrechung des Projektes und der Wiederaufnahme im Dezember 2017 kam es zu einer zeitlichen Verschiebung des Projektablaufplans. Durch die Entwicklung der verbesserten Extrusionsapparatur können die Arbeitspakete nun entsprechend des aktualisierten Ablaufplans weiterbearbeitet werden.

2.2 Zeitplanung

Der Projektzeitraum wird sich voraussichtlich bis Ende Mai 2018 mit nachstehender Zeitplanung verlängern:

01.12.2017 - 31.01.2018

Arbeitspaket 5: Entwicklung des neuen Produktionsprozesses

01.02.2018 - 30.04.2018

Arbeitspaket 6: Funktionsüberprüfung des Unterflur-Bewässerungssystems und Prototypenentwicklung

01.02.2018 - 31.05.2018

Arbeitspaket 7: Erarbeitung von Anwendungsrichtlinien auf naturwissenschaftlich bodenphysikalischer Basis für den effizienten Einsatz des neuen Unterflur-Bewässerungsperschlauchs im Kontext zur optimalen Verlegetiefe, optimalem Verlegeabstand, maximalen Verlegelängen in Abhängigkeit von Relief und Bodenart abgestimmt auf unterschiedliche Pflanzenarten.

01.12.2017 - 31.05.2018

Arbeitspaket 8: Projektbegleitende Dokumentation, Erstellung von Berichten, Projektbesprechungen

2.3 Kostenplanung

Die Kosten im Berichtszeitraum entsprechen den Kosten der abgegebenen Planung.

2.4 Finanzierungsplanung

Die Finanzierungsplanung wurde eingehalten und wird weiterverfolgt.

3. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraumes gegenüber dem geltenden Antrag verändert (bitte begründen)?

Durch die erfolgreiche Entwicklung der neuen Extrusionsapparatur bleiben die Aussichten für die Erreichung der Projektziele nach Anpassung des Berichtszeitraums (siehe 1. und 2.2) im Vergleich zum geltenden Antrag unverändert.

4. Sind von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?

Dem Antragsteller sind im Berichtszeitraum keine Ereignisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

5. Sind oder werden Änderungen der Zielsetzung notwendig?

Ausgehend vom aktuellen Standpunkt ist eine Notwendigkeit für eine Änderung der Zielsetzung nicht erkennbar.

Datum	Stempel und Unterschrift des Bewilligungsempfängers